

ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

САФЬЯНЦ Сергей Матвеевич

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ
И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СЫРЬЯ
ДЛЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ
ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА

Специальность 05.16.02 "Металлургия черных металлов"

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук*

Донецк - 1994

1750
Работа является рукописью.

Работа выполнена в Донецком государственном техническом университете.

Официальные оппоненты -

Губин Георгий Викторович, академик ИА Украины, докт.техн.наук, проф.;
Ивашенко Валерий Петрович, докт.техн.наук, проф.;
Ярошевский Станислав Львович, академик ИА Украины, докт. техн. наук, проф.

Ведущее предприятие -

Металлургический комбинат "Запорожсталь", г.Запорожье

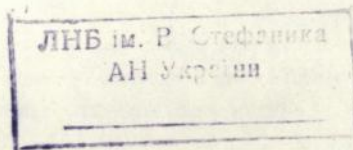
Защита состоится " 23 " июня 1994 г. в 12 час.
на заседании специализированного совета Д 068.20.01 в Донецком государственном техническом университете по адресу:
340000, г.Донецк, ул.Артема,58

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан " 20 " мая 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
докт.техн.наук, профессор

В.С.Сапиро



Донецкий государственный технический университет, 1994

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00777530 (Т)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Необходимость коренного улучшения качества и увеличения выпуска эффективных видов металлопродукции является очевидной. При этом для Украины все более актуальной становится проблема сокращения импорта сырья, в первую очередь, энергоносителей - нефти и природного газа.

Большую роль в решении названных задач могут и должны сыграть процессы прямого получения железа. Главным в этих процессах является отказ от получения чугуна как промежуточного продукта в технологической цепочке руда-сталь. На первой стадии обычно получают предварительно восстановленный материал в виде металлизированных окатышей или брикетов, на второй стадии эти промежуточные материалы используются в качестве шихты в сталеплавильных агрегатах.

Основной предпосылкой производства и применения металлизированного сырья является меньшее насыщение стали примесями цветных металлов, неметаллическими включениями и газами, чем при многостадийных процессах, а также возможность расширения сырьевой базы металлургии за счет некоксуемых углей и других видов твердого топлива.

Среди процессов прямого восстановления железорудного сырья, получивших широкое распространение в мире, ведущую роль играют процессы с использованием газообразного восстановителя, преимущественно осуществляемые в шахтных печах.

Основанием для строительства установок прямого получения железа было наличие природного газа по стоимости не выше металлургического кокса, возможность строить заводы полного цикла небольшой мощности с более низкими капитальными затратами, чем по обычной технологии. Благодаря техническим преимуществам технологии "прямое восстановление-электроплавка", меньшим удельным капитальным затратам и потенциально сопоставимым удельным затратам энергии, к середине 1992 года суммарная мощность имеющихся и строящихся установок по производству металлизированного сырья составил в мировом масштабе более 40 млн. тонн. При этом 90 % мощностей приходится на долю

установок, работающих с использованием газообразного восстановителя, и менее 10 % - на долю установок, работающих на твердом топливе.

По данным Всемирной Конференции, посвященной энергозапасам, мировые запасы угля составляют около $7 \cdot 10^{12}$ т. При современном уровне добычи и потребления этих запасов хватит более чем на 500 лет, но лишь небольшую их часть можно использовать для производства кокса. В то же время примерно к 2020 году большая часть резервов нефти и природного газа будет израсходована. Поэтому все большее значение как носители природной энергии приобретают каменный и бурый угли, в связи с чем значение процессов производства губчатого железа, базирующихся на твердом топливе, несомненно возрастает. Особую роль такие процессы имеют для Украины с ее большими запасами твердого топлива и почти полным отсутствием нефти и газа.

Сложившаяся ситуация нашла свое отражение в Постановлении Митпрома Украины № I/I от 19.01.94, где в числе приоритетных направлений развития отечественной металлургии определены процессы бескоксовой металлургии и другие технологии, обеспечивающие использование энергетических углей взамен кокса и природного газа.

Таким образом, цели и задачи настоящей работы заключались в развитии теории твердофазного восстановления железорудного сырья и разработке на этой основе нового высокоэффективного процесса металлизации; расширении сырьевой базы бескоксовой металлургии и обеспечении возможности использования недефицитных видов твердого топлива, в частности, донецких антрацитов; исследовании особенностей процесса переплавки получаемого продукта и улучшении эксплуатационных характеристик выплавленного металла; определении основных технологических и конструктивных параметров установки для сжигания и газификации твердого топлива в расплаве и разработке схемы производства металлизированного сырья без использования природного газа.

Основной идеей работы являются новые решения по использованию образующихся в процессе металлизации газов для экранирования восстанавливаемых рудоугольных формовок и отопления печи, что позволяет интенсифицировать процесс, снизить расход топлива и повысить качество получаемого продукта.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели в работе использованы: аналитические и экспериментальные методы исследования

восстановительных процессов, базирующиеся на основных положениях теории металлургических процессов; лабораторные, опытно-промышленные и промышленные испытания разработанной технологии и изделий на основе полученного металлизированного сырья; аналитические исследования и математическое моделирование выполнялись с использованием ЭВМ

Основные научные положения, выносимые на звание, в их новизна.

1. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены особенности углетермического восстановления в сравнении с газовым; при этом определены лимитирующие факторы, предложена и доведена до численной реализации методика расчета скорости процесса металлизации, удовлетворительно согласующаяся с данными экспериментов.

2. Впервые подробно исследованы свойства выделяющихся в процессе металлизации восстановительных газов и установлено, что они обладают защитным действием в микроскопическом объеме нагреваемых рудугольных формовок. Кроме того, эти газы оказывают существенное воздействие на состав всей печной атмосферы, увеличивая ее восстановительный потенциал, что позволяет сжигать используемое при отоплении печи топливо полностью, а не с коэффициентом расхода окислителя $\alpha = 0,5-0,6$, как это нужно для обеспечения безокислительного нагрева.

3. Установлены особенности поведения рудугольных смесей при брикетировании, нагреве и металлизации; изучены происходящие при этом структурно-фазовые и физико-химические процессы и подтверждена важность кристаллохимических превращений при их протекании.

4. Разработана математическая модель процесса металлизации, учитывающая взаимное влияние основных технологических параметров и позволяющая прогнозировать качество продукта и основные технико-экономические показатели. Ошибка прогнозирования в условиях опытно-промышленного производства составляла 7-10 %.

5. Доказана целесообразность использования получаемого сырья в сталеплавильных агрегатах и изучены особенности его переработки в сравнении с металлоломом и металлизированными окатышами; найдены решения по повышению сквозных технико-экономических показателей процесса.

6. Обоснована эффективность применения в качестве источника горячих восстановительных газов для процессов бескислородной металлургии агрегата с барботируемым кислородсодержащим газом шлаковым расплавом. Предложена схема энергометаллургического комплекса, вклю-

чащего агрегат газификации твердого топлива в расплаве, установку прямого получения железа и устройства для переработки жидких продуктов процесса (шлака и металла).

Изложенные научные положения определяют теоретические основы и принципы создания технологии прямого получения железа без использования природного газа, обеспечивающей повышение качества готовой продукции, снижение энергоемкости и улучшения экологических характеристик металлургического производства.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением основополагающих теоретических и экспериментальных методов исследований (теории металлургических процессов, теории подобия, моделирования явлений с помощью ЭВМ); соответствием объема данных наблюдений ГОСТ 22782.6-84; удовлетворительной сходимостью результатов теоретических, лабораторных и заводских исследований (расхождение 15-20 %); положительными результатами промышленных испытаний изделий, полученных на основе разработанной технологии.

Практическая ценность. Разработанная технология производства металлизированного сырья включена Институтом Укрگیпромез в проекты перспективного развития заводов им.Петровского и им.Карла Либкнехта в г.Днепропетровске, а также Руставского и Таганрогского металлургических заводов. Годовая прибыль от использования установки мощностью 500 тыс.т/год составляет, по оценке Укрگیпромеза, 13,4 млн.руб. в ценах 1988 г.

Результаты исследований процесса сжигания углей в барботируемом расплаве использованы институтом Укрэнергопроект при проектировании установки производительностью 30 т/ч на Харьковской ТЭЦ "Эсхар", а также при разработке технико-экономического обоснования создания экологически чистой ТЭС на твердом топливе мощностью 2,4 МВт.

Реализация работы в промышленности. На Макеевском металлургическом комбинате построен опытно-промышленный участок, на котором в соответствии с технологической инструкцией ВТИ-231-ст 04-5-86 осуществлялось производство тяжеловесного металлизированного сырья, в период до 1990 г. было произведено более 10 тыс.т продукта.

Из сталей, выплавленных на основе произведенного металлизирован-

ного сырья в 1978-1990 гг. были изготовлены и испытаны следующие изделия:

- на установке сушки концентратов Ингулецкого ГОКа - отдельные узлы и детали печи, срок службы увеличился в 2 раза;
- на предприятиях ПО "Орджоникидзеуголь" - башмаки шахтных клетей и накладки конвейерструга, срок службы увеличился в 2,5-3 раза.
- на шахте Калиновская-Восточная ПО "Советскуголь" - шарошечные долота, средняя проходка возросла в 2,6 раза.

Первичный годовой экономический эффект при использовании этих изделий составил около 100 тыс. руб. в ценах до 1986 г.

Связь темы диссертации с планами основных работ института.

Диссертация является итогом многолетних поисковых и прикладных исследований, выполнявшихся в Донецком политехническом институте в области процессов бескоксовой металлургии.

Научно-исследовательские работы по данной проблеме проводились в рамках Постановлений Совмина УССР № 560 от 28.10.80, № 400 от 21.11.86, программы "Металл" Минчермета СССР и Минвуза СССР (номера госрегистрации 79032329, 01850060784, 01860011004, 01860069655). В выполнявшихся исследованиях автор принимал непосредственное участие с 1976 г. в качестве ответственного исполнителя, а с 1986 г. - в качестве руководителя.

Апробация работы. Материалы работы докладывались на: Всесоюзной научно-технической конференции "Современные проблемы повышения качества металла" (г.Донецк, 1978 г.), Всесоюзной конференции "Проблемы порошковой металлургии" (г.Ленинград, 1982 г.), Всесоюзной конференции по проблемам прямого получения железа (г.Москва, 1983), Всесоюзной конференции "Основные направления повышения качества сталей с использованием методов бескоксовой металлургии" (г.Челябинск, 1985 г.), на Симпозиуме по кинетике, термодинамике и механизму процессов восстановления (г.Москва, 1986 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Физико-химия процессов восстановления металлов" (г.Днепропетровск, 1988 г.), на Международном симпозиуме по прямому восстановлению (г.Мисурата, Ливия, 1990 г.), на научно-техническом семинаре "Фундаментальные основы экологически чистых технологий" (г.Донецк, 1991 г.), на заседаниях НТС Минчермета СССР и Минчермета УССР, на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Донецкого политехнического

института (1979-1991 гг.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано более 40 научных работ и получено 10 авторских свидетельств на изобретения. Список основных из них приведен в автореферате.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов и заключения (общих выводов); содержит 207 страниц машинописного текста, 80 рисунков, 45 таблиц, 7 приложений. В список использованных источников входит 228 наименований. Общий объем работы 331 стр.

Автор благодарен сотрудникам кафедр "Металлургия чугуна" и "Промышленная теплоэнергетика" за помощь в проведении экспериментальной части исследований, работникам Макеевского и Ново-Липецкого металлургических комбинатов, Донецкого металлургического завода, Научно-исследовательского института теплоэнергетики, Донецкой геолого-разведочной экспедиции, Енакиевского ремонтно-механического завода, производственных объединений "Харьковэнерго", "Донецкуголь" и "Орджоникидзеуголь" - за помощь при проведении работ и испытаний в промышленных условиях.

Особую признательность автор выражает чл.- корр. ИА Украины, д.т.н., профессору, А.И.Иванову за полезные советы и критические замечания на всех этапах выполнения работы, а также академику Международной академии, профессору, д.т.н. М.П.Зборишису за консультативную помощь, оказанную в период завершения работы над диссертацией и подготовки к защите.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В развитие теории восстановления большой вклад внесли своими работами многие отечественные и зарубежные ученые, прежде всего Андронов В.Н., Архаров В.И., Бабарыкин И.Н., Байков А.А., Бялый Л.А., Вегман Е.Ф., Воловик Г.А., Воскобойников В.Г., Гельд П.В., Гиммельфарб А.А., Готлиб В.Д., Гольдштейн Н.Л., Губин Г.В., Есин О.А., Иванов А.М., Иващенко В.П., Ковалев Д.А., Куликов И.С., Логинов В.И., Любан А.И., Манчинский В.Г., Некрасов Э.И., Павлов М.А., Похвиснев А.Н., Пыриков А.Н., Рамм Н.Н., Роменец В.А., Ростовцев С.Г., Рыжонков Д.И., Сорокин В.А., Стефанович М.А., Тарасов В.П., Тлеугабулов С.М., Фяялков Б.С., Чуфаров Г.И., Шаврин С.В., Шкодин К.К., Юфин Ю.С., Ярошевский С.Л., Г.Шенк, Л.Богданди, Г.Энгель и др.

Основные работы этих и других авторов связаны с производством агломерата и выплавкой чугуна в доменных печах, а теоретические основы и многие прикладные проблемы существующих процессов бескоксовой металлургии разработаны недостаточно. Между тем современная ситуация в области получения металла повышенного качества, а также напряженная экологическая ситуация и проблемы с энергоносителями ставят целый ряд новых вопросов. Попытка ответить на некоторые из них предпринята автором в данной работе.

Первая глава посвящена анализу ситуации в бескоксовой металлургии в стране и за ее пределами, а также теоретическому обоснованию разрабатываемой технологии.

В 1989-1992 гг. в мире отмечалось повышение спроса на металлургическое сырье. Его производство в 1991 г. превысило 19,4 млн. т при общей мощности имеющихся и строящихся установок более 40 млн. т.

Основанием для строительства установок прямого получения было наличие природного газа по стоимости не выше металлургического кокса, возможность строить заводы полного цикла небольшой мощности с более низкими капитальными затратами, чем по обычной схеме, относительная простота процессов на природном газе. Однако вследствие кризисной ситуации с энергоресурсами действующие мощности по производству металлургического сырья используются лишь наполовину. Основная причина остановок действующих промышленных установок - рост цен на природный газ и, как следствие этого, невозможность для губчатого железа конкурировать со скрапом. К концу восьмидесятых годов цены на газ, например, в США, составили около 6 долл./ТДж, в то время как на уголь - 2 долл./ТДж.

В то же время на долю установок, работающих на твердом топливе, приходится всего около 10 % от их общего числа.

Одним из наиболее перспективных способов прямого получения железа с использованием угля являются так называемые процессы в жидкой ванне, например, технология Московского института стали и сплавов. Однако, оценка преимуществ и недостатков технологий с получением жидкого металла не входила в нашу задачу и мы ограничимся рассмотрением процессов получения губчатого железа в твердом виде.

Наиболее широкое распространение для производства металлургического сырья с использованием твердого восстановителя получили

вращающиеся печи. Основные недостатки процессов во вращающихся печах — сложность и высокая стоимость используемого оборудования, малая производительность и связанные с этим высокие эксплуатационные расходы, затруднения, связанные с систематическим образованием настилей и необходимостью их удаления, большой вынос пыли.

В проходных печах и ретортах получают губчатое железо, используемое главным образом в порошковой металлургии. Наибольшее промышленное развитие получили процессы Хоганса и Эчеверриа. Этим процессам свойственны малая единичная мощность восстановительных агрегатов, низкая эффективность, определяющаяся наружным обогревом реторты, недостаточное использование выделяющихся летучих веществ. Высокая себестоимость получаемого сырья затрудняет его применение в сталеплавильных агрегатах.

В связи с вышеизложенным поставлена цель и сформулированы задачи настоящей работы, основные из которых заключаются в теоретическом обосновании и разработке новой технологии прямого получения железа из концентратов железных руд без использования природного газа; исследовании особенностей процесса переплава получаемого сырья и повышении качества изделий, выплаиваемых на его основе, снижении вредного воздействия металлургического производства на окружающую среду.

Для рассмотрения равновесных условий протекания основных реакций и учета тепла, которое необходимо подводить в зону реакции для ее реализации при данных условиях, составлялись и графически отображались на рисунках температурные зависимости полноты протекания и энтальпии реакций, записанных в виде

$$\sum_{i=1}^{n_1} x_i \cdot A_i = \sum_{j=1}^{n_2} y_j \cdot B_j \quad (1)$$

где A, B — исходные вещества и продукты реакции соответственно; x, y — стехиометрические коэффициенты.

Зависимость энтальпии реакции от температуры

$$H(T) = \alpha \cdot \Delta H_0 + (1-\alpha) \cdot \sum_{i=1}^{n_1} x_i \cdot \int_{T_0}^T C_{p_i} dT - \alpha \cdot \sum_{j=1}^{n_2} y_j \cdot \int_{T_0}^T C_{p_j} dT, \quad (2)$$

где α — полнота протекания реакции, т.е. доля исходных веществ,

претерпевших превращение;

ΔH_O - тепловой эффект реакции при $T = 293$ К и $P = 101,3$ кПа;

$C_{P_{i,j}}$ - теплоемкость соответствующих компонентов;

Зависимость теплоемкостей веществ от температуры в общем случае задавалась при помощи четырех коэффициентов:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (3)$$

После интегрирования зависимость энтальпии реакции от температуры принимает вид:

$$\begin{aligned} H(T) = & \alpha \cdot \Delta H_O + (1-\alpha)(T-300) \cdot \sum_{i=1}^{n_1} x_i \left[a_i + \frac{b_i}{2}(T+300) + \right. \\ & \left. + \frac{c_i}{3}(T^2+300T+300^2) + \frac{d_i}{300T} \right] - \alpha(T-300) \cdot \sum_{j=1}^{n_2} y_j \cdot \left[a_j + \right. \\ & \left. + \frac{b_j}{2}(T+300) + \frac{c_j}{3}(T^2+300T+300^2) + \frac{d_j}{300T} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

Полученные зависимости позволяли прогнозировать полноту протекания реакций и их тепловые эффекты, а следовательно, и энергетические затраты при исследовании процессов восстановления и разработке технологии получения металлизированного сырья.

При оценке кинетики процесса нами определялись параметры, лимитирующие процесс углетермического восстановления. Скорость химически лимитируемой реакции для сферической частицы описывается уравнением

$$\theta_1 = \frac{4 \cdot K_F}{R \cdot t_G} \left\{ [P_1]_G - [P_{11}]_G / K_{eq} \right\} \quad (5)$$

где θ - скорость реакции по прореагировавшей твердой массе на единицу поверхности;

K_F - константа скорости химической реакции (прямой);

R - газовая постоянная в механических единицах;

t_G - температура газа, идущего через печь;

P_1, P_{11} - парциальные давления реагирующего газа и продуктов реакции;

K_{eq} - константа равновесия.

В случае, если скорость реакции лимитируется массопередачей,

$$\theta_2 = \frac{K_{eq} [P_1]_G - [P_{11}]_G}{R \cdot t_G \cdot b \cdot (1 + K_{eq}) \left(\frac{1}{\Gamma^*} - 1 + \frac{D_{11}}{\alpha_{11} \Gamma_0} \right)} \quad (6)$$

где D_{11} - коэффициент диффузии;

b - стехиометрический фактор;

α_{11} - коэффициент массопередачи от поверхности реагирующего компакта;

Γ_0 - радиус исходной частицы;

Γ - радиус реакционной сферы;

$\Gamma^* = \frac{\Gamma}{\Gamma_0}$ - безразмерный радиус частицы реагирующего вещества.

Скорость реакции, лимитируемой тепло- и массообменом

$$\theta = \frac{4 \cdot \pi \cdot \Gamma_0 \left\{ [P_{11}]_{eq} - [P_{11}]_G \right\}}{R \cdot t_G \cdot b \cdot K_{eq} \left\{ \frac{1}{\Gamma^*} - 1 + \frac{\Gamma}{\Gamma_0 \cdot \Lambda \cdot K_{eq} \cdot b} \right\}} \quad (7)$$

где Γ - массообменный параметр,

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{D_{11}} + \frac{[P_{11}]_{eq} \cdot Q^2}{R \cdot R' \cdot t_G^3 \cdot \lambda \cdot K_{eq} \cdot b \cdot \pi} \quad (8)$$

Λ - теплообменный,

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\alpha_{11}} + \frac{[P_{11}]_{eq} \cdot Q^2}{R \cdot R' \cdot t_G^3 \cdot k} \quad (9)$$

Здесь Q - тепловой эффект реакции восстановления;

R' - газовая постоянная в тепловых единицах;

λ - коэффициент теплопроводности;

k - коэффициент теплопередачи.

В ходе экспериментальных исследований скорости процесса восстанавливали образцы диаметром и высотой 100 мм, состоящие из 84 % Лебединского концентрата, 14,5 % пекококса и 1,5 % бентонита при температуре 1100 °С. Время полного восстановления брикетов соста-

вило 8 ч, средний диаметр частицы, по данным металлографических исследований - 0,05 мм. Скорость восстановления такой частицы была равна $4,1 \cdot 10^{-8}$ г/с.

По результатам расчетов $\theta_1 = 7,9 \cdot 10^{-6}$ г/с; $\theta_2 = 3,87 \cdot 10^{-7}$ г/с; $\theta_3 = 4,8 \cdot 10^{-8}$ г/с. Удовлетворительная сходимость опытных данных и результатов расчетов по уравнению (7) позволяет сделать вывод, что процесс твердофазного восстановления рудугольных брикетов лимитируется главным образом внутренней и внешней тепло- и массопередачей. Поэтому при разработке технологии особое внимание мы уделяли вопросам тепло- и массопередачи.

Во второй главе приводятся результаты экспериментальных исследований процесса получения металлизированного сырья путем твердофазного восстановления.

При опытной отработке технологии в качестве железорудного материала использовался концентрат Лебединского ГОКа, содержащий 68,7 % железа и 3,55 % кремнезема. Для получения плотных и прочных формовок используются связующие вещества.

Из большого количества исследованных органических и неорганических связующих наиболее целесообразным признано использование бентонитовых глин. Нами установлено, что 1-1,5 % бентонита достаточно для получения рудугольных формовок удовлетворительной прочности. При восстановлении заготовок с бентонитом происходит их значительная усадка и увеличивается плотность. Предпочтительнее использование щелочных бентонитов, в частности, Саригскихского, обладающих большей набухаемостью. Они же способствуют ускорению процесса восстановления. Предположительно это объясняется наличием в их составе большого количества ионов K^+ и Na^+ , снижающих температуру размягчения рудных концентратов и тем самым облегчающих протекание диффузионных процессов.

Была исследована восстановительная способность ряда углеродистых материалов: донецких углей марок Г, ОС, А; кузнецких марок К и Т; угля марки ОС Нарынтинского месторождения. Дериватографические исследования процесса горения этих топлив показали, что наибольшей реакционной способностью обладают угли марок Г и К.

Для оценки влияния реакционной способности углей на процесс металлизации и качество получаемого продукта брикеты, состоящие из

15 % угля, 1 % бентонита и 84 % железорудного концентрата восстанавливали при температуре 1100 °С в закрытых тиглях. Анализ полученных результатов показал, что применение различных типов восстановителя изменяет степень металлизации брикетов не более чем на 8 % отн., причем чем выше степень металлизации, тем меньше эта разность. На наш взгляд, это объясняется тем, что большое количество летучих, содержащихся в углях марки Г и К, выделяется при относительно низких температурах и в реакциях восстановления оксидов железа участия не принимает.

Одним из главных недостатков углетермического восстановления является присутствие в углях пустой породы и серы, которые в значительной степени усваиваются готовым продуктом, снижая его качество. Учитывая это, а также то, что значительных различий в степени металлизации при использовании различных восстановителей не наблюдается, мы считаем предпочтительным применение в процессе получения металлизированного сырья донецких антрацитов и слабоспекающихся российских углей.

Одним из наиболее ответственных моментов получения металлизированного сырья является формование заготовок. При формовании закладываются условия для получения прочных и плотных заготовок. Дефекты прессования неизбежно выявляются при восстановлении, усугубляются и нередко приводят к частичному или полному разрушению заготовок.

Из исследованных прессов наиболее целесообразным для опытно-промышленного производства нами признано использование мундштучных шнековых прессов, позволяющих организовать непрерывное производство заготовок различных видов поперечного сечения и размеров. При этом с помощью комплекта сменных носков легко переходить с одного вида изготавливаемых заготовок на другой.

Изучение процесса спекания и структурообразования рудоугольных формовок позволило установить следующее. Восстановленные образцы у периферии более плотны, чем в центре (в заготовках со средней плотностью 3620 кг/м³ площадь пор составляет на периферии $3 \cdot 10^{-3}$, а в центре - $6 \cdot 10^{-2}$ мм²). Это объясняется более низкой температурой в центре образца из-за относительно невысокой тепло- и температуропроводности шихты и эндотермичности процесса углетермического восстановления.

Металлическая фаза исследуемых образцов представляет собой феррит. Неодинаковая плотность по сечению заготовки вызывает и неоднородность структурно-фазового состава. Так, на некоторых участках периферии образцов встречаются крупнокристаллические выделения железисто-силикатной фазы. Методом спектроскопии получена их электронограмма и определен тип вещества — $2 \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (фаялит).

Тот факт, что увеличение плотности заготовок, т.е. улучшение контакта между частицами оксидов железа, кварца, углерода, составляющими спрессованную заготовку, приводит к образованию фаялита, показывает важность кристаллохимических превращений в процессе восстановления оксидов железа углеродом.

Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что после завершения перестройки в ходе восстановления решетки магнетита в решетку вистита ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe} \rightarrow 4 \text{FeO}$) дальнейшее образование на наружной поверхности частицы ионов металла повышает концентрацию Fe во всем слое FeO за счет заполнения вакансий в решетке последнего. Параметр решетки вистита начинает возрастать и достигает наибольшего возможного значения, когда концентрация ионов железа выравнивается во всем слое. Минимальное и максимальное значения параметра решетки вистита составляют соответственно 0,42708 и 0,42984 нм. При дальнейшем восстановлении параметр решетки FeO не изменяется. Параметр решетки магнетита остается постоянным в ходе всего процесса.

При твердофазном восстановлении необходимо создать условия нагрева, при которых исключается вторичное окисление. В некоторых случаях (процесс Хоганеса) для защиты от печной атмосферы прибегают к герметизации восстанавливаемой смеси в специальных капсулах. Однако этот прием приводит к значительному увеличению времени восстановления, ухудшению показателей работы печи и удорожанию продукции.

С целью интенсификации процесса предлагается проводить восстановление заготовок в печи без защитных капсул. При этом природный газ, используемый для отопления печи, следует сжигать таким образом, чтобы обеспечить безокислительный нагрев. Для проведения исследований была создана установка, состоящая из кинетической горелки специальной конструкции, с помощью которой создавалась необходимая печная атмосфера, и трубчатой нагревательной печи, в которую помещалась исследуемая проба. Установка оборудована устрой-

ствами для непрерывного автоматического контроля температуры, веса образца и состава газовой фазы.

Проведенные расчеты и эксперименты показали, что обычно для обеспечения безокислительного нагрева следует сжигать природный газ с коэффициентом расхода воздуха $\alpha = 0,5-0,55$. Однако при углетермическом восстановлении выделяющийся из заготовок оксид углерода оказывает окисляющее действие; поэтому атмосфера вокруг заготовки может быть окислительной по отношению к железу. С целью выявления допустимой степени окисленности восстанавливались образцы $\phi 15$ мм (85 % концентрата, 14 % пекококса, 1 % бентонита) при температуре 1100°C в атмосфере продуктов горения природного газа, сжигаемого с различными коэффициентами расхода воздуха.

По результатам исследований (рис.1) можно сделать следующий вывод: коэффициент расхода воздуха может быть равным 0,8 до степени металлизации 30 %, 0,7 - до 60 %, а затем атмосферу желательно

**Изменение степени металлизации рудугольных формовок
в атмосфере продуктов неполного горения природного газа**

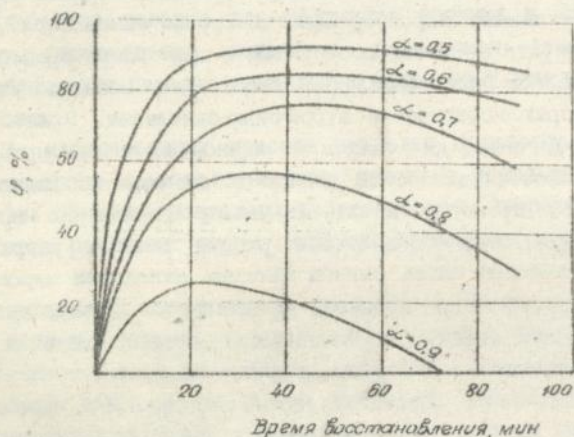


Рис.1

иметь безомслительную, т.е. $\alpha \leq 0,5$.

Для теплового расчета печи важно также знать теплофизические свойства рудугольных заготовок, и, прежде всего, коэффициент теплопроводности. Этот показатель для невосстановленной формовки определен методом неограниченного плоского слоя в стационарных условиях и составляет $0,447 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Задача определения коэффициента теплопроводности заготовок в процессе нагрева и восстановления решалась методом нестационарной теплопроводности. С целью получения данных для решения задачи в промежуточном слое и на поверхности сырой формовки $\phi 100 \text{ мм}$ заделывались три термопары, которые позволяли проводить непрерывное измерение температур.

Обработка полученных результатов (рис.2) позволила установить, что в интервале температур $970-1150 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит кажущаяся сниже-

Зависимость коэффициента теплопроводности
рудугольных формовок от температуры

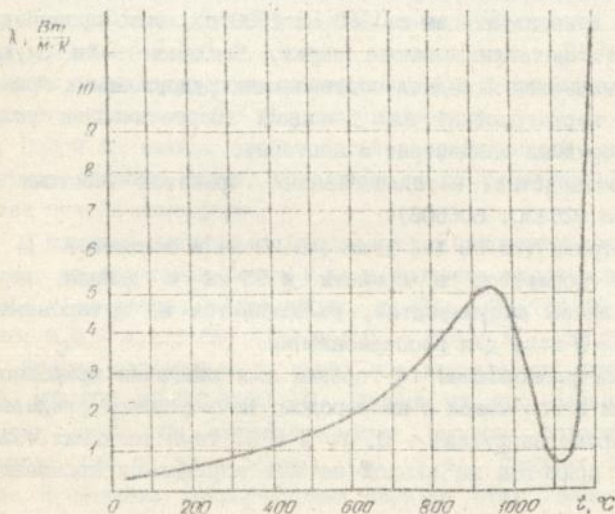


Рис.2

ние коэффициента теплопроводности, связанное с развитием при этих температурах эндотермических реакций прямого восстановления. Для ускорения процесса металлизации именно в этом температурном интервале необходимо обеспечить наиболее интенсивный подвод теплоты.

Полученные в результате теоретических и экспериментальных исследований данные легли в основу создания участка по производству металлизированного сырья.

Третья глава посвящена результатам опытно-промышленной отработки технологии.

По нашему проекту и в соответствии с решениями Минчермета СССР и Совмина СССР на Макеевском металлургическом комбинате был построен опытно-промышленный участок для отработки промышленной технологии.

Участок, включающий отделение восстановления, оборудованное целевой печью (в.о. № I777352) с размерами рабочего пространства 20250 × 1310 × 480 мм и отделение подготовки и сушки формовок. Участок находился в эксплуатации с 1983 по 1990 г., было произведено более 10 тыс. т металлизированного сырья. Топливом печи служит природный газ. В качестве исходных составляющих рудоугольных брикетов используются нерингринский или донецкий энергетические угли, лебединский железорудный концентрат и бентонит.

Процесс производства металлизированных брикетов состоит в следующем (в.о. № 525330, 606506).

Смесь концентрата (78-80 %), угля (18-20 %) и бентонита (1 %) в шнековом прессе формуется в брикеты \varnothing 90 мм и длиной около 250 мм, которые затем высушиваются, укладываются на футерованные тележки и подаются в печь для восстановления.

По длине печи расположены 14 горелок для сжигания природного газа в воздухе или в его смеси с кислородом. Печь условно разделена на 4 зоны (со стороны загрузки) - 0, 1, 2 и 3. Темп толкания тележек и количество брикетов на каждой из них определяют производительность печи.

Готовый продукт представляет собой цилиндры с насыпной массой около $1,6 \text{ т/м}^3$, диаметром 60-65 мм и длиной 200-230 мм. В процессе восстановления заготовки могут растрескиваться и иногда разделяются на несколько частей (2-3).

Охлаждение металлизированных брикетов происходит на воздухе.

За период 1983-1986 гг. была проверена работа печи и оборудования (либеров, тележек, рекуператоров, горелок и др.), в также определены технологические параметры процессов сушки и восстановления (температурный профиль по длине печи, содержание восстановителя в газовой фазе, время пребывания брикетов в печи и др.).

В то же время осуществлялся ремонт и модернизация установки.

Была изменена конфигурация рабочего пространства печи (понижен свод), что позволило интенсифицировать массотеплообменные процессы; спроектировано и построено сушило для сырых брикетов; выполнен подвод кислорода к печи и основна работа горелок с неполным сжиганием природного газа. Основные показатели работы установки приведены в табл. I.

Анализ теплового баланса позволил установить, что около 48 % всего расходуемого тепла теряется с отходящими газами, в также с загрузочными тележками. Проведенные расчеты показали, что при организации промышленного производства эти потери могут быть сокращены не менее чем на 30 %, что позволит снизить расход энергии на производство 1 т металлizedованного сырья ориентировочно до 13 ГДж.

Средний химсостав металлizedованных брикетов: $Fe_{\text{общ.}} = 87 \%$, $Fe_{\text{мет.}} = 79 \%$, $C = 1,1 \%$, степень металлizationи - 89 %, пустая порода - 8,3 %. Количество серы составляло 0,03 % при использовании перьян-гринского угля и до 0,1 % - донецкого угля.

Одной из важных особенностей разработанного процесса является заметное влияние газов, выделяющихся из рудоугольных формовок, на состав печной атмосферы.

С помощью специально поставленных экспериментов было определено, что из заготовки весом 1 кг в процессе восстановления выделяется 464,91 л газов, в том числе, л: $CO_2 - 74,75$; $CO - 210,92$; $H_2 - 59,40$; $H_2O - 4,92$; $CH_4 - 18,95$; $O_2 - 8,39$; $N_2 - 58,7$; $C_mH_n - 28,88$.

Кривая газовыделения имеет два характерных пика: при температуре 400-600 и 950-1150 °C. Первый из них связан с выделением летучих угля. Он характеризуется высоким содержанием в газах водорода (до 52 %) и метана (до 15 %). Следует отметить, что в связи с низкими температурами наличие этих газов не приводит к активному восстановлению железа.

Для второго пика, когда выделяется более 80 % всего количества газов, характерно повышенное содержание CO, которое может состав-

Таблица I

Основные показатели работы опытно-промышленной
установки производств металлизированного сырья

Наименование показателей	Единица измерения	Значение
Температура в рабочей зоне печи	°C	1130
Расход природного газа	м ³ /т	280
Расход угля	кг/т	200
Расход кислорода	м ³ /т	90
Температура горячего воздуха	°C	185
Температура дыма на выходе из камеры дожигания	°C	970
Температура дыма на выходе из рекуператора	°C	330
Производительность установки	кг/ч	570
Общий расход тепла	ГДж/т	16,8
Тепловой к.п.д. процесса	%	41,3
Состав газа в рабочей зоне:	%	
CO ₂		6,5
CO		14,0
H ₂		21,0
Содержание вредных веществ в отходящих газах:		
NO _x	мг/л	0,017
SO ₂	мг/л	0,035
CO	%	0,60
запыленность	г/м ³	0,23

лять до 90 %. Именно в этот период получают наибольшее развитие и завершаются восстановительные процессы.

При максимальной производительности печи из заготовок выделяется около 260 м³/ч газов, что составляет от 18 до 30 % дыма, образующегося при сжигании природного газа (в зависимости от коэффициента расхода воздуха α). Этот газ существенно снижает окислительный потенциал печной атмосферы и даже при полном сжигании топлива в печи позволяет получать до 10 % (CO + H₂). Это, в свою очередь, позволяет более эффективно сжигать природный газ, повысить теплотехнический к.п.д. агрегата и его технико-экономические показатели.

Для математического описания технологии избрано детерминированное направление. Такой подход предполагает получение математической модели аналитическим методом, основанном на изучении закономерностей процесса и составлении системы уравнений кинетики и термодинамики.

Целью моделирования являлось получение зависимостей между основными технологическими параметрами процесса, что, в свою очередь, позволило бы организовать производство металлизированного сырья в оптимальном режиме, прогнозировать и регулировать качество получаемого продукта и технико-экономические показатели процесса. К основным параметрам, определяющим характер процесса, следует отнести диаметр заготовок, желательную степень металлизации, время восстановления и производительность установки, состав печной атмосферы, температуру и др.

Примером полученных зависимостей может служить выражение для определения оптимального диаметра заготовок

$$d = -252,8 + 0,599 \cdot t - 1,934 \cdot \varphi + 24,485 \cdot \tau_{\min} + \\ + 0,0012 \cdot t \cdot \varphi + 0,0334 \cdot \varphi \cdot \tau_{\min} - 0,00026 \cdot t^2 - \\ - 0,0052 \cdot \varphi^2 - 5,898 \cdot \tau_{\min}^2, \text{ мм} \quad (10)$$

где под τ_{\min} понимается время, минимально необходимое для восстановления заготовки диаметра d при температуре t до заданной степени металлизации φ .

Производительность опытно-промышленного участка можно определить по формуле

$$P = \frac{20 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \gamma \cdot l \cdot n}{4 \cdot \tau} = \frac{5 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \gamma \cdot l \cdot n}{\tau}, \quad (11)$$

где γ — плотность металлизированных заготовок;

20 — число тележек в печи;

n — число заготовок на одной тележке;

l — длина заготовки.

На рис.3 представлены полученные аналитическим путем зависимости некоторых параметров процесса (коэффициент расхода воздуха от производительности, производительность от диаметра заготовок и диаметр от температуры), позволяющие организовать процесс металлизации в заданном режиме. Расхождение между расчетными и опытными данными не превышало 7-10 %, что позволяет сделать вывод о достоверности разработанной модели.

Использование полученных результатов позволило организовать производство металлизированного продукта нового типа, превосходящего по качеству металлизированные окатыши и другие подобные материалы. Производимые брикеты не пирофорны, практически не подвержены вторичному окислению, не требуют дополнительных затрат на охлаждение и хранение, что является несомненным достоинством процесса. Плотность получаемого по нашей технологии продукта на 30-50 % выше, чем у окатышей, поэтому облегчается его использование в сталеплавильных агрегатах. В производимом продукте можно получить любое заранее заданное содержание углерода (от 0,1 до 6 %); возможно совместное восстановление оксидов железа и различных легирующих, т.е. производство моношихты для выплавки сталей (а.с. № 610388, 739019).

По результатам опытно-промышленных исследований нами было разработано технологическое задание, на основании которого Укр-гипромет выполнили экономическую оценку целесообразности создания промышленного агрегата получения тяжеловесного металлизированного сырья.

Было установлено, что производство и применение такого продукта эффективно, особенно на металлургических предприятиях с объемом производства 1-3 млн.т стали в год.

Расчетные характеристики агрегата мощностью 500 тыс.т металлизированного сырья в год следующие (в ценах 1988 г.): капитальные затраты 21,0 млн.руб., в том числе по основному производству — 17,0

Взаимные зависимости технологических параметров процесса металлизации

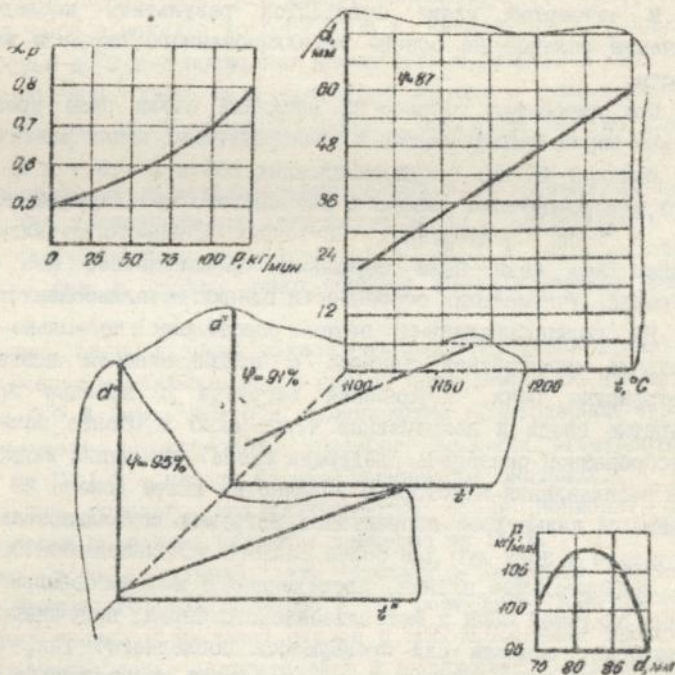


Рис. 3

млн.руб.; годовая прибыль 13,4 млн.руб., срок окупаемости капитальных вложений - 1,7 года.

По результатам выполненной работы разработанная нами технология включена в планы перспективного развития заводов имени Петровского и Карла Либкнехта в г.Днепропетровске, а также Руставского и Таганрогского металлургических заводов.

В четвертой главе приводятся результаты исследований по получению сплавов на основе металлизированного сырья и изучению их свойств.

При отработке технологии выплавки стали было проведено несколько серий экспериментов в электродуговых печах различной мощности: опытной 40 кг, полупромышленных 500 кг, 1,5 т и 3 т Енакиевского рудоремонтного завода и Макеевского металлургического комбината, а также промышленных 100-тонных Донецкого металлургического завода. Все печи были серийного производства, без каких-либо изменений, учитывающих особенности плавки металлизированного сырья.

На полупромышленных печах опробованы несколько вариантов загрузки: однократная завалка с использованием всего рабочего пространства печи, порционная загрузка с помощью лотка через отверстие свода и непрерывная через окно в стенке печи. Наиболее целесообразной оказалась следующая схема: получение жидкой ванны за счет расплавления некоторого количества шихты (около 25 % от массы плавки) и дальнейшая непрерывная загрузка металлизированного сырья, желательна в зону дуг для более полного использования их энергии.

Сравнительные плавки, проведенные с использованием металлизированных окатышей ОЭМК и металлизированного сырья, полученного по нашей технологии, выявили ряд преимуществ последнего. Так, отсутствуют выбросы металла и шлака. Плавка окатышей происходит в основном в шлаке или на границе шлак-металл, а более плотные заготовки частично погружаются в металлическую ванну, поэтому процесс плавления протекает более интенсивно. Это сокращает время процесса и снижает угар металла. Вредные примеси, содержащиеся в пустой породе и перешедшие в шлак, не успевают (при правильной организации скачивания шлака) переходить в большом количестве в металл и образовывать прочные соединения с его компонентами. Например, коэффициент распределения фосфора между металлом и шлаком при плавке металлизированного сырья изменялся в пределах от 2 до 40 при изменении основности

шлака от 1,2 до 2,4 (для металлизированных окатышей от 1 до 25 при том же содержании FeO в шлаке).

Особенностью получаемого продукта является повышенное содержание в нем серы, которое в случае применения в качестве восстановителя донецких углей может достигать 0,10-0,12 %. При плавке такого сырья было установлено, что большое количество первичного шлака, характерное для переплавки любых продуктов прямого получения железа, позволяет, несмотря на его низкую основность (1,0-1,2), снизить содержание серы в металле до 0,04-0,06 %. Наведенный вторичный шлак с основностью до 2,5-3 позволяет достигнуть 0,02-0,03 % [9].

В печах ДСП-100НЗА были проведены плавки с использованием в шихте от 12 до 40 % металлизированного сырья на основе донецких углей.

Добавка до 20 % металлизированного сырья не отражается на ходе процесса. При увеличении его количества до 40 % длительность плавки и расход электроэнергии возрастают на 10-25 % и являются примерно такими же, как в случае использования металлизированных окатышей ОЭМК.

Свои энергозатраты технологического процесса производства стали на основе металлизированного сырья, получаемого по нашей технологии, на 6,9 % ниже, чем при производстве конвертерной стали, на 22 % превышают энергозатраты процесса выплавки электростали на скрапе и на 12,1 % - плавки на металлизированных окатышах.

Загрузка горячего металлизированного сырья позволит снизить расход энергии по нашему варианту примерно на 15 %.

Кроме того, учитывая, что стоимость единицы теплоты при сжигании природного газа примерно в три раза выше, чем при сжигании угля, можно признать выплавку сталей с использованием тяжеловесного металлизированного сырья энергетически и экономически целесообразной.

Далее в главе приводятся результаты исследования качества опытных сталей.

Задачей исследований являлось сравнение свойств сталей и изделий из них, полученных на основе металлизированного сырья (опытные) и на основе обычной шихты (базовые).

Параллельно с исследованиями влияния металлизированного сырья на свойства выплавляемого из него металла решалась задача увеличения долговечности и надежности изделий горношахтного оборудования,

представляющая значительный интерес для многих предприятий Донбасса. С целью прогнозирования основных служебных свойств изделий была выявлена зависимость ударной вязкости, износостойкости и показателей, определяемых при испытании образцов на растяжение, а именно: предела прочности (σ_B), предела текучести (σ_T), относительного удлинения (δ), относительного сужения (ψ). Эти зависимости таковы:

- для ударной вязкости

$$\hat{y}_1 = -9398,5 - 1,278\sigma_B + 27,534\sigma_T + 81,029\psi - 0,0197\sigma_T^2 - 0,941\psi^2, \quad (12)$$

- для износостойкости

$$\hat{y}_2 = 148,53 + 0,349\sigma_B - 0,0002\sigma_T^2 + 0,0004\psi^2. \quad (13)$$

Полученные данные позволяют при меньших затратах времени и материалов определять требуемые заказчиком характеристики.

Металл выплавляли в 500 кг электропечи. Химический состав сталей из металлолома (базовая) и на основе металлизированного сырья (опытная № 1 и 2) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав сталей

Тип стали	Содержание элементов, % мас						
	C	Si	Mn	S	P	Cr	V
Базовая	0,30	1,01	1,00	0,026	0,022	0,51	0,080
Опытная № 1	0,33	0,81	0,81	0,020	0,028	0,57	0,078
Опытная № 2	0,29	0,73	0,66	0,020	0,021	0,59	0,100

Из полученных сталей были отлиты направляющие башмаки шахтных подъемников.

Образцы для механических испытаний вырезали из пробных брусков, а для определения ударной вязкости - непосредственно из тела башмака.

Результаты испытаний представлены в таблице 3 (вид термической

Таблица 3. 3.

Механические свойства сталей

Сталь	$\sigma_{в}$, Мпа	$\sigma_{т}$, Мпа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²	НВ
Базовая	600	550	10	23	375	260
Опытная № 1	780	710	11	26	405	285
Опытная № 2	790	680	10	24	408	310

обработки образцов - закалка с высоким отпуском).

Проведены сравнительные исследования тонкой структуры опытного и заводского металла на рентгеновском аппарате ДРОН-3. Установлено, что размеры блоков мозаики сталей, выплавленных на основе МС, значительно больше, а плотность дислокаций меньше, чем у сталей, выплавленных на ломе, что ведет к увеличению пластичности опытной стали.

Опытно-промышленные испытания партии башмаков проводили в течение 8 месяцев. В среднем срок службы башмаков, изготовленных из стали на основе металлizedованного сырья, в 2,5-3 раза выше, чем у базовых.

Из этих же сталей были изготовлены и испытаны накладки балок конвейероструга 1АНЦ. Накладки в количестве 84 штук после термической обработки были приварены к балкам АШМ электродами 42А-УОНИ-13/45. Повышение стойкости металла шва и околосварной зоны обеспечивалось замедленным охлаждением сварного соединения. Местный послесварочный подогрев до 100-200 °С в течение 1 часа проводили на поверхности шва газовой горелкой.

Промышленные сравнительные испытания партии балок с накладками из опытных и базовых сталей были проведены на одной из шахт производственного объединения "Орджоникидзеуголь".

Проведенные испытания показали, что использование накладок из стали на основе металлizedованного сырья позволяет увеличить срок службы балок ориентировочно на 17 % (причем разрушение происходит

по сварному шву, а не по накладке) и является экономически целесообразным.

Из опытной и базовой сталей ИХНЗМА на Дрогобычском долотном заводе были изготовлены шарошечные долота типа 295,3 Ш-С-ГВ по существующей заводской технологии. Определение механических свойств проводили на стандартных образцах, вырезанных непосредственно из тела шарошки.

Испытаниями установлено, что износостойкость опытных образцов в среднем на 70 % выше, чем базовых.

Партия шарошечных долот в количестве 10 штук (по 5 из базовой и опытной сталей) была испытана при бурении водоотливной скважины на поле шахты Калиновская восточная ПО "Советскуголь" с помощью буровой установки УБВ-600. Проходка составила 204,8 погонных метров по породам VII-IX категории. Средняя проходка на одно долото из опытной стали в породах VII-IX категорий составила 40,96 м против 15,51 погонных метров на одно серийное.

Кроме перечисленных, нами выплавлялись и исследовались и другие марки сталей.

Так, из стали УВА на Харьском сталепроволочно-кабельном заводе по заводской технологии был получен и испытан корд из стали, выплавленной из обычной шихты, к которой добавлялось различное количество металлизированного сырья. При увеличении доли металлизированного сырья в шихте от 25 до 100 % выносливость металлокорда (число циклов изгиба) возросла с 10931 до 14976.

Малоуглеродистая конструкционная судостроительная сталь, выплавленная на основе тяжеловесного металлизированного сырья, имеет ряд преимуществ по сравнению с базовой: ударная вязкость опытной стали при температуре -40°C примерно в два раза выше, а низкий порог хладноломкости (-100°C) позволяет рекомендовать ее для работы в северных районах.

Более высокие эксплуатационные свойства имеет опытная сталь ШХ15, причем наиболее заметно влияние металлизированного сырья на вязкость стали, которая повышается на 50 % при сохранении твердости и пределов прочности и текучести на прежнем уровне.

На наш взгляд, повышение эксплуатационных свойств опытного металла связано с упорядочением его структуры, а также снижением примесей цветных металлов и газов.

В пятой главе теоретически и экспериментально обоснован процесс получения металлизированного сырья без использования природного газа.

В связи с практически полным отсутствием на Украине добычи нефти и природного газа одной из важнейших задач ученых и технологов становится работа по сокращению импорта этих энергоносителей за счет их замены менее дефицитным твердым топливом. Разработанная нами технология получения тяжеловесного металлизированного сырья предусматривает использование для обогрева печи природного газа в количестве около $280 \text{ м}^3/\text{т}$ продукта, поэтому задаче полного отказа от его использования постоянно находилась в центре нашего внимания.

Для получения восстановительных газов из твердого топлива чаще всего применяют методы газификации в потоке, в стационарном и кипящем слое, в вихревых и циклонных толках, в жидкой ванне.

К настоящему времени применение в промышленности нашли: способ газификации в компактном слое - Лурги; в вихревом потоке - Копперс-Тотцек, Шелл-Копперс, Тексово и Савбат-Отто; в кипящем слое - ХТВ; в расплаве - КР, Коин, Сумитомо киндзоку кеге и другие. Наиболее распространенным вариантом является сочетание агрегата для газификации одного из перечисленных типов с шахтной печью для восстановления железорудного сырья.

В процессе Лурги газификация угля осуществляется под давлением 2-3 МПа в слое шихты, движущейся противотоком к подаваемым в реактор снизу пару, кислороду и образующемуся газу. Преимуществами данного процесса являются высокая производительность установок и низкий расход кислорода, недостатками - необходимость принимать меры для предупреждения спекания углей, низкая температура получаемого газа и содержание в нем побочных продуктов - смолы, аммиака, фенолов, сернистых соединений.

Процессы газификации угля в вихревом потоке осуществляются при высоких давлениях и температурах в прямоточных реакторах при совместной подаче угля с газифицируемыми агентами - паром и кислородом. Преимуществами вихревого потока по сравнению с компактным слоем являются возможность использования различных сортов угля, высокая температура получаемого газа и отсутствие в нем смол и фенола. Применяются в промышленности процессы Копперс-Тотцек и разработанный на его основе Шелл-Копперс. Это автотермические процессы газифи-

фикации угольной пыли (содержание фракции - 90 мкм не менее 90 %) кислородом или воздухом с водяным паром в прямом токе под давлением около 3 МПа при температуре 1400-1500 °С. Зола угля выделяется в виде шлака в системе охлаждения под реактором. Затем газ, содержащий до 95 % (CO + H₂), охлаждается и очищается от остаточной золы, соединений серы, следов аммиака и цианистого водорода.

Доведены также до стадии опытно-промышленного и промышленного применения процессы Тексако (сжигание водо-угольной суспензии) и Савберг-Отто (газификация угля над шлаковой ванной).

Основными недостатками рассмотренных процессов являются жесткие требования к химическому и гранулометрическому составу газифицируемого угля, а также необходимость охлаждения полученного газа для его очистки. Это приводит к резкому увеличению капитальных затрат на сооружение агрегатов для сушки, измельчения, обогащения сырья, скрубберов, фильтров, установок для отмывки кислых газов и т.д. Все это делает процессы газификации угля экономически неэффективными по сравнению с процессами, базирующимися на использовании природного газа. Кроме того, глубокое охлаждение получаемого газа снижает общий тепловой к.п.д. процесса получения металлургического продукта.

Ранее было обосновано, что в отличие от большинства существующих процессов ПГЖ, разработанная нами технология получения тяжёлого металлургического сырья не предъявляет высоких требований к качеству подаваемого в печь восстановления газа. Главным является возможно более высокая температура газа (не менее 1300 °С) при минимальных затратах на его получение и низкая запыленность.

Результаты анализа существующих способов газификации твердого топлива убедили нас в том, что наиболее полно отвечает этим требованиям эмульсионный процесс, называемый в настоящее время плавкой в жидкой ванне (ПЖВ). Процесс был предложен еще в 1949 г. проф. А.В.Ваняковым, в течение многих лет изучался и совершенствовался, и сейчас с успехом применяется в цветной металлургии для переработки сульфидных медно-никелевых руд и в опытно-промышленных масштабах - для восстановления железорудных материалов.

Суть предлагаемого процесса газификации состоит в барботаже слоя жидкого шлака с замешанным в нем кусковым или пылевидным топливом дутьем, обогащенным кислородом. Дутье подается через

осковые фурмы, расположенные ниже уровня расплава. Восстановительный газ, образующийся при пиролизе твердого топлива, его неполном горении и восстановлении оксидов, может частично или полностью дожигаться дутьем, подаваемым через второй ряд фурм. Стойкость агрегата в реакционной зоне (барботируемой шлаковой ванне) и в надшлаковом пространстве (зоне дожигания газа) обеспечивается заменой огнеупорной футеровки водоохлаждаемыми кессонами с образующимся на них шлаковым гарниссажем. Загрузка в агрегат шихты и выпуски шлака производятся непрерывно, а выпуск металла - периодически. В барботируемой зоне ванны при температуре 1500-1600 °С за счет интенсивного тепло- и массопереноса идет очень быстрый пиролиз, удаление летучих и неполное горение твердого топлива с генерацией тепла. Зола топлива и флюс плавятся, образуя шлак. Оксиды железа, содержащиеся в шихте, восстанавливаются углеродом топлива и СО до металлического железа. Капли жидкого железа науглероживаются, укрупняются и опускаются на подину агрегата через зону спокойного шлака, образуя металлическую ванну. Выпуск шлака и металла осуществляется через отдельные сифоны-отстойники.

Разработанная нами технологическая схема процесса получения тяжеловесного металлизированного сырья без использования природного газа, предусматривающая использование печи сжигания угля в расплаве (ПСУР), реализующей этот процесс, приведена на рис.4.

Эффективность использования ПСУР для газификации угля не вызывает сомнений и подтверждается, в частности, результатами организованных и проведенных с нашим участием экспериментов на опытно-промышленной печи ПЖВ Новолипецкого металлургического комбината. Так, при подаче в печь 11 т/ч кузнецкого угля ТР и 10200 м³/ч дутья, содержавшего 60 % O₂, наблюдался выход восстановительного газа в количестве 27200 м³/ч, содержавшего (об.%): 67,6 СО; 19,6 Н₂; 10,6 N₂; 1,3 СО₂; 0,9 Н₂O. Запыленность газа составляла 12-15 г/м³, его температура 1450-1500 °С (По данным сотрудников МИСиС, примерно такое же качество имеют газы, отходящие из печи ПЖВ при восстановлении железорудных материалов, поэтому весьма перспективной представляется нам схема получения жидкого металла в такой печи с использованием отходящих газов в разработанном нами агрегате для металлизации рудоугольных формовок).

На основе математической модели, разработанной совместно с

Технологическая схема процесса получения тяжеловесного металлургического сырья без использования природного газа

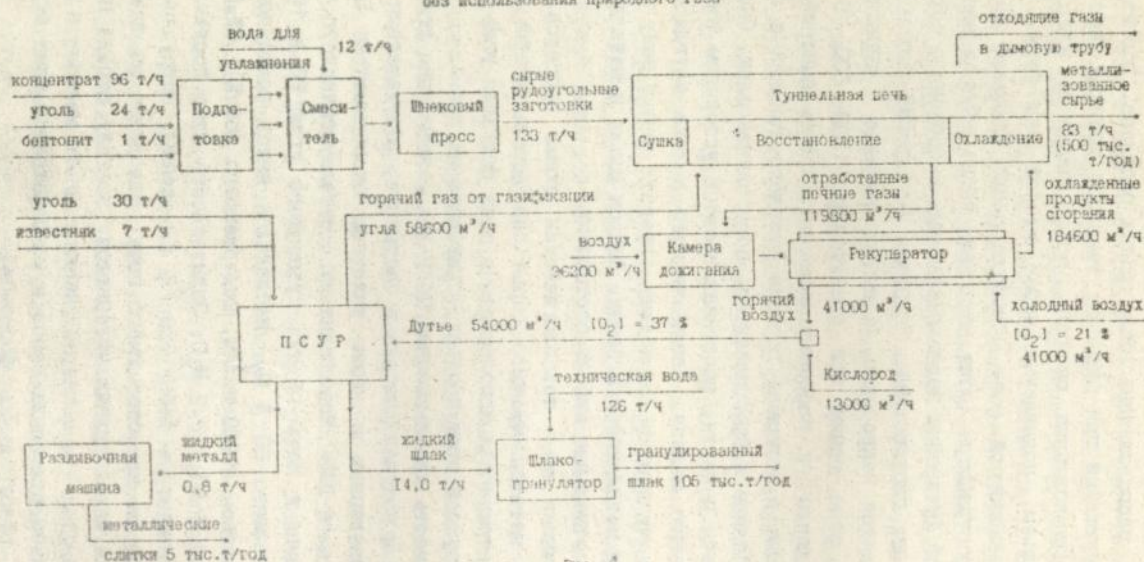


Рис. 4

Рязанским научно-исследовательским отделением института "Гинцветмет" и научно-исследовательским институтом теплоэнергетики (г. Горловка) нами проведены уточненные расчеты материальных и тепловых балансов ПСУР, учитывающие физико-химические особенности процессов образования металла и шлака. Балансы составлены для всех предусмотримых режимов работы ПСУР, а также различных значений основности получаемого шлака.

Так, при часовой подаче 24 т угля АШ и 14,75 т известняка в ПСУР будет образовываться 14 т шлака, содержащего, % (по массе): 35,05 SiO_2 ; 13,86 Al_2O_3 ; 47,85 CaO ; 1,06 MgO ; 1,19 TiO_2 ; 0,99 FeO . Основность такого шлака $b = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) = 1,0$, температура плавления около 1400°C , вязкость при 1500°C - 0,45 Па·с, что обеспечивает нормальный барботаж ванны. Основной минеральной составляющей является геленит $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_2$.

В приходной части теплового баланс около 95 % составляет химическое тепло угля, вклад остальных компонентов (физическое тепло угля, флюса и дутья) невелик. В расходной части 53,8 % составляют потери тепла с отходящими газами (это тепло затем полезно используется в печи металлургии); 23,4 % - потери с водой, охлаждающей элементы конструкции печи, прежде всего кессоны; 8,9 % - потери тепла с жидкими продуктами плавки; 8,2 % расходуется на нагрев, разложение и плавление шлакообразующих.

Получаемый шлак может использоваться в качестве сырья для производства ценных строительных материалов: гранулированного шлака, шлакоблоков, шлакобетона, щебня, каменного литья и др.

Выпускаемый из печи металл реализуется в виде слитков (чушек) для дальнейшей переплавки. Нами рассчитана и сконструирована специальная разливная машина, отвечающая требованиям технологии.

Предлагаемый процесс обладает значительными преимуществами с точки зрения экологии. Так, золунос составляет не более 0,5 % от веса сжигаемого угля, выход оксидов азота по сравнению с газификацией угля в потоке снижается в 2,5-3 раза, а оксидов серы - в 1,5-2 раза.

Получаемый газ может также использоваться в энергетических агрегатах. При нашем участии разработана и спроектирована опытно-промышленная установка для сжигания твердого топлива в расплаве. Строительство этой установки в сочетании с котлом ТП-150 завершает-

ся на ТЭЦ "Эсхар".

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации дано теоретическое обобщение и новое решение крупной научно-прикладной проблемы управления восстановительными процессами в установках бескоксовой металлургии, имеющей важное народнохозяйственное значение. Это позволило обосновать и разработать новый процесс прямого получения железа, позволяющий значительно сократить потребление природного газа, повисить качество получаемых металлоизделий и существенно улучшить экологическую обстановку в регионах расположения.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Теоретическими и экспериментальными исследованиями уточнены физико-химические особенности процесса восстановления оксидов железа углеродом, предложена и доведена до численной реализации методика расчета скорости процесса металлизации рудоугольных формовок, удовлетворительно согласующаяся с экспериментальными данными.

2. Установлено, что различия в скорости восстановления для исследованных видов углей не превышают 8 % отн. и лишь в незначительной степени зависят от их реакционной способности. Поэтому при выборе восстановителя решающее значение имеет его чистота по золе и, особенно, по сере. Наиболее целесообразным признано использование донецких антрацитов и российских слабоспекающихся углей.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли опытно-промышленную проверку на построенном по нашему проекту участке Макеевского металлургического комбината, включающем отделение восстановления, оборудованное целевой печью с размерами рабочего пространства 20250 × 1310 × 480 мм, и отделение подготовки и сушки формовок. Участок находился в эксплуатации с 1983 по 1990 г., произведено более 10 тыс. т продукции.

Проведенные с участием представителей институтов ЦНИИЧМ, ДонНИИЧМ, ВНИПИЧЭ, ВНИИМТ балансовые испытания технологии показали работоспособность основных узлов установки, простоту управления технологическим процессом, его экологическую чистоту и возможность эффективного получения тяжеловесного металлизированного сырья с

использованием в качестве восстановителя энергетических углей.

4. Производимые по предлагаемой технологии металлизированные брикеты непирофорны, не требуют дополнительных затрат на охлаждение и хранение, практически не подвержены вторичному окислению, что является несомненным достоинством процесса.

Плотность производимых брикетов на 30-50 % выