

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Кузин Андрей Викторович

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ
ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДГОТОВЛЕННОГО
ПО ФРАКЦИОННОМУ СОСТАВУ КОКСА**

Специальность 05.16.02 – Металлургия чёрных,
цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Донецк – 20__

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «____» 20 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 01.019.03 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, I учебный корпус, 1.203.

Тел. факс: +38 (062) 304-30-55, E-mail: uchensov@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, II учебный корпус, интернет <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «____» 20 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.019.03

А.В. Яковченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Чёрная металлургия является одной из базовых отраслей экономики, обеспечивающих значительный объём валового внутреннего продукта. Однако, затраты на производство конечной металлопродукции выше в сравнении с затратами ведущих производителей дальнего зарубежья. В настоящее время значительная часть энергоресурсов на производство металлопродукции расходуется при выплавке чугуна. Кроме того, металлургический кокс и железорудное сырье, используемое в доменных печах России и Украины, значительно уступают по показателям качества зарубежным производителям. Поэтому, одной из главных задач при выплавке чугуна является снижение расхода кокса.

На большинстве металлургических предприятий в доменном цехе подготовка кокса к плавке по фракционному составу заключается, в основном, в выделении из металлургического кокса фракции крупнее 25-30 мм с последующей загрузкой её в печь. Это приводит к использованию скрапового кокса нерациональных классов крупности в доменной плавке.

Внедрение и освоение технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) предопределяет значительное (вплоть до 40 %) снижение объёмной доли кокса в доменной шихте. В результате этого в доменной печи существенно повышаются нагрузки на кокс, что приводит к значительному его разрушению, образованию большего количества мелких фракций (менее 10 мм), снижению среднего размера кусков кокса по мере его опускания. В связи с этим технология доменной плавки с вдуванием ПУТ нуждается в подготовленном по фракционному составу коксе.

Одним из возможных путей снижения расхода скрапового кокса является его рациональная подготовка к доменной плавке по фракционному составу, которая должна включать обязательные этапы: выделение фракции крупнее 80 мм с последующим её дроблением; выделение и загрузка в доменную печь фракции крупнее 35-40 мм; выделение из отсева мелкофракционного кокса (далее по тексту – коксовый орешек) крупностью от 10-15 до 35-40 мм с последующей загрузкой его в доменную печь в смеси с железорудной шихтой.

Данная схема подготовки кокса позволит повысить: однородность фракционного состава загружаемого в доменную печь скрапового кокса; механическую прочность; средний размер загружаемого в доменную печь скрапового кокса; дренажную способность коксовой насадки; газопроницаемость доменной шихты в «сухой» зоне и зоне когезии и перераспределить участие углерода в реакции прямого восстановления оксида железа между углеродом кокса и углеродом коксового орешка. Применение качественного и подготовленного по фракционному составу кокса в комплексе с другими мероприятиями позволит снизить негативное влияние технологии пылевдувания на газопроницаемость столба шихты и обеспечить значительное снижение удельного расхода кокса. Однако требуется всесторонне изучить влияние подготовки кокса по фракционному составу на доменный процесс.

Степень разработанности темы. Полномасштабная дискуссия и первые промышленные опыты по оценке рациональной крупности скрапового кокса нача-

лись в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века. Ряд учёных, исходя из характеристик прочности и фракционного состава агломерата, рекомендовали использовать в доменной печи кокс фракции 30-60 мм или даже 20-40 мм для конкретных технологических условий. Другие учёные считали, что кокс должен быть представлен фракциями 40-60 мм и 60-80 мм, поскольку именно такой кокс позволяет повысить технико-экономические показатели (ТЭП) в сравнении с коксом меньших размеров, а также обеспечит хороший дренаж в горне. В ряде случаев была реализована загрузка коксового орешка в смеси с железорудной частью шихты. В 70-х и 80-х годах прошлого столетия выполнены работы по изучению динамики разрушения кусков кокса отдельных классов крупности.

Проблемой подготовки кокса к доменной плавке занимались как отечественные (И.Д. Балон, Н.Н. Чернов, М.Я. Остроухов, А.Н. Чернягин, П.А. Щукин, В.А. Улахович, Г.В. Журавлев, Д.А. Мучник и др.), так и зарубежные учёные (В. Айзенхут, Э. Тайхерт и др.).

Вопросами влияния смешивания кокса или коксового орешка с железорудной шихтой на ТЭП доменной плавки занимались И.И. Коробов, В.И. Логинов, В.Н. Ковшов, К.И. Котов, С.М. Соломатин, К.А. Мусиенко, С.М. Тлеугабулов и др. В последние десятилетия данное направление активно развивали С.Л. Ярошевский, С.К. Сибагатуллин, В.А. Добросок, Л.Н. Никитин, А.С. Харченко, A. Babich, D. Senk и др. Полученные результаты послужили базой для проведения дальнейших исследований, выполненных в настоящей работе.

Цель и задачи исследования. Установить закономерности газодинамических и восстановительных процессов, усовершенствовать технологию доменной плавки с использованием подготовленного по фракционному составу кокса, повысить эффективность использования дополнительных видов топлива, снизить удельный расход кокса и увеличить производительность доменных печей.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи:

1. Усовершенствовать математическую модель газопроницаемости доменной шихты в «сухой» зоне с учётом расходования части углерода коксового орешка на прямое восстановление оксидов железа.
2. Разработать математическую модель газопроницаемости зоны когезии при введении коксового орешка в железорудную часть шихты.
3. Установить особенности влияния введения коксового орешка в железорудный слой на степень восстановления оксидов железа и поведение материалов в зоне пластического состояния.
4. Усовершенствовать способ загрузки кокса в доменные печи.
5. Усовершенствовать технологию доменной плавки с использованием подготовленного по фракционному составу кокса.
6. Разработать технологические режимы доменной плавки с использованием компенсирующих мероприятий, обеспечивающих повышение доли замены кокса до 50 % пылеугольным топливом.

Объект исследования. Технология доменной плавки с использованием подготовленного по фракционному составу кокса.

Предмет исследования. Закономерности и процессы доменной плавки, со-

вершенствование технологии доменной плавки с использованием подготовленного по фракционному составу кокса, повышение эффективности использования дополнительных видов топлива.

Научная новизна полученных результатов.

1. Получило дальнейшее развитие представление о газопроницаемости рудного слоя при введении в него коксового орешка в «сухой» зоне доменной печи. Определено, что с учётом расходования углерода коксового орешка на прямое восстановление оксида железа газопроницаемость слоя смеси уменьшается на 5-7,5 % (абс.) в сравнении с газопроницаемостью слоя такой же смеси без учёта протекания процесса восстановления.

2. Впервые установлено количественное влияние на газопроницаемость зоны когезии введение коксового орешка в рудный слой. Определено, что в зоне когезии рудный слой даже без добавки в него коксового орешка является газопроницаемым, и этим обеспечивается прохождение через этот слой газов в количестве минимум 6,9 % от общего его расхода. Введение в рудный слой коксово-го орешка в количестве 30 % обеспечивает дальнейшее повышение количества газа, проходящего через рудный слой, до 36,1 % и улучшение газопроницаемости зоны когезии на 18 %.

3. Впервые установлено количественное влияние компенсирующих мероприятий на газопроницаемость зоны когезии при использовании технологии доменной плавки с высоким расходом пылеугольного топлива. Показано, что перепад давления газа в зоне когезии при повышении содержания железа в шихте от 56 до 60 % снижается на 1,1-1,5 %, при повышении прочности кокса после реакции с CO_2 от 40 до 60 % – на 40 %, при уменьшении на 25 % температурного интервала размягчения железорудных материалов – до 25 %.

4. Получило дальнейшее развитие представление о газопроницаемости коксовой линзы в зоне когезии при использовании скипового кокса различного фракционного состава. Показано, что перевод доменной печи со скипового кокса крупностью более 25 мм на фракцию 40-80 мм позволяет в зоне когезии снизить перепад давления газа в коксовой линзе на 7,7 %.

5. Получило дальнейшее развитие представление о степени восстановления оксидов железа при введении коксового орешка различной крупности в железорудный материал. Показано, что максимальная степень восстановления оксидов железа наблюдается при использовании коксового орешка крупностью не более крупности железорудного материала.

6. Получило дальнейшее развитие представление о размягчении железорудных материалов при введении в них коксового орешка. Показано, что введение коксового орешка в количестве 30 % в слой окатышей приводит к меньшему разбуханию этого слоя на 2,7 % (абс.), что будет способствовать снижению бокового давления шихты на стенки печи.

Теоретическая значимость работы.

1. Установлена зависимость изменения газопроницаемости рудной части шихты в «сухой» зоне при введении в железорудный слой коксового орешка с учётом расходования части его углерода в реакциях прямого восстановления FeO . Показано, что газопроницаемость слоя смеси при этом уменьшается, что необхо-

димо в дальнейшем учитывать при разработке новых или совершенствовании известных математических моделей.

2. Установлено, что рудная линза в зоне когезии даже без добавки коксового орешка является газопроницаемой. Показано, что применение коксового орешка способствует дальнейшему увеличению количества газа, проходящего через рудную линзу в зоне когезии.

3. Получило дальнейшее развитие представление о перераспределении участия углерода кокса в реакциях прямого восстановления оксидов железа при использовании технологии пылевдувания. Показано, что введение коксового орешка в железорудную часть шихты способствует как снижению участия углерода кокса в реакциях прямого восстановления, так и повышению доли углерода кокса, доходящего до фурм.

4. Установлено количественное влияние параметров ряда компенсирующих мероприятий на газопроницаемость зоны когезии при использовании технологии пылевдувания. Показано, что повышение содержания железа в шихте и прочности кокса после реакции с CO₂, снижение температурного интервала размягчения железорудных материалов обеспечивают снижение перепада давления газа в зоне когезии. Эти сведения открывают новые возможности по выбору компенсирующих мероприятий, позволяющих в большей степени улучшать газопроницаемость зоны когезии при освоении технологии доменной плавки с высоким расходом ПУТ.

5. Усовершенствовано представление о влиянии фракционного состава скипового кокса на газопроницаемость коксовой линзы в зоне когезии.

6. Усовершенствовано представление о гранулометрическом составе кокса в нижней части доменной печи с использованием показателя CSR, что открывает новые возможности для объективного анализа газопроницаемости коксовой насадки в горне и заплечиках, прогнозирования случаев загромождения горна и выбора кокса необходимого качества.

Практическая значимость работы.

1. Усовершенствован способ загрузки доменной печи за счёт разделения рудной части на две порции, составляющие от 30 до 70 % от её общей массы в ските, и укладки между ними коксового орешка крупностью 8-40 мм и кокса фракции крупнее 80 мм, что обеспечивает перемешивание их с рудным компонентом. Коксовый орешек и кокс фракции крупнее 80 мм загружают в количестве до 30 % от общей массы кокса (патент на полезную модель Украины № 58341).

2. Усовершенствован способ загрузки доменной печи за счёт разделения рудной части на две порции, составляющие от 30 до 70 % от её общей массы в ските, и укладки между этими порциями коксового орешка крупностью 8-40 мм и части металлургического кокса. Причём часть коксового орешка крупностью 8-15(20) мм загружают в таком количестве, чтобы этого орешка было достаточно для прямого восстановления железа в количестве до 30 % (патент на полезную модель Украины № 88279).

3. Установлено изменение показателей качества металлургического кокса от крупности кусков. Показано, что классы крупности 40-60 и 60-80 мм металлургического кокса имеют наилучшие значения показателей качества по механической

прочности, прочности после реакции с CO₂, реакционной способности и истираемости. При выделении данных классов крупности в скиповый кокс и освоении технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ обеспечивается повышение газопроницаемости столба шихты и наилучшие ТЭП работы печи.

4. На доменной печи объёмом 2200 м³ фирмой ESSAR STEEL HAZIRA INDIA были использованы рекомендации по подготовке кокса к доменной плавке (снижение содержания фракции крупнее 80 мм в скиповом коксе до 5 %, увеличение нижнего размера скипового кокса до 35 мм, повышение расхода коксового орешка в смеси с железорудной частью шихты до 34 кг/т чугуна), позволившие снизить в опытном периоде расход суммы приведенного скипового кокса и коксового орешка с 493 до 479 кг/т чугуна при повышении производительности до 4036 т/сутки (на 1,9 %).

5. На доменной печи объёмом 1513 м³ Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ) проведена при рекомендованных параметрах опытно-промышленная плавка (выделение из металлургического кокса фракции крупнее 80 мм с последующим её дроблением, увеличение размера на нижнем сите коксового грохота до 36 мм, выделение коксового орешка крупностью 15-36 мм, загрузка орешка в смеси с железорудной частью шихты в количестве 22 кг/т чугуна), что позволило в данном периоде длительностью около одного месяца снизить расход суммы приведенного скипового кокса и коксового орешка с 457,5 до 443 кг/т чугуна и увеличить производительность с 2961 до 3164 т/сутки.

6. На доменной печи объёмом 1033 м³ Донецкого металлургического завода (ДМЗ) проведена при рекомендованных параметрах опытно-промышленная плавка (применение металлургического кокса с содержанием фракции крупнее 80 мм до 5 %, увеличение размера на нижнем сите коксового грохота до 28 мм, выделение коксового орешка крупностью 15-28 мм, загрузка орешка в железорудную часть шихты в количестве 27 кг/т чугуна), что позволило снизить в данном периоде длительностью один месяц расход суммы приведенного скипового кокса и коксового орешка с 463 до 455 кг/т чугуна и увеличить производительность с 1962 до 1988 т/сутки.

7. На доменных печах № 2 и 4 ПАО «ММК им. Ильича» проведены опытно-промышленные плавки при загрузке металлургического кокса в количестве до 10 % в рудный слой. Показано, что снижение расхода кокса на 1 т чугуна в среднем по печам составило 8,5 кг.

8. На доменной печи № 5 объёмом 2300 м³ ПАО «ММК им. Ильича» освоена технология доменной плавки с вдуванием ПУТ в количестве 120-171,3 кг/т чугуна. Решению этой задачи способствовало применение комплекса компенсирующих мероприятий, в том числе и внедрение рекомендаций по подготовке кокса к доменной плавке: использование металлургического кокса с содержанием фракции крупнее 80 мм 6,61 % и увеличение размера отверстий на нижнем сите коксового грохота до 28 мм. Внедрение рекомендаций по подготовке кокса обеспечило уменьшение расхода скипового кокса на 6,1 кг/т чугуна.

9. Обоснована возможность замены кокса до 50 % дополнительными видами топлива. Показано, что указанное снижение расхода кокса и повышение производительности доменных печей на 15,4-36,3 % обеспечивается за счёт повышения

расхода ПУТ до 205-235 кг/т чугуна, применения высококачественного кокса и рациональной технологии его подготовки по фракционному составу, а также других компенсирующих мероприятий, обеспечивающих полную и комплексную компенсацию негативного влияния дополнительных видов топлива на технологию.

10. Материалы диссертации используются в курсе «Основы подготовки кокса к доменной плавке» при обучении магистрантов по направлению подготовки 22.04.02 «Металлургия», магистерская программа «Металлургия чугуна».

Методология и методы исследования.

При проведении исследований использованы основные положения современной теории металлургии чугуна, стандартные методики исследования и определения химических и физических характеристик шихтовых материалов и продуктов плавки, методы математической статистики при обработке результатов, лабораторные исследования, опытно-промышленные плавки на действующих доменных печах, составление материально-тепловых и зональных балансов. Обработку производственных данных работы доменных печей производили с помощью специально разработанной программы на базе данных Microsoft Access. Для построения графического материала использовался мастер диаграмм редактора Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту. Следующие основные научные разработки и положения выносятся на защиту.

1. Зависимость газопроницаемости рудной части шихты от введения в неё коксового орешка в «сухой» зоне доменной печи. Учитывая расход углерода коксового орешка на прямое восстановление оксидов железа, установлено, что газопроницаемость слоя смеси меньше на 5-7,5 % (абс.) в сравнении с ранее полученными данными.

2. Зависимость газопроницаемости зоны когезии от введения коксового орешка в рудный слой. Определено, что в зоне когезии рудный слой является газопроницаемым и это обеспечивает прохождение газов через этот слой в количестве минимум 6,9 % от общего его объёма. Показано, что введение коксового орешка в рудный слой приводит к дальнейшему увеличению количества газа, проходящего через этот слой в зоне когезии и, как следствие, улучшению газопроницаемости зоны когезии. Это положение имеет высокую актуальность при масштабном освоении технологии вдувания ПУТ.

3. Зависимость газопроницаемости зоны когезии от расхода пылево-угольного топлива. Показано, что увеличение расхода ПУТ со 100 до 160 кг/т чугуна вызывает повышение газодинамического сопротивления зоны когезии на 12,5-13,5 %, что обуславливает необходимость применения компенсирующих мероприятий для сохранения или снижения перепада давления газа в этой зоне.

4. Зависимость газопроницаемости коксовой линзы в зоне когезии от использования скипового кокса различного фракционного состава. Показано, что использование кокса крупностью 40-80 мм в сравнении с коксом крупностью более 25 мм имеет меньшее газодинамическое сопротивление коксовой линзы в зоне когезии.

5. Закономерность размягчения окатышей от введения в них коксового орешка. Показано, что введение коксового орешка в слой окатышей приводит к

уменьшению разбухания слоя окатышей.

Степень достоверности и аprobация результатов.

Достоверность и сформулированные в работе научные положения, выводы и рекомендации подтверждаются корректным использованием основных положений современной теории металлургии чугуна, методов статистической обработки, проведением лабораторных опытов и опытно-промышленных плавок, расчётом материально-теплового и зонального теплового балансов, сопоставлением расчётных показателей с экспериментальными.

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на международных конференциях: научно-технической «Пылеугольное топливо - альтернатива природному газу при выплавке чугуна» (г. Донецк, декабрь 2006 г.); IV научно-практической «Донбасс - 2020: Наука и техника – производству» (г. Донецк, май 2008 г.); научно-технической, посвященной 100-летию со дня рождения академика З.И.Некрасова (г. Днепропетровск, январь 2008 г.); «Стратегия качества в промышленности и образовании» (г. Варна, июнь 2008 г., июнь 2013 г., Болгария); 3rd Conference on Process Development in Iron and Steelmaking (Lulea, June 2008 year, Sweden); научно-практической «Творческое наследие Б.И. Китаева» (г. Екатеринбург, февраль 2009 г., Россия); научно-технической «Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах» (г. Мариуполь, сентябрь 2010 г.); II, IV, V и VI Конгрессе по агло-коксо-доменному производствам «Доменное производство: сырьевые и топливные базы, капитальные ремонты, практические вопросы технологии и управления» (г. Ялта, май 2009 г., май 2011 г., май 2012 г., май 2013 г.), а также на научных семинарах кафедры руднотермических процессов и малоотходных технологий ГОУВПО «ДОННТУ» (г. Донецк, 2015 г., 2019 г.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Современное состояние доменного производства, мировой опыт подготовки металлургического кокса к доменной плавке».

В современных условиях расход условного топлива на 1 т готовой продукции достигает 1000-1200 кг, причём доля топлива, расходуемого на получение 1 т чугуна, превышает 50 %. В настоящее время на передовых отечественных и зарубежных предприятиях удельный расход скрапового кокса составляет 300-350 кг/т чугуна. Указанное снижение расхода кокса было обеспечено, в основном, применением технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ в количестве 150-200 кг/т чугуна. Для реализации этой технологии необходимо внедрение мероприятий для полной и комплексной компенсации негативного влияния вдувания ПУТ на газопроницаемость столба шихты.

Дискуссия и первые промышленные опыты по выбору рациональной крупности скрапового кокса началась в конце 60-х – начало 70-х годов прошлого века. Выбор рациональной крупности скрапового кокса, особенно в свете освоения технологии вдувания ПУТ, продолжается и в настоящее время.

Повысить роль кокса как разрыхлителя шихты в доменной печи (ДП) можно за счёт выделения из металлургического кокса рациональных классов крупности,

а из отсева кокса – коксового орешка с последующей загрузкой его в смеси с железорудной частью шихты.

Однако реализация указанной выше подготовки кокса к доменной плавке нуждается в разработке и/или уточнении ряда положений. Кроме того, в виду масштабного освоения технологии вдувания ПУТ вопросы подготовки кокса по классам крупности и его рационального использования в доменной плавке изучены недостаточно полно. На основе выполненного анализа поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований.

Второй раздел «**Методы и методики выполнения расчётных, лабораторных и промышленных исследований**».

Аналитические исследования, физическое моделирование процесса восстановления и размягчения железорудных материалов, анализ работы доменных печей проводили в лаборатории использования ПУТ под руководством д.т.н. С.Л. Ярошевского при кафедре руднотермических процессов и малоотходных технологий.

При физическом моделировании процесса восстановления в качестве исходных материалов использовали окатыши необходимых классов крупности массой 25 г и твердый восстановитель. В постановочных опытах, помимо слоя смеси окатышей без и с коксовым орешком, на дно тигля загружали топливо, имитирующее слой кокса. В дальнейшем опыты проводили без слоя кокса при введении в слой окатышей коксового орешка с различным его расходом (до 40 %), либо различным фракционным составом (от 1 до 7 мм). Нагрев материалов производили до заданной температуры и выдерживали при этой температуре в течение 150 минут при непрерывной подаче аргона в рабочее пространство электропечи. После тигель с материалами извлекали из электропечи, охлаждали без доступа воздуха и проводили химический анализ восстановленных окатышей.

На коксохимических заводах проводили отбор металлургического кокса с последующим рассевом его на классы крупности и определяли технический анализ, механическую прочность кокса М25 (ДСТУ 2206-93), CSR и CRI (ДСТУ 4703:2006).

В доменных цехах metallurgических предприятий осуществляли отбор проб скрапового кокса, отсева кокса, коксового орешка и коксовой мелочи. Рассеяны проб производили с применением сит с ячейками квадратного сечения.

Для статистического исследования работы ДП использовали алгоритм, заключающийся в статистической обработке первичной информации работы ДП по сменам, расчёте основных показателей доменной плавки. Минимальный объём выборки составлял не менее 100 опытов (смен). Расчёты материально- теплового и зонального балансов доменной плавки проводили по методике д.т.н. А.Н. Рамма. Расчёты технологических режимов доменной плавки при вдувании ПУТ в количестве до 250 кг/т чугуна выполняли с использованием теории полной и комплексной компенсации, разработанной д.т.н. С.Л. Ярошевским. Возможность реализации режимов оценивали с использованием определяющих параметров.

Третий раздел «**Исследование газопроницаемости в сухой зоне и зоне когезии доменной печи с использованием подготовленного по фракционному составу кокса**».

Аналитически установлено количественное перераспределение участия углерода коксового орешка в реакциях прямого восстановления элементов, перешедших в чугун, и на его науглероживание. Общее количество углерода кокса и коксового орешка, потраченное на прямое восстановление и на науглероживание чугуна, оценивали с учётом общей поверхности загруженного кускового топлива в ДП. В качестве исходных использовали данные о работе зарубежных доменных печей, применяющих технологию пылевдувания. Показано, что введение коксового орешка в железорудную часть шихты в количестве от 20 до 169,3 кг/т чугуна способствует снижению участия углерода кокса в протекании данных процессов с 130 до 35 кг/т чугуна. При этом одновременно повышается участие углерода коксового орешка с 15 до 110 кг/т чугуна в этих процессах, что позволяет повысить долю углерода кокса, дошедшего до фурм, с 54 до 75 %.

Усовершенствована математическая модель газопроницаемости рудной части шихты при введении в неё коксового орешка в «сухой» зоне ДП. Коксовый орешек, загружаемый в рудную часть шихты, в значительной мере расходуется на прямое восстановление оксида железа, т.е. часть коксового орешка не участвует в улучшении газопроницаемости железорудного слоя. Отличительной особенностью усовершенствованной методики от ранее разработанной является учёт участия углерода коксового орешка в прямом восстановлении FeO. Для этого определяли количество кислорода, связанного с оксидами железа, на уровне распара с учётом вероятного повышения общей степени восстановления оксида железа при использовании коксового орешка. Оценивали количество FeO, восстанавливаемого прямым путём углеродом коксового орешка (FeO_{KO}), с учётом вероятной доли участия коксового орешка. Далее рассчитывали необходимый расход коксового орешка для прямого восстановления FeO по всей высоте слоя шихты в печи до распара, кг/подачу:

$$Q_{KO\text{ необх}} = \frac{12}{72} \cdot \frac{FeO_{KO}}{C_{KO}}, \quad (1)$$

где C_{KO} – содержание углерода в коксовом орешке, доля единицы.

При условии фактического расхода коксового орешка ($Q_{KO\text{ факт}}$) ниже необходимого для участия в прямом восстановлении FeO, перепад давления газа оценивали по предложенной нами формуле, %:

$$\Delta P_{c\text{ учётом восст}} = 0,46 \cdot \Delta P_{без\text{ учёта восст}} \cdot 1,1, \quad (2)$$

а при условии фактического расхода коксового орешка выше необходимого значения, оценивали по предложенной нами формуле, %:

$$\Delta p_{c\text{ учётом восст}} = 0,46 \cdot \Delta p_{без\text{ учёта восст}} + 0,54 \cdot \Delta p_{без\text{ учёта восст}} \cdot \frac{Q_{KO\text{ факт}} - Q_{KO\text{ необ}}}{Q_{KO\text{ факт}}}, \quad (3)$$

где 0,46 – коэффициент неизменного состояния орешка на участке от уровня засыпи шихты до распара; $\Delta p_{без\text{ учёта восст}}$ – изменение перепада давления газа в рудной части без учёта расходования углерода коксового орешка на прямое восстановление, %; 1,1 – коэффициент учёта остаточного разрыхляющего действия орешка в нижней части шахты (при температурах 900-1000°C); 0,54 – доля высоты от уровня засыпи шихты до распара печи, где происходит прямое восстановление FeO (температура 900-1000°C).

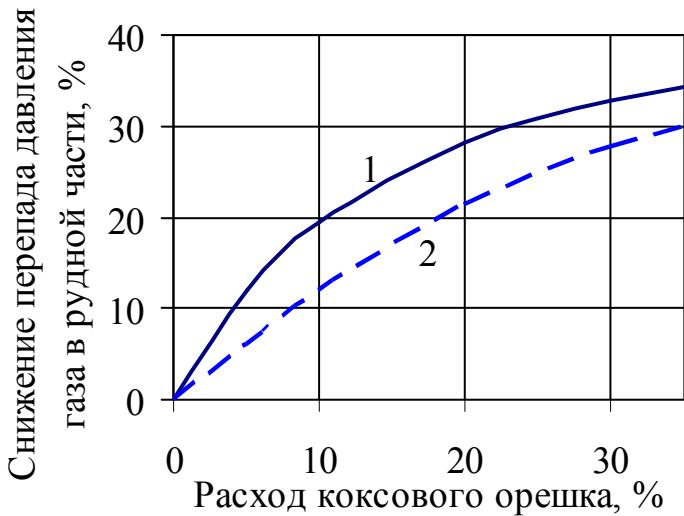


Рисунок 1. Влияние введения коксового орешка в железорудный слой на изменение перепада давления газа без (1) и с учётом (2) участия углерода коксового орешка в прямом восстановлении

давление газа на разных горизонтах зоны когезии оценивали по формуле, Па:

$$p = \sqrt{p_{ш}^2 + \frac{f}{\sin \alpha_w} \cdot \frac{(1-\varepsilon_k)}{\varepsilon_k^3 \cdot d_3} \cdot \frac{p_0 \cdot \rho_g \cdot U_0^2}{T_0 \cdot \Phi} \cdot \left(T_{HP} \cdot H_{3P} + \frac{a_T \cdot H_{3P}^2}{2} \right)}, \quad (4)$$

а перепад давления газа в зоне когезии оценивали по формуле, Па

$$\Delta p_{зк} = p - p_{ш}, \quad (5)$$

где $p_{ш}$ – давление газа на границе шахты и распара, Па; f – коэффициент сопротивления; α_w – угол наклона коксового окна к горизонту, град.; ε_k – порозность кокса в коксовых окнах, m^3/m^3 ; d_3 – эквивалентный (среднегармонический) диаметр кусков кокса, м; T_0 и p_0 – нормальные абсолютные температура и давление ($T_0=273$ К, $p_0 \approx 1,013 \cdot 10^5$ Па); U_0 – скорость доменного газа, м/с; Φ – фактор формы; T_{HP} – абсолютная температура начала размягчения, К; H_{3P} – высота зоны размягчения, м; a_T – градиент температуры газа, К/м.

Расчёты показали, что увеличение расхода ПУТ со 100 до 160 кг/т чугуна способствует росту газодинамического сопротивления зоны когезии на 12,5-13,5 %. Установлено, что при использовании технологии доменной плавки с высоким расходом ПУТ $\Delta p_{зк}$ при повышении содержания железа в шихте от 56 до 60 % снижается на 1,1-1,5 %, при повышении прочности кокса после реакции с CO_2 от 40 до 60 % – на 40 %, при уменьшении на 25 % температурного интервала размягчения железорудных материалов – до 25 %.

Разработана математическая модель газопроницаемости зоны когезии, учитывающая влияние загрузки в рудный слой коксового орешка. В качестве гипотезы было принято, что рудная линза в зоне когезии, даже без добавки коксового орешка, является газопроницаемой. Согласно алгоритму определяли высоту вы-

В качестве исходных использовали данные работы ДП № 3 ЕМЗ объёмом 1719 м³. Показано, что с учётом расходования углерода коксового орешка на прямое восстановление FeO газодинамическое сопротивление слоя смеси будет больше на 5-7,5 % (абс.) в сравнении с сопротивлением слоя, когда углерод коксового орешка не участвует в прямом восстановлении FeO (рисунок 1).

Выполнена оценка влияния ПУТ и компенсирующих мероприятий на изменение перепада давления газа в зоне когезии ($\Delta p_{зк}$). Оценку осуществляли с помощью математической модели, разработанной д.т.н. А.А. Томашем. Давление оценивали по формуле, Па:

хода зоны когезии за пределы распара, длину пути газа через коксование (рудное) окно, площадь коксовых и рудных линз. Остаточную приведенную порозность рудного слоя в зоне когезии без введения коксового орешка оценивали по формуле, м³/м³:

$$\varepsilon_{ocm}^p = \frac{\varepsilon_{\text{нач}}^p - \Delta V}{(1 - \varepsilon_{\text{нач}}^p) + (\varepsilon_{\text{нач}}^p - \Delta V)}, \quad (6)$$

а с учётом введения коксового орешка, м³/м³:

$$\varepsilon_{ocm}^{cm} = \varepsilon_{ocm}^p \cdot \%_p + \varepsilon_{ocm}^{op} \cdot \%_{op}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\text{нач}}^p$ – начальная приведенная порозность рудного слоя, м³/м³; ΔV – усадка рудного материала в зоне когезии, доля единицы; ε_{ocm}^{op} – остаточная приведенная порозность коксового орешка в рудной линзе в зоне когезии, м³/м³; $\%_p$ и $\%_{op}$ – долевое соотношение рудных материалов и коксового орешка, доля единицы.

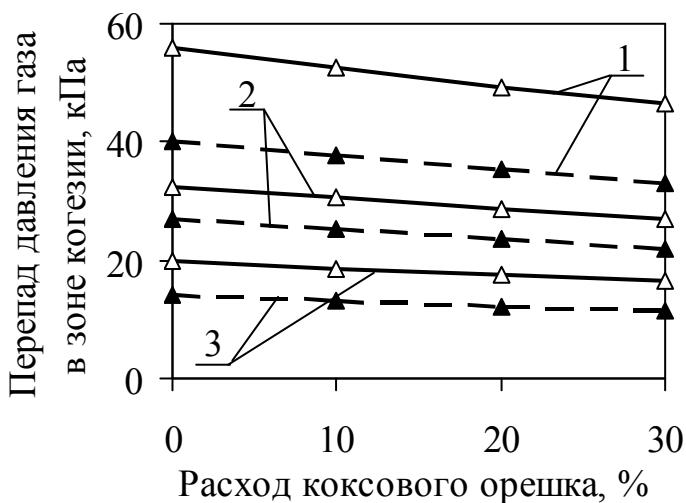


Рисунок 2. Влияние введения коксового орешка в рудную часть на перепад давления газа в зоне когезии при низкой (1), умеренной (2) и высокой (3) интенсивности осевого газового потока и вдувании ПУТ 0 (▲) и 250 (Δ) кг/т чугуна.

1,8-3 раза, повышению площади боковой поверхности зоны когезии в 1,2-1,7 раза, что обеспечит снижение $\Delta p_{зк}$ в 1,5-2,9 раза.

Выполнена оценка минимального и максимального размеров кусков кокса для загрузки в ДП с использованием сведений гранулометрического состава металлургического кокса. Показано, что без выделения из отсева кокса коксового орешка минимальный размер кусков скипового кокса не должен превышать 30-32 мм ввиду резкого увеличения потерь кокса с отсевом, а при выделении коксового орешка – 35-40 мм. Максимальный размер кусков скипового кокса не должен превышать 80 мм.

Получило дальнейшее развитие представление о газопроницаемости коксовой линзы в зоне когезии при использовании скипового кокса различного фракционного состава. Оценку осуществляли с помощью математической модели, раз-

Давление газа оценивали по формуле (4), а $\Delta p_{зк}$ – по формуле (5). Показано, что без загрузки коксового орешка в рудную часть количество газа, проходящего через рудную линзу в зоне когезии, составляет минимум 6,9 %. Загрузка коксового орешка в количестве 30 % в рудную часть приводит к повышению количества газа, проходящего через рудную линзу в зоне когезии, до 36,1 % и к снижению $\Delta p_{зк}$ на 18 % (рисунок 2). Установлено, что введение в железорудную часть шихты коксового орешка и переход от низкой интенсивности осевого газового потока к более высоким значениям интенсивности будет способствовать вытягиванию зоны когезии в шахту печи в

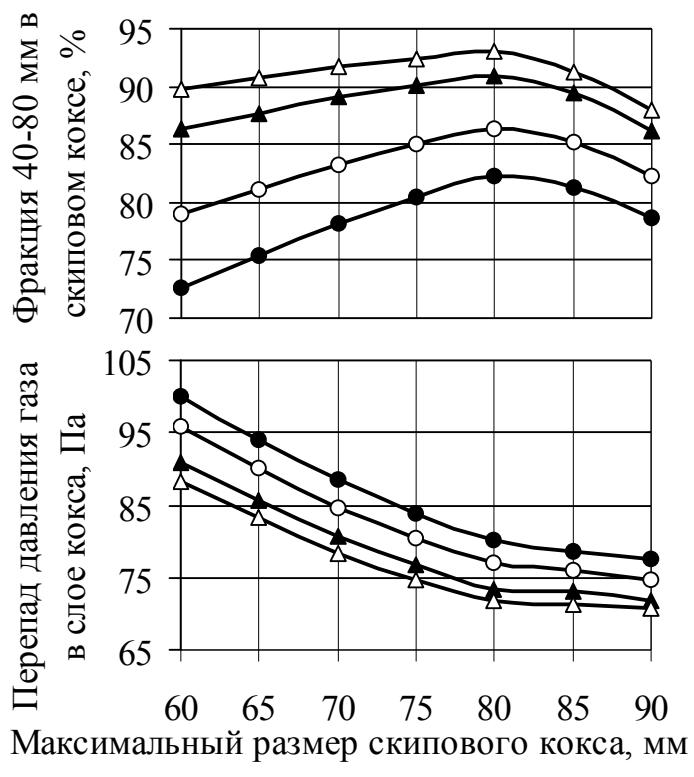


Рисунок 3. Изменение перепада давления газа в зоне когезии в слое кокса в зависимости от его фракционного состава.
Минимальный размер скрапового кокса, мм: ● – 25; ○ – 30; ▲ – 35; Δ – 40.

В нашем случае, первая пара – это содержание фракции менее 10 мм в количестве $(100-CSR)/100$. Вторую пару составляет фракция менее 60 мм в количестве 99 %. После определения параметров статистического распределения и статистической обработки расчётных данных об изменении гранулометрического состава кокса в нижней части ДП получено обобщающее уравнение, графическое представление результатов которого приведено на рисунке 4. Как видно, по мере повышения

работанной д.т.н. А.А. Томашем. Показано, что перевод ДП со скрапового кокса крупностью более 25 мм на кокс крупностью 40-80 мм позволяет повысить содержание указанного класса с 78,6 до 93 %, увеличить среднегармонический диаметр кусков кокса с 50,5 до 53,6 мм, повысить однородность кусков кокса более чем в 4,5 раза. При этом перепад давления газа в коксовой линзе в зоне когезии снижается на 7,7 % (рисунок 3), а ожидаемое увеличение производительности ДП составит 3,4-5 %.

Предложен метод оценки гранулометрического состава кокса в нижней части ДП в зависимости от показателя CSR. Оценку осуществляли на основе статистического распределения Вейбула. Гранулометрический состав кокса на основе данного распределения определяли при условии сведений о двух парах данных. Значения CSR кокса количество мелких кусков кокса уменьшается, а крупных – увеличивается.

Четвертый раздел «Лабораторные и промышленные исследования с использованием подготовленного по фракционному составу кокса».

Проведено физическое моделирование процесса восстановления оксидов железа при введении в слой окатышей 30 % коксового орешка различной реакционной способности. Для оценки влияния реакционной способности в качестве топлива использовали кокс марки «Премиум»

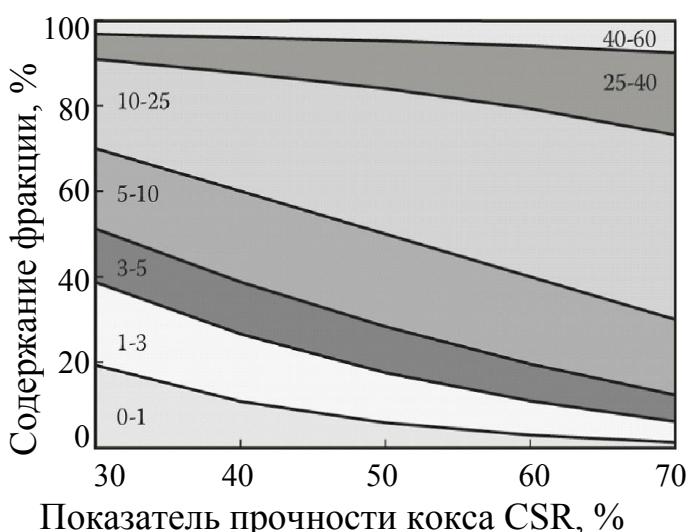


Рисунок 4. Изменение грансостава кокса в горне в зависимости от CSR: числа – крупность частиц кокса, мм

(CRI 31,3 %; CSR 57,2 %) и экспериментальный высокореакционный кокса (CRI 65 %; CSR 19,5 %). Тигель с материалами устанавливали в предварительно нагретую электропечь до 200°C, нагревали до 1000°C и выдерживали при данной температуре в течение 150 минут. Показано, что замена низкореакционного коксово-го орешка высокореакционным позволила повысить степень восстановления железорудного материала с 20 до 31,3 %.

Проведено физическое моделирование процесса восстановления оксидов железа при введении в слой окатышей различного количества коксового орешка. Пробы с материалами устанавливали в предварительно нагретую электропечь, нагревали до 900, 1000 и 1100°C и выдерживали при указанных температурах в течение 150 минут. Показано, что повышение температуры восстановления позволило существенно интенсифицировать процесс восстановления оксидов железа. Так, например, применение коксового орешка в количестве 30 % и выдержка проб в течение 150 минут при температуре 900°C в сравнении с температурами 1000 и 1100°C способствует повышению степени восстановления с 11 до 26,5 и 31,6 %. Повышение доли коксового орешка в смеси с окатышами также способствовало повышению степени восстановления оксидов железа. Так, например, повышение расхода коксового орешка с 10 до 20-40 % при нагреве пробы до температуры 1100°C и выдержке пробы в течение 150 минут способствовало повышению степени восстановления с 7,1 до 24,7-40,5 % и содержания металлического железа с 0,3 до 2,3-8,9 %. Установлено, что при соответствующем повышении доли коксово-го орешка при температуре восстановления 900°C средняя скорость восстановления повышалась в 2-3 раза, а с повышением температуры восстановления до 1000-1100°C – в 2,7-5 раз.

Проведено физическое моделирование процесса восстановления оксидов железа. На дно тигля загружали топливо, имитирующее слой кокса, а сверху – слой окатышей или смесь окатышей с коксовым орешком. Показано, что при введении коксового орешка в количестве 30 % (при пропорциональном уменьшении расхода кокса) и нагреве материалов до температуры 1000°C с последующей выдержкой при данной температуре в течение 150 минут существенно изменяется содержание оксидов железа: Fe_2O_3 уменьшается с 29,4 до 12 %, FeO повышается с 45,7 до 60,2 %, $\text{Fe}_{\text{мет}}$ повышается с 7,91 до 14,2 %.

Установлено, что степень восстановления повысилась с 30,4 до 41,7 % или на 37,2 % (отн.) (рисунок 5).

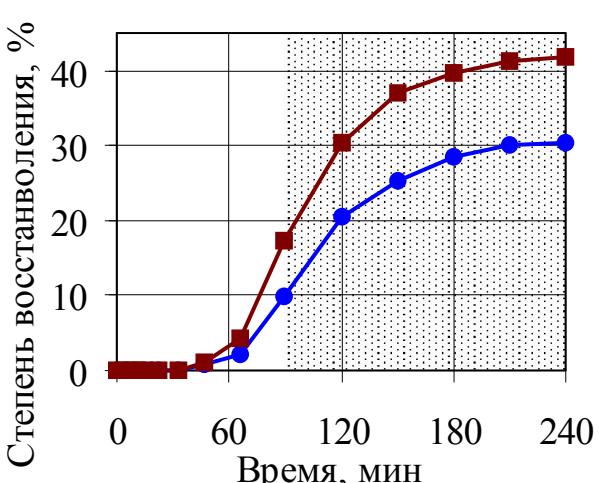


Рисунок 5. Изменение степени восстановления окатышей при нагреве их до 1000°C с последующей выдержкой при данной температуре в течение 150 минут (заштрихованная область) без (●) и с введением (■) коксового орешка.

Проведено физическое моделирование процесса восстановления оксидов железа при введении в слой окатышей коксово-го орешка различной крупности. В окатыши крупностью 3-5 мм вводили

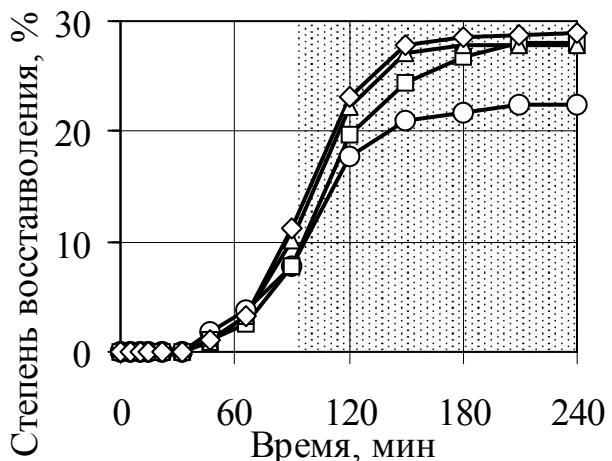


Рисунок 6. Изменение степени восстановления окатышей при нагреве их до 1000°C с последующей выдержкой при данной температуре в течение 150 минут (заштрихованная область) при использовании коксового орешка различной крупности:
○ – 5-7 мм; □ – 3-5 мм; Δ – 2-3 мм;
◊ – 1-2 мм.

коксового орешка крупностью не более крупности железорудного материала.

Соискателем выполнен расчёт ожидаемого снижения расхода кокса при подготовке его по фракционному составу и применении коксового орешка. Показано, что подготовка кокса к доменной плавке по высоким параметрам фракционного состава (содержание фракции крупнее 80 мм в скиповом коксе не более 5 %, повышение нижнего размера кусков скипового кокса до 40 мм), выделение и загрузка коксового орешка в железорудную часть шихты в количестве до 40 % от загружаемого топлива обеспечат снижение расхода кокса на 4,4-6 %.

Проведено физическое моделирование процесса размягчения при введении коксового орешка в железорудный слой.

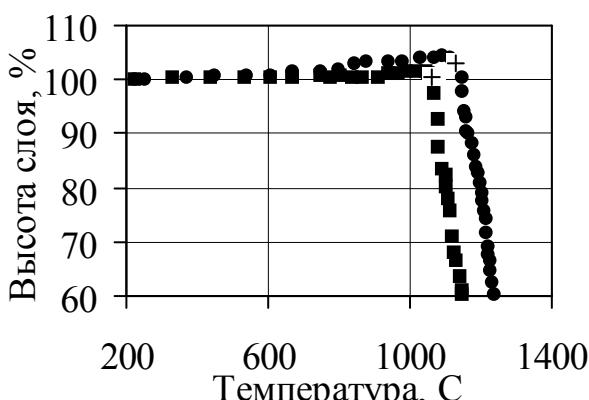


Рисунок 7. Кривые размягчения окатышей СевГОК суммарной основностью 0,7-0,8 без (●) и с введением (■) коксового орешка: + - начало резкого уменьшения высоты.

коксовый орешек в количестве 30 % крупностью 5-7, 3-5, 2-3 или 1-2 мм. Показано, что введение коксового орешка фракции 3-5, 2-3 и 1-2 мм в сравнении с фракцией 5-7 мм способствовало снижению Fe_2O_3 с 35,6 до 14,1-18 % и повышению FeO с 49,8 до 62,9-69,0 % при незначительном изменении $Fe_{\text{мет}}$. Установлено, что введение коксового орешка фракции 1-2, 2-3 и 3-5 мм в слой окатышей способствовало значительному повышению степени восстановления оксидов железа до 27,8-28,9 % (рисунок 6). Кроме того, максимальная скорость процесса восстановления достигается на 120 минуте при использовании коксового орешка указанных фракций. Приведенные данные свидетельствуют об интенсификации процесса восстановления оксидов железа, а максимальная степень восстановления оксидов железа наблюдается при использовании

коксового орешка крупностью не более крупности железорудного материала. Соискателем выполнен расчёт ожидаемого снижения расхода кокса при подготовке его по фракционному составу и применении коксового орешка. Показано, что подготовка кокса к доменной плавке по высоким параметрам фракционного состава (содержание фракции крупнее 80 мм в скиповом коксе не более 5 %, повышение нижнего размера кусков скипового кокса до 40 мм), выделение и загрузка коксового орешка в железорудную часть шихты в количестве до 40 % от загружаемого топлива обеспечат снижение расхода кокса на 4,4-6 %. Проведено физическое моделирование процесса размягчения при введении коксового орешка в железорудный слой. Показано, что введение коксового орешка в количестве 30 % в слой агломерата или окатышей способствует снижению температуры начала размягчения слоя на 70-105°C и температуры конца размягчения слоя на 80-90°C. Кроме того, введение коксового орешка в количестве 30 % в агломерат при температуре близкой к началу размягчения изменение высоты слоя не наблюдали. Введение коксового орешка в слой окатышей способствовало существенному – на 2,7 % (абс.) – уменьшению разбухания окатышей (рисунок 7), что приведет к снижению давления шихты на

стенки шахты ДП. Кроме того, определено, что при введении коксового орешка в рудную часть температурный интервал размягчения окатышей СевГОК увеличивается, а для агломерата ЮГОК – уменьшается.

На коксохимических заводах провели отбор проб и оценку показателей качества кокса марки «Премиум» по классам крупности. Показано, что среднее значение показателя CSR для кокса классов крупности 40-60 и 60-80 мм в сравнении со значениями для классов крупности более 80 и 25-40 мм выше на 5,6 и 4,0 % (абс.), CRI – ниже на 1,3 и 2,6 % (абс.), M25 – выше на 1,1 и 3,8 % (абс.). Среднее значение показателя M10 для классов крупности кокса 40-60 и 60-80 мм в сравнении со значением аналогичного показателя для класса крупности 25-40 мм является близким, а со значением класса крупности кокса более 80 мм – выше на 1,2 % (абс.). Установлено, что максимальные значения механической прочности и прочности после реакции с CO₂, минимальные значения реакционной способности и истираемости, имеют фракции кокса 40-60 и 60-80 мм.

При участии соискателя проведены исследования по оценке показателей качества и ситового состава кокса при подготовке его к доменной плавке в условиях металлургических предприятий.

В доменном цехе ДМЗ на нижних ситах коксового грохота первоначально использовали металлические сита типа «ёлочки» с размером отверстий 18 мм. Проведенные исследования показали, что в отсеве кокса содержание фракции крупнее 10 мм составляло в среднем 50 %, влажность достигала 10 %, содержание золы увеличивалось на 2-4 % от первоначального её содержания в металлургическом коксе. В связи с освоением режима доменной плавки с вдуванием ПУТ более 150 кг/т чугуна потребовалась комплексная подготовка кокса к доменной плавке. На коксовых грохотах размер отверстий на нижних металлических ситах был увеличен до 28 мм. Усовершенствована система удаления коксовой мелочи с последующим рассевом её на одноярусном инерционном грохоте (размер ячеек на резиновом сите составлял 15×15 мм). Выделяемый коксовый орешек характеризовался следующим фракционным составом: крупнее 25 мм – 38,6-82,7 %, 25-10 мм – 15,0-58,1 %, менее 10 мм – не более 4 %. Значительные колебания содержания фракций более 25 и 25-10 мм в коксовом орешке были обусловлены износом нижних металлических сит (увеличение размера отверстий от 28 до 32 мм в течение 2-4 месяцев). Поступающий в цех кокс марки «Премиум» характеризовался следующими значениями показателей: фракция крупнее 80 мм – 4,3-11,6 %, CSR – 52-56,8 %, влага – 4,1-4,9 %, зола – 10,3-10,5 %, M25 – 88,1-89,3 %, M10 – 6,7-7,4 %. Даны рекомендации для дальнейшего совершенствования подготовки кокса к доменной плавке по фракционному составу.

В доменном цехе ЕМЗ исследовано изменение выхода отсева кокса при снабжении цеха металлургическим коксом, как через бункерную эстакаду, так и через склад окатышей и кокса (СОК) в количестве 60-80 % от необходимого его потребления и уменьшении зазора между валками дробилки от 80 до 70-60 мм. Установлено, что в первом случае выход отсева кокса крупностью менее 32 мм составил 32,4 кг/т чугуна (5,9 %), а во втором – возрастал соответственно с 40,7 (7,5 %) до 47,6-50,1 кг/т чугуна (8,4-9,1 %). Исследован гранулометрический состав металлургического кокса, скрапового кокса, отсева кокса и коксового орешка.

Показано, что при транспортировке кокса от Авдеевского КХЗ до приемных бункеров СОК содержание класса крупности более 80 мм уменьшалось в среднем с 9,3 до 7,2 % (на 22,6 % отн). Даны рекомендации для снижения в коксе класса крупности более 80 мм: содержание класса крупности более 80 мм необходимо обеспечить в количестве не более 5 % путём выделения указанного класса крупности на СОК с последующим дроблением на валковой дробилке при выставлении зазора между валками в пределах 75-80 мм. Рассевы скрапового кокса показали, что обеспечение доменных печей коксом, прошедшим СОК, способствовало снижению содержания класса крупности более 80 мм с 11,9 до 3,2 % при одновременном повышении мелких классов крупности (10-0, 10-25 и 25-40 мм) с 23,0 до 37,1 %. Рассевы отсева кокса, выделяемого на коксовых грохотах с установленными на нижних ситах резиновыми полотнами с размерами отверстий 32×32 мм, показали повышение содержания фракции 10-0 мм с 36,7 до 45,7 %. Рассевы коксового орешка, полученного на вибрационных грохотах с размерами ячеек на нижних ситах 15×15 мм, показали, что содержание фракции 10-0 мм не превышало 3 %. Даны рекомендации для дальнейшего совершенствования подготовки кокса к доменной плавке по фракционному составу: для снижения содержания в скраповом коксе мелких классов крупности с 37,1 до 15 % и менее необходимо увеличить размер отверстий на нижних резиновых ситах коксового грохota с 32 до 36 мм и, в перспективе, до 40 мм и др.

Усовершенствованы способы загрузки доменных печей за счёт разделения рудной части на две порции, составляющие от 30 до 70 % от её общей массы в скрапе, и укладки между ними коксового орешка крупностью 8-40 мм и либо кокса фракции крупнее 80 мм, либо металлургического кокса, что обеспечивает перемешивание их с рудным компонентом. Количество загружаемого разрыхлителя в рудную часть шихты не должно превышать 30 % от общей массы кокса.

Предложен способ подготовки скрапового кокса в условиях доменного цеха. При конвейерной подаче кокса к доменным печам необходимо предусмотреть возможность отдельного складирования 2-3 сортов кокса для реализации отдельной или совместной их подачи к печам в заданной пропорции.

Пятый раздел «Промышленное освоение технологии доменной плавки на подготовленном по фракционному составу коксе».

На ЕМЗ выполнен анализ показателей качества железорудного материала, используемого в 2007-2008 гг. Показано, что агломерат и окатыши характеризовались достаточно высоким и устойчивым содержанием железа. К недостатку агломерата можно отнести пониженную основность, что предопределяет необходимость повышения расхода в ДП известняка. Агломерат и окатыши имеют относительно низкую прочность, что способствовало повышению содержания в них мелочи 5-0 мм соответственно до 19 и 8 %. Однако, для условий ДП № 5 объёмом 1513 м³ скраповое содержание мелочи в агломерате и окатышах составляло соответственно 8 и 1,5 %. С использованием статистического анализа первичной информации при непосредственном участии соискателя были определены оптимальные значения показателей плавки: интенсивность плавки по углероду – 925±25 кг/(м³·сутки), теоретическая температура горения – 2075±25°C, содержа-

ние кремния в чугуне – $0,8 \pm 0,1\%$, выход шлака – менее 320 кг/т чугуна и др. (рисунок 8, а, б, в, г). Сближение фактических показателей плавки с оптимальными, наравне с другими факторами, способствовало стабилизации технологического процесса и улучшению основных ТЭП доменной плавки.

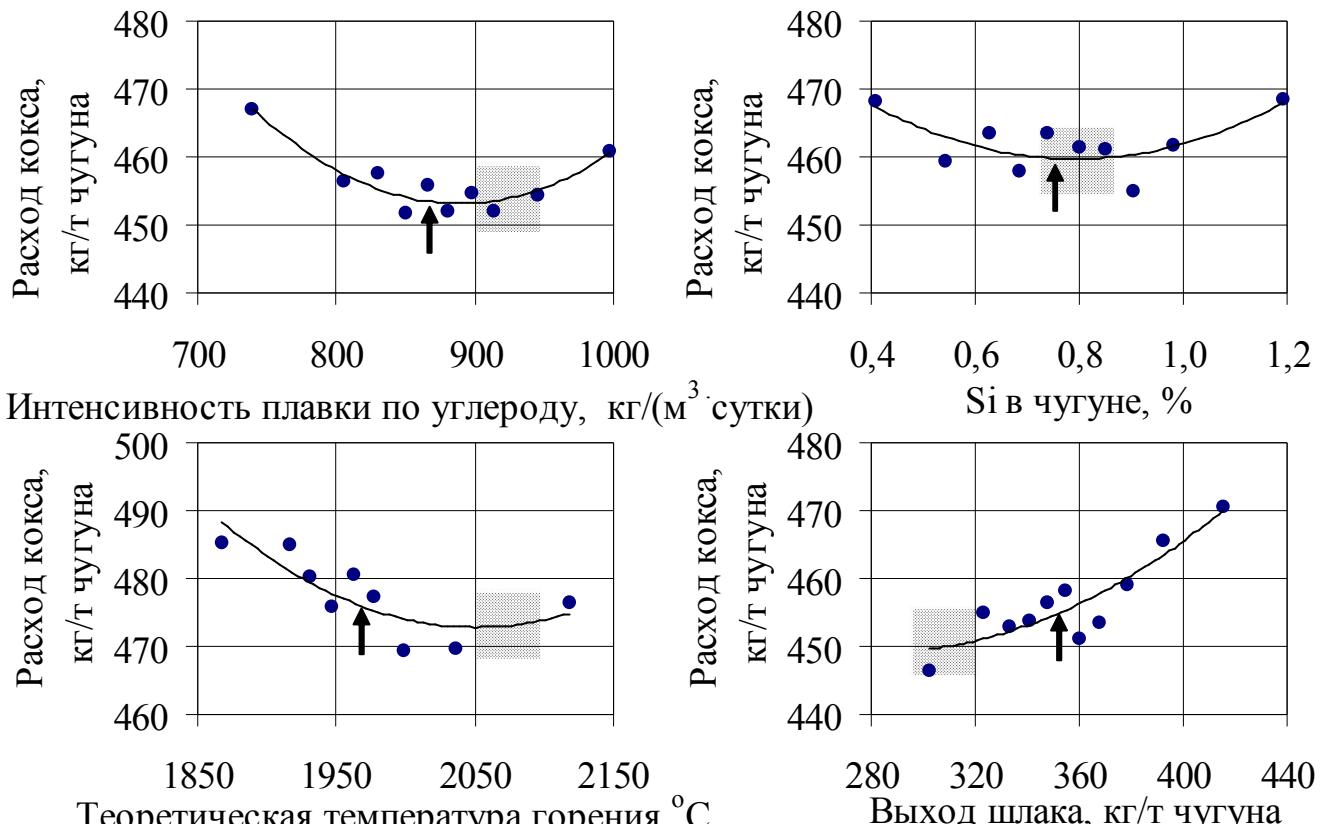


Рисунок 8. Зависимость расхода кокса от показателей доменной плавки: заштрихованная область – оптимальная область значений показателя; стрелка – среднее значение показателя

В условиях ЕМЗ на ДП № 5 проведены промышленные плавки с использованием подготовленного по фракционному составу скипового кокса марки «Премиум». Участок выделения коксового орешка из отсева кокса располагается в непосредственной близости от ДП, и после выделения его на двухярусном виброгрохоте (резиновые сита с размером ячеек 25×25 и 15×15 мм) направляли в бункер коксового орешка. Для сравнения рассмотрели базовый (24.01.-23.03.2008 г.) и опытный (09.05.-06.06.2008 г.) периоды, характеризующиеся высокой стабильностью технологических и шихтовых условий. Подготовка кокса к доменной плавке по фракционному составу заключалась в следующем: выделение на СОКе фракции кокса крупнее 80 мм с последующим её дроблением; выделение скипового кокса крупнее 36 мм; отсев коксового орешка крупностью 15-36 мм; загрузка коксового орешка в железорудную часть шихты. При проведении плавки коксовый орешек насыпали на поверхность агломерата, подаваемого к скиповой яме транспортером, что способствовало лучшему смешению материалов при ссыпании их в скип. Показано, что применение кокса марки «Премиум» и подготовка его по фракционному составу создало предпосылки для увеличения в опытном периоде

расхода дутья на 153 м³/минуту (5,7 %) и, как следствие, повышения производительности печи на 203 т/сутки (6,9 %), температуры дутья до 1181°C и интенсивности плавки по углероду на 30 кг/(м³·сутки). Снижение расхода известняка на 13 кг/т чугуна и выхода шлака на 21 кг/т чугуна частично является следствием улучшения качества кокса. Переход на кокс рациональной по фракционному составу подготовки, в том числе и введение коксового орешка крупностью 15-36 мм в количестве 22 кг/т чугуна в железорудную часть шихты, в реальных технологических условиях ДП № 5 позволил снизить суммарный расход приведенного скипового кокса и коксового орешка на 14,5 кг/т чугуна (3,2 %) (таблица 1).

Таблица 1. Эффективность использования рационального по фракционному составу кокса на ДП № 5 ЕМЗ

Показатели	Период	
	базовый	опытный
Производство (приведенное), т/сутки	2961	3164
Расход скипового кокса (приведенный) и коксового орешка, кг/т чугуна	457,5	443
Расход условного топлива, кг/т чугуна	562	550
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна	619	610
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	965	970
Известняк, кг/т чугуна	83	60
Расход дутья, м ³ /мин	2696	2849
Температура дутья, °С	1032	1181
Давление дутья, кПа	248	253
Содержание кислорода в дутье, %	22,3	22,0
Расход ПГ, м ³ /т чугуна	82	84
Содержание кремния в чугуне, %	0,72	0,86
Основность шлака CaO/SiO ₂	1,18	1,10
Выход шлака, кг/т чугуна	354	333
Интенсивность плавки по углероду, кг/(м ³ ·сутки)	863	893
Теоретическая температура горения, °С	2010	2085
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	762	739

В доменном цехе ДМЗ с 2010 г. основным железорудным компонентом доменной шихты являются окатыши. Анализ качества окатышей СевГОК с 2002 по 2012 гг. показал, что общее содержание железа возросло с 60,8 до 62,7 %, а кремнезема – снизилось с 8,7 до 7,2 %. Существенным недостатком окатышей СевГОК является повышенное содержание мелочи 5-0 мм, которое образуется при их транспортировке от поставщика в доменный цех, достигающее 8 %. Исследование прочности окатышей суммарной основностью 0,5 и 0,8 на сжатие показало, что более высокие и стабильные значения имели окатыши СевГОК с суммарной основностью 0,8. С использованием статистического анализа первичной информации были определены оптимальные значения показателей работы ДП № 2 объемом 1033 м³: теоретическая температура горения – 2175±25°C; интенсивность

плавки по коксу – 1050 ± 25 кг/(м³·сутки), основность шлака (CaO+MgO)/SiO₂ – $1,36 \pm 0,03$ единицы; содержание кремния в чугуне – $0,75 \pm 0,25$ % и др. Сближение фактических показателей плавки с оптимальными, наравне с другими факторами, способствовало снижению расхода кокса на 5-10 кг/т чугуна и повышению производительности печи на 25 т/смену (3,8 %).

В условиях ДМЗ на ДП № 2 проведены промышленные плавки с использованием кокса марки «Премиум» при подготовке его к доменной плавке по фракционному составу. Выделяемый на коксовых грохотах отсев кокса конвейером транспортировался на участок выделения коксового орешка, расположенный на рудном дворе, оборудованный одноярусным инерционным грохотом (резиновые сита с размером ячеек 15×15 мм). Выделяемый коксовый орешексыпался в склад коксового орешка, откуда перегружался рудногрейферным перегружателем в бункер коксового орешка. В качестве основной системы загрузки использовали подачу КООК↓2 м. Расход материалов в подачу составлял, т: кокс 4,2-4,6; окатыши 15,5-16; известняк 1,2-1,5; коксовый орешек 0,1-0,2. Следует отметить, что коксовый орешек набирали во второй рудный скип сверху на окатыши через одну подачу, что создавало наилучшие условия для интенсивного перемешивания материалов. Показано, что рациональная подготовка по фракционному составу кокса к доменной плавке и введение в окатыши коксового орешка в количестве 27 кг/т чугуна крупностью 15-28 мм позволили повысить производительность печи на 26 т/сутки (1,3 %) и расход ПУТ с 115 до 149 кг/т чугуна, а суммарный расход приведенного скипового кокса и коксового орешка снизить на 8 кг/т чугуна (1,7 %).

Для условий доменного цеха ДМЗ выполнен сопоставительный анализ расходов энергоносителей на производство 1 т чугуна за 2002-2005 и 2010 гг. Показано, что расход metallurgического кокса на 1 т чугуна снизился с 505 до 482 кг. Данное снижение было обеспечено использованием кокса с более высокими показателями значений «холодной» и «горячей» прочности, увеличением расхода ПУТ с 87 до 150 кг/т чугуна, полным выводом из состава дутья ПГ, освоением подготовки кокса к доменной плавке по фракционному составу, а также выделением коксового орешка из отсева кокса с последующей загрузкой его в рудную часть и др. Следует отметить, что рациональное использование кокса в ДП при его подготовке к плавке по фракционному составу позволило обеспечить снижение безвозвратных потерь кокса в виде отсева на 5 кг/т чугуна, и вернуть кокс в виде коксового орешка в количестве 13 кг/т чугуна.

Для условий доменного цеха ПАО «ММК им. Ильича» оценили приход на 1 т чугуна серы, щёлочей и цинка, которые составили соответственно 7,49, 8,05 и 3,36 кг. На доменных печах 2 и 4 проведены опытно-промышленные плавки с введением в железорудную часть шихты до 10 % metallurgического кокса. Работа печей в исследуемых периодах характеризовалась стабильностью шихтовых и технологических условий. В качестве основного железорудного материала использовался свой оглюсованный агломерат. Металлургический кокс из бункера добавок через вибрационный питатель поступал в весовую воронку добавок, откуда его порционно выгружали на слой агломерата, предварительно загруженного на пластинчатый конвейер. Далее материалы транспортировались и ссыпались в

весовую воронку агломерата таким образом, чтобы вся порция металлургического кокса оказывалась в воронке. В качестве основной системы загрузки использовали подачу КККК↓АААА↓1,75 м. Показано, что снижение суммы приведенного расхода скипового кокса и металлургического кокса в среднем по печам составило 8,5 кг/т чугуна.

Выполнена аналитическая оценка возможности освоения технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ в условиях ПАО «ММК им. Ильича». Расчёты показали, что имеется возможность освоения технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ в количестве 100-150 кг/т чугуна при реализации компенсирующих мероприятий, в том числе и рациональной подготовки кокса по фракционному составу.

На металлургическом предприятии ПАО «ММК им. Ильича» промышленно освоена технология доменной плавки с вдуванием ПУТ на ДП № 5 объёмом 2300 м³. В качестве базового периода был взят опыт работы печи за июль-август 2012 г., опытного 1 – февраль-март 2013 г., опытного 2 – июнь 2013 г. Основным поставщиком кокса было ПАО «Авдеевский коксохимический завод». Подготовка металлургического кокса к доменной плавке в цехе является типовой. Причём перед освоением технологии вдувания ПУТ был внедрен ряд компенсирующих мероприятий, в том числе увеличение размера отверстий на нижних коксовых ситах от 18 до 28 мм. Для производства ПУТ использовался уголь марки «СС» с содержанием золы до 8 % и серы до 0,5 %. Из таблицы 2 видно, что освоение технологии доменной плавки с вдуванием на 1 т чугуна ПУТ в количестве 120-171,3 кг позволило полностью вывести из состава дутья ПГ, снизить расход кокса на 109-155 кг/т чугуна (21,0-29,9 %), себестоимость – на 157-186 грн., повысить производительность ДП на 1-7,7 %. В этой плавке благоприятное изменение технологии подтверждается снижением потребности тепла при выплавке чугуна на 468-607 кДж/кг чугуна (4,6-6 %) и общих потерь тепла на 295-395 кДж/кг чугуна (22,6-30,2 %), что определило повышение коэффициента полезного действия тепла с 87,0 до 89,5-90,4 %. Успешному освоению технологии вдувания ПУТ в количестве 171,3 кг/т чугуна способствовало применение комплекса компенсирующих мероприятий, обеспечивших снижение расхода кокса на 34 кг/т чугуна, в том числе 6,1 кг/т чугуна за счет реализации мероприятий по рациональной подготовке кокса к доменной плавке. Даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию подготовки кокса по фракционному составу.

Таблица 2. Показатели работы ДП № 5 ПАО «ММК им. Ильича»
без и с вдуванием ПУТ

Показатели	Период		
	база	опыт 1	опыт 2
1	2	3	4
Производство (приведенное), т/сутки	3274	нд	3459
Расход скипового кокса, кг/т чугуна	519	410	364
Расход скипового кокса (приведенный), кг/т чугуна	519	нд	485
Расход условного топлива, кг/т чугуна	565	539	544

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4
Расход шихтовых материалов, кг/т чугуна:			
агломерат ММК им. Ильича	1594	1668	1732
окатыши СевГОК	117	9	4
известняк обычный	4	4	2
Дутье:			
температура, °C	1056	1041	1064
кислород в дутье, %	21,0	22,4	23,1
расход ПУТ, кг/т чугуна	0	120	171,3
расход ПГ, м ³ /т чугуна	37	0	0
Колошниковый газ:			
температура, °C	284	331	344
CO, %	23,5	25,1	25,2
H ₂	5,4	4,5	5,8
Вынос колошниковой пыли, кг/т чугуна	29	21	30
Выход шлака, кг/т чугуна	456	427	448
Содержание Si в чугуне, %	0,77	0,68	0,70
Основность шлака CaO/SiO ₂	1,22	1,19	1,16
Объёмная доля кокса в шихте, %	52,4	46,9	43,0
Степень использования CO, %	41,6	45,3	43,2
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,8	4,9	4,5
Теоретическая температура горения, °C	2076	2060	2100
Приход тепла, кДж/кг чугуна	10086	9618	9479
Коэффициент полезного действия тепла, %	87,0	89,5	90,4
Общие потери тепла, кДж/кг чугуна	1308	1013	913
Коэффициент замены углерода кокса углеродом ПУТ, кг/кг	-	0,973	0,993
Снижение стоимости затрат на энергоресурсы, грн./т чугуна	-	157	186

Шестой раздел «Разработка технологических режимов доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива для повышения доли замены кокса до 50 %».

На основе теории полной и комплексной компенсации соискателем рассчитаны перспективные технологические режимы с применением ПУТ, где в качестве одного из компенсирующих мероприятий используется кокс, подготовленный по фракционному составу к доменной плавке.

Для условий доменного цеха ДМЗ рассчитаны перспективные технологические режимы с применением ПУТ и имеющейся железорудной базы. Предложен комплекс компенсирующих мероприятий в составе: повышение температуры дутья (1100°C) и обогащение его кислородом, замена части известняка мягкообож-

женной известью, подготовка металлургического кокса по фракционному составу, применение окатышей ЛебГОК (250, 400 и 750 кг/т чугуна). Реализация этих мероприятий позволит повысить расход ПУТ до 180-190 кг/т чугуна, что обеспечит снижение расхода кокса до 319-334,6 кг/т чугуна (экономия кокса 26,5-29,9 %), условного топлива – на 14,1-15,1 %, прирост производительности печи на 19,2-20,1 %. Показатели этих технологических режимов соответствуют современным показателям работы европейских доменных печей, работающих с вдуванием на 1 т чугуна ПУТ в количестве 160-200 кг.

Для условий доменного цеха ДМЗ выполнены расчёты для определения возможности дальнейшего снижения расхода скрапового кокса до 50 %. В этих режимах используются высококачественные окатыши (1125 и 774 кг/т чугуна) и металлодобавка (300 кг/т чугуна). Показано, что повышение температуры дутья с 981 до 1200°С, снижение выхода шлака с 373 до 205,7-184,2 кг/т чугуна обеспечили резерв по газодинамике и повышение расхода ПУТ с 174 до 235-205 кг/т чугуна. Это обеспечило снижение расхода скрапового кокса до 281,1-262,4 кг/т чугуна, рост производительности печи на 17,8-36,2 %, снижение расхода условного топлива на 91-140,4 кг/т чугуна. Кроме того, доля тепла, вносимого ПУТ в горн, повысилась на 36,6-19,2 %, общий приход тепла сократился на 9,2-26,6 %, общие потери тепла – на 32,1-32,2 %. Фактическое снижение расхода кокса, с учётом имеющегося базового расхода ПУТ, составило 288,1-306,8 кг/т чугуна или 50,6-53,9 %.

Для условий доменного цеха ПАО «ММК им. Ильича» выполнены расчёты технологических режимов с вдуванием ПУТ. Показано, что реализация расчётных технологических режимов доменной плавки с вдуванием ПУТ в количестве 175-210 кг/т чугуна позволяет снизить суммарный расход скрапового кокса и коксового орешка до 325,7-257,6 кг/т чугуна (на 37,2-50,4 %), условного топлива – на 9,61-15,3 %, себестоимость чугуна – на 296,15-381,68 грн./т чугуна, при этом повысить производительность печи на 15,4-33,2 %.

Для условий доменного цеха ЕМЗ в сложившихся шихтовых и технологических условиях можно обеспечить вдувание на 1 т чугуна 160 кг ПУТ, которое обеспечит снижение расхода кокса на 170,3 кг/т чугуна (на 33,7 %), вывод из состава дутья ПГ в количестве 43 м³/т чугуна, снижение расхода условного топлива на 59,6 кг/т чугуна (на 10,6 %), прирост производительности печи на 14,5 %, снижение себестоимости чугуна на 219,8 грн/т чугуна. Дальнейшее повышение эффективности применения ПУТ сдерживается, в основном, высокими выходом шлака (336 кг/т чугуна) и горновых газов (1427 м³/т чугуна).

Для условий доменного цеха ЕМЗ выполнены расчёты для определения возможности дальнейшего снижения расхода скрапового кокса до 50 %, в которых предусмотрено применение высокоосновного агломерата, окатышей ЦГОК и импортной железной руды. Эти шихтовые условия и повышение температуры дутья с 1136 до 1200°С и содержания кислорода в дутье с 21 до 27,5-29,9 %, снижение выхода шлака с 475 до 264-216 кг/т чугуна обеспечили резерв по газодинамике и повышение расхода ПУТ до 210-230 кг/т чугуна. Это позволяет обеспечить снижение расхода скрапового кокса с 506 до 271,2-247,9 кг/т чугуна (на 46,4-51 %), рост производительности печи на 30,2-36,3 %, снижение расхода условного топ-

лива на 74,3-77,6 кг/т чугуна.

Таким образом, для условий доменной плавки предприятий Донбасса показана возможность снижения расхода кокса до 50 % и повышение производительности доменных печей при использовании ПУТ в количестве 205-235 кг/т чугуна и реализации эффективных компенсирующих мероприятий.

Для условий предприятий Донбасса выполнены расчёты технологических режимов доменной плавки с вдуванием ПУТ, приготовленного из углей марок А, Т и Г при изменении содержания в них золы. Показано, что снижение содержания золы в ПУТ с 17 до 3 % способствует уменьшению расхода флюса в среднем на 40 кг/т чугуна, выхода шлака – на 50 кг/т чугуна, расхода кокса – на 50 кг/т чугуна. О благоприятных изменениях технологии также свидетельствует повышение степени использования восстановительной способности доменного газа и снижение стоимости чугуна.

Для условий Западно-Сибирского металлургического комбината выполнены расчёты технологических режимов доменной плавки с вдуванием ПУТ, приготовленного из буроугольного полукокса (БПК) углей Канско-Ачинского месторождения. Существенными преимуществами БПК являются низкое содержание золы и серы, наличие в золе значительных количеств основных оксидов, низкая температура воспламенения, значительные ресурсы. Расчёты показали высокую эффективность применения ПУТ, приготовленного из БПК, позволяющие обеспечить существенное снижение расхода кокса в доменной плавке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит **значительный вклад в развитие ДНР**, и решена **имеющая важное хозяйственное значение** научно-техническая проблема повышения эффективности использования дополнительных видов топлива, снижения удельного расхода кокса и увеличения производительности доменных печей на основе установленных закономерностей газодинамических и восстановительных процессов, совершенствования технологии доменной плавки и подготовки кокса по фракционному составу.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. В условиях увеличивающегося дефицита коксующихся углей одной из главных задач металлургической отрасли при производстве чугуна является снижение расхода кокса. Актуальным является изучение закономерностей газодинамических и восстановительных процессов, совершенствование технологии доменной плавки с использованием подготовленного по фракционному составу кокса, направленные на повышение эффективности использования дополнительных видов топлива, снижение удельного расхода кокса и увеличение производительности доменных печей.

2. Усовершенствована математическая модель газопроницаемости рудного слоя в «сухой» зоне доменной печи при введении в него коксового орешка. Показано, что с учётом расходования углерода коксового орешка на прямое восстанов-

ление FeO газопроницаемость слоя смеси уменьшается на 5-7,5 % (абс.) в сравнении с газопроницаемостью такого же слоя смеси без учёта расходования углерода коксового орешка на восстановление.

3. Разработана математическая модель газопроницаемости зоны когезии. Определено, что в зоне когезии рудный слой является газопроницаемым и этим обеспечивается прохождение через этот слой газов в количестве минимум 6,9 % от общего его расхода. Введение в рудный слой коксового орешка в количестве 30 % обеспечивает дальнейшее повышение количества газа, проходящего через рудный слой, до 36,1 % и улучшение газопроницаемости зоны когезии на 18 %. Установлено, что введение в рудный слой коксового орешка и переход от низкой интенсивности осевого газового потока к более высоким значениям интенсивности способствует улучшению газопроницаемости зоны когезии в 1,5-2,9 раза.

4. Получило дальнейшее развитие представление о газопроницаемости коксовой линзы в зоне когезии от использования скипового кокса различного фракционного состава. Установлено, что применение скипового кокса фракции 40-80 мм в сравнении с фракцией крупнее 25 мм перепад давления газа в слое кокса в зоне когезии снижается на 7,7 %. Это изменение позволяет увеличить производительность доменной печи примерно на 4,2 %.

5. Установлено количественное влияние компенсирующих мероприятий различной эффективности на газопроницаемость зоны когезии при использовании технологии доменной плавки с высоким расходом пылеугольного топлива. Определено, что перепад давления газа в зоне когезии при повышении содержания железа в шихте от 56 до 60 % снижается на 1,1-1,5 %, при повышении прочности кокса после реакции с CO₂ от 40 до 60 % – на 40 %, при уменьшении на 25 % температурного интервала размягчения железорудных материалов – до 25 %.

6. Исследовано влияние введения в железорудный материал коксового орешка с различным его расходом на степень восстановления оксидов железа. Показано, что увеличение расхода коксового орешка с 10 до 20-40 % при нагреве до температуры 1100°C и выдержке пробы в течение 150 минут обеспечивало повышение степени восстановления оксидов железа с 7,1 % до 24,7-40,5 %.

7. Исследовано влияние введения в железорудный материал коксового орешка различной крупности на степень восстановления оксидов железа. Показано, что максимальная степень восстановления оксидов железа наблюдается при использовании коксового орешка крупностью не более крупности железорудного материала.

8. Исследовано размягчение железорудных материалов при загрузке в них коксового орешка. Показано, что введение коксового орешка в количестве 30 % в слой окатышей приводит к меньшему разбуханию этого слоя на 2,7 % (абс.), что будет способствовать снижению бокового давления шихты на стенки печи.

9. В условиях коксохимических предприятий проведены исследования показателей качества металлургического кокса марки «Премиум» в зависимости от его крупности. Показано, что максимальные значения механической прочности и прочности после реакции с CO₂, минимальные значения реакционной способности и истираемости имеют классы крупности кокса 40-60 и 60-80 мм.

10. На доменных печах ЕМЗ оценено изменение выхода отсева кокса в зави-

симости от разрушающих нагрузок на кокс, возникающих при его транспортировке к скипу. Показано, что при снабжении печей металлургическим коксом через бункерную эстакаду выход отсева кокса крупностью менее 32 мм составлял 32,4 кг/т чугуна (5,9 %). При подаче металлургического кокса через склад окатышей и кокса в количестве 60-80 % от необходимого его потребления и дроблении фракции крупнее 80 мм до фракции крупностью менее 80 мм выход отсева кокса указанной крупности увеличивался до 40,7-50,1 кг/т чугуна (7,5-9,1 %).

11. На основании проведенных исследований гранулометрического состава металлургического кокса, скипового кокса, отсева кокса и коксового орешка определена рациональная технология подготовки металлургического кокса по фракционному составу к доменной плавке. Во-первых, содержание в металлургическом коксе класса крупностью более 80 мм должно составлять не более 5 %, что достигается путём выделения указанного класса крупности с последующим его дроблением до крупности менее 80 мм. Во-вторых, из металлургического кокса и из раздробленной фракции крупностью более 80 мм выделяется отсев кокса с максимальным размером кусков от 35 до 40 мм. Таким образом, самые мелкие куски скипового кокса будут иметь размер от 35 до 40 мм. Следующий этап заключается в выделении из отсева кокса коксового орешка с минимальным размером кусков от 10 до 15 мм. Заключительным этапом является загрузка коксового орешка в рудную часть шихты доменной печи.

12. На доменной печи № 5 ЕМЗ проведена опытно-промышленная плавка с использованием кокса марки «Премиум», подготовленного по указанной рациональной технологии. Показано, что рациональная технология подготовки кокса к доменной плавке по фракционному составу с введением в рудный слой коксового орешка крупностью 15-36 мм в количестве 22 кг/т чугуна способствовала увеличение производительности печи на 203 т/сутки (6,9 %) и снижение расхода суммы приведенного скипового кокса и коксового орешка на 14,5 кг/т чугуна (3,2 %). Это обеспечило фактический экономический эффект в размере более 1,1 млн. гривен. Доля соискателя составляет 25 % от указанного эффекта.

13. На доменной печи № 2 ДМЗ проведена опытно-промышленная плавка с использованием кокса марки «Премиум». Показано, что реализация рациональной технологии подготовки кокса к доменной плавке по фракционному составу не в полном объёме с введением в слой окатышей коксового орешка в количестве 27 кг/т чугуна крупностью 15-28 мм способствовала повышение производительности печи на 26 т/сутки (1,3 %), расхода ПУТ с 115 до 149 кг/т чугуна, снижение расхода суммы приведенного скипового кокса и коксового орешка на 8 кг/т чугуна (1,7 %). Это обеспечило фактический экономический эффект в размере более 850 тыс. гривен. Доля соискателя составляет 50 % от указанного эффекта.

14. На доменных печах № 2 и 4 ПАО «ММК им. Ильича» проведены опытно-промышленные плавки с загрузкой до 10 % металлургического кокса в слой агломерата, загружаемого в печи. Показано, что это обеспечило снижение расхода кокса в среднем по печам на 8,5 кг/т чугуна. Это подтверждает, что данное мероприятие может быть использовано как компенсирующее при освоении технологии пылевдувания.

15. На доменной печи № 5 ПАО «ММК им. Ильича» освоена технология

доменной плавки с вдуванием на 1 т чугуна ПУТ в количестве 120-171,3 кг, что позволило полностью вывести из состава дутья природный газ, снизить расход кокса на 109-155 кг (21,0-29,9 %), повысить производительность печи на 1-7,7 %, снизить себестоимость чугуна на 157-186 грн. Успешному освоению плавки с расходом ПУТ 171,3 кг/т чугуна способствовала реализация комплекса компенсирующих мероприятий, в том числе технологии подготовки кокса к доменной плавке по фракционному составу. Повышение нижней крупности кусков кокса до 28 мм и снижение фракции крупнее 80 мм до 6,61 % обеспечило экономию кокса в количестве 6,1 кг/т чугуна. При проведении опытно-промышленной плавки получен экономический эффект в размере более 1,3 млн. гривен. Доля соискателя составляет 20 % от указанного эффекта.

16. Обоснована возможность замены кокса до 50 % дополнительными видами топлива. Показано, что данное снижение расхода кокса и повышение производительности доменных печей на 15,4-36,3 % обеспечивается за счёт повышения расхода ПУТ до 205-235 кг/т чугуна, применения высококачественного кокса и рациональной технологии его подготовки по фракционному составу, а также других компенсирующих мероприятий, обеспечивающих полную и комплексную компенсацию негативного влияния дополнительных видов топлива на технологию.

17. Дальнейшее исследование будет направлено на совершенствование технологии рациональной подготовки кокса по фракционному составу к доменной плавке и повышение эффективности доменной технологии за счёт замены кокса на 60-70 % дополнительными видами топлива.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Using Coal-Dust Fuel in Ukrainian and Russian Blast Furnaces /A.A. Minaev, A.N. Ryzhenkov, Yu.G. Banninkov, S.L. Yaroshevskii, Yu.V. Konovalov, **A.V. Кузин** // Steel in Translation. – 2008. – Vol. 38. – № 2. – P. 124-131. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ до 50 %*).

2. Оценка гранулометрического состава кокса и порозности в нижней части доменной печи / **А.В. Кузин**, С.Л. Ярошевский, Р.В. Ковалчик, А.А. Томаш // Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. – Алчевськ: ДонДТУ, 2008. – С. 125-133. (*разработана математическая модель оценки гранулометрического состава кокса в нижней части доменной печи*).

3. Эффективность использования пылеугольного топлива из буроугольного полукукса в доменной плавке / С.Л. Ярошевский, С.Р. Исламов, **А.В. Кузин**, З.К. Афанасьева // Бюллєтень «Чёрная металлургия». – 2008. – № 4. – С. 38-46. (*выполнена оценка эффективности использования ПУТ, приготовленного из углей буроугольного полукукса*).

4. **Кузин, А.В.** Подготовка кокса к доменной плавке на современном этапе

развития доменного производства в Украине // Металл и литье Украины. – 2008. – № 7-8. – С. 20-23.

5. Опыт освоения и оптимизации технологии на доменной печи № 5 Енакиевского металлургического завода / А.Л. Подкорытов, А.М. Кузнецов, В.П. Падалка, С.Л. Ярошевский, **А.В. Кузин** // Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2008. – № 11. – С. 59-70. (*выполнено оптимизация технологии и оценка влияния качества кокса на ТЭП доменной плавки*).

6. К вопросу об оптимальном размере кусков скипового кокса / С.Л. Ярошевский, Н.С. Хлапонин, А.М. Кузнецов, В.П. Падалка, **А.В. Кузин** // Металл и литье Украины. – 2009. – № 3. – С. 25-27. (*выполнено аналитическое исследование минимального и максимального размеров скипового кокса*).

7. Theoretical and experimental foundations for preparing coke for blast-furnace smelting /A.L. Podkorytov, A.M. Kuznetsov, E.N. Dymchenko, V.P. Padalka, S.L. Yaroshevskii, **A.V. Kuzin** // Metallurgist. – 2009. – Vol. 53. – № 5-6. – P. 322-328. (*выполнено обоснование минимальной и максимальной крупности кусков кокса при его подготовке к доменной плавке*).

8. Technology for preparing coke for blast-furnace smelting and its efficiency /A.L. Podkorytov, A.M. Kuznetsov, E.N. Dymchenko, V.P. Padalka, S.L. Yaroshevskii, **A.V. Kuzin** // Metallurgist. – 2009. – Vol. 53. – No 7-8. – P. 460-468. (*выполнена оценка фракционного состава кокса и его влияние на ТЭП доменной плавки*).

9. **Кузин, А.В.** Анализ влияния введения коксового орешка в железорудную часть шихты на зону когезии // Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2009. – № 12. – С. 31-34.

10. Эффективность и перспективы замены природного газа пылеугольным топливом в доменных цехах Украины / С.Л. Ярошевский, А.В. Емченко, В.Е. Попов, С.А. Иванов, В.П. Ивлев, **А.В. Кузин** // Металл и литье Украины. – 2010. – № 7. – С.13-20. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ до 50 %*).

11. **Кузин, А.В.** Основы современной комплексной подготовки кокса к доменной плавке // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія. Випуск 12 (177) – Донецьк: ООО «Цифрова типографія», 2010. – С. 82-88.

12. Исследование эффективности применения коксового орешка в доменной плавке / А.В. Емченко, Б.П. Крикунов, С.Л. Ярошевский, Д.В. Горин, А.В. Храпко, **А.В. Кузин** [и др.] // Металл и литье Украины. – 2011. – № 9-10. – С. 25-30. (*выполнено исследование фракционного состава коксового орешка и кокса и их влияние на показатели работы доменной печи*).

13. Технология доменной плавки на окаташах в условиях ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод» / Ю.Ф. Филатов, А.В. Емченко, В.Е. Попов, А.И. Дрейко, С.Л. Ярошевский, **А.В. Кузин** [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – № 2. – С. 9-22. (*проведено исследование качества окатышей и кокса, выполнен расчёт материально-тепловых балансов*).

14. Расчёт и оценка эффективности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива в условиях ПАО «ММК им. Ильича» / В.С. Бойко, С.А. Матвиенков, С.Л. Ярошевский, **А.В. Кузин** [и др.] // Металл и литье Украи-

ны. – 2012. – № 2-3. – С. 7-11. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ 50 %*).

15. Исследование прочностных свойств кокса различных классов крупности / А.В. Емченко, С.А. Медянцев, С.Л. Ярошевский, **А.В. Кузин** // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія. Випуск 14-15 (212). – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – С. 14-19. (*выполнено исследование показателей качества металлургического кокса различных классов крупности*).

16. **Кузин, А.В.** Влияние введения твердого восстановителя в железорудный слой на восстановление оксидов железа // Металл и литье Украины. – 2013. – № 1. – С. 3-9.

17. Ресурсы и эффективность полной и комплексной компенсации при использовании пылеугольного топлива (ПУТ) в доменной плавке / С.Л. Ярошевский, А.А. Минаев, **А.В. Кузин** [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 3. – С. 41-47. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ до 50 %*).

18. **Kuzin, A.V.** On the optimal grain size of skip coke // Metallurgist. – 2013. – Vol. 57. – Issues 5-6. – P. 481-486.

19. Перспективные технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива / С.Л. Ярошевский, **А.В. Кузин**, Н.В. Косолап, И.А. Лукьяненко // Металл и литье Украины. – 2013. – № 11. – С. 29-34. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ до 50 %*).

20. Вариант решения проблемы дефицита углей при массовом внедрении пылеугольной технологии в доменных цехах Украины / С.Л. Ярошевский, **А.В. Кузин**, И.В. Шульга [и др.] // Металл и литье Украины. – 2013. – № 12. – С. 1-4. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ до 50 %*).

21. Мищенко, И.М. Качество кокса и другие важнейшие факторы обеспечения эффективной выплавки чугуна с применением пылеугольного топлива / И.М. Мищенко, **А.В. Кузин** // Бюллетень «Чёрная металлургия». – 2014. – № 5. – С. 26-32. (*обобщен промышленный опыт доменных цехов Украины с вдуванием ПУТ*).

22. **Kuzin, A.V.** Effect of Introducing Different Sizes of Nut Coke Into the Ore Layer on the Degree of Reduction of Iron Oxides // Metallurgist. – 2014. – Vol. 57. – Issues 9-10. – P. 783-791.

23. **Kuzin, A.V.** Effect of coal-dust fuel and compensating measures on blast furnace charge softening zone gas permeability // Metallurgist. – 2019. – January. – Vol. 62. – Issue 9-10. – P. 864-874.

24. **Кузин, А.В.** Опыт подготовки кокса к доменной плавке. Часть 1 / А.В. Кузин, Н.С. Хлапонин // Металлург. – 2019. – № 1. – С. 10-16. (*обобщен мировой опыт подготовки кокса к доменной плавке*).

25. **Кузин, А.В.** Опыт подготовки кокса к доменной плавке. Часть 2 / А.В. Кузин, Н.С. Хлапонин // Металлург. – 2019. – № 2. – С. 12-18. (*обобщен мировой опыт подготовки кокса к доменной плавке*).

26. **Кузин, А.В.** Оценка газопроницаемости зоны когезии в доменной печи /

А.В. Кузин, Н.С. Хлапонин // Сталь. – 2019. – № 3. – С. 6-12. (*выполнено развитие представления о газопроницаемости зоны когезии при введении коксового орешка в желеzорудную часть шихты*).

27. **Кузин, А.В.** Оценка газопроницаемости рудной части шихты при введении в неё коксового орешка / А.В. Кузин, Н.С. Хлапонин // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – № 1. – С. 66-72. (*усовершенствованы представления о газопроницаемости рудной части шихты в «сухой» зоне доменной печи*).

Научные работы в виде монографий

28. Применение в доменной печи пылеугольного топлива, приготовленного из смеси углей с участием буроугольного полуокиса / С.Р. Исламов, С.Л. Ярошевский, **А.В. Кузин**, З.К. Афанасьева – Донецк: УНИТЕХ, 2008. – 68 с. (*выполнены расчёт и оценка эффективности использования ПУТ, приготовленного из буроугольного полуокиса*).

29. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке / В.Г. Гусак, А.М. Кузнецов, А.В. Емченко, В.Е. Попов, **А.В. Кузин** – Киев: Наукова думка, 2011. – 216 с. (*выполнено развитие научных основ подготовки кокса к доменной плавке, разработаны математические модели оценки газопроницаемости в «сухой» зоне и зоне когезии*).

Патенты на полезную модель

30. Патент на корисну модель 38581 України, МПК (2006) C21B 3/00. Спосіб доменної плавки /С.А. Матвієнков, С.Л. Ярошевський, С.М. Доля, В.А. Струтинський, М.В. Косолап, М.П. Пампуха, **А.В. Кузін**; ВАТ «ММК ім. Ілліча». – № и 2008 09566; заявл. 27.07.2008; опубл. 12.01.2009. (*обосновано підвищення якості чугуна при застосуванні ПУТ різного марочного складу*).

31. Патент на корисну модель 58341 України, МПК (2011.01) C21B 5/00. Спосіб завантаження доменної печі /Ю.В. Філатов, О.М. Риженков, А.В. Ємченко, В.Є. Попов, Б.П. Крикунов, О.І. Дрейко, В.В. Бєлих, С.Л. Ярошевський, **А.В. Кузін**; ЗАТ «Донецьксталь» – металургійний завод». – № и 2010 11198; заявл. 20.09.2010; опубл. 11.04.2011. (*обоснован спосіб загрузки в рудну частину шихти коксового орешка та фракції кокса +80 мм*).

32. Патент на корисну модель 88279 України, МПК (2014.01) C21B 5/00. Спосіб завантаження доменної печі / А.В. Ємченко, Б.П. Крикунов, С.Л. Ярошевський, В.Є. Попов, Д.В. Кривицький, В.П. Івлєв, М.С. Хлапонін, В.І. Цуканов, **А.В. Кузін**; ПАТ «Донецьксталь» – металургійний завод». – № и 2013 11208; заявл. 20.09.2013; опубл. 11.03.2014. (*обоснован спосіб загрузки коксового орешка та частини металургійского кокса для інтенсифікації прямого восстановлення оксидів желеzа*).

Научные работы в материалах конференций

33. Ярошевский, С.Л. Основные принципы расчёта и организации технологии плавки при замене дополнительными видами топлив 30-60 % кокса (отечественный и зарубежный опыт) / С.Л. Ярошевский, З.К. Афанасьева,

А.В. Кузин // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды международной научно-практической конференции, 11-13 февраля 2009, г. Екатеринбург (Россия). – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 138-148. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ до 50 %*).

34. **Кузин, А.В.** Современная система подготовки кокса к доменной плавке // Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах: материалы VII международной научно-технической конференции, 7-9 сентября 2010, г. Мариуполь (Украина). – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – С.54-60.

35. Перспективы развития технологии и повышения эффективности выплавки чугуна в доменных печах / С.Л. Ярошевский, И.В. Шульга, Н.С. Хлапонин, **А.В. Кузин** [и др.] // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сборник докладов международной научно-практической конференции, 18-21 сентября 2012, г. Екатеринбург (Россия). – Екатеринбург: УрФУ, 2012 – С. 409-418. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ 50 %*).

36. Перспективные технологические режимы доменной плавки с применением пылеугольного топлива для условий ПАО «Енакиевский металлургический завод» / А.Л. Подкорытов, А.М. Кузнецов, В.П. Падалка, С.Л. Ярошевский, **А.В. Кузин** // Проблемы доменного и смежных производств в современных условиях. Технологии использования различных видов топлива и сырья: VI международный конгресс по агло-коксо-доменному производству, 20-20 мая 2013, г. Ялта, (Украина). – Днепропетровск: [б/и], 2013. – С. 32-45. (*обоснована возможность и рассчитаны технологические режимы для повышения доли замены кокса ПУТ до 50 %*).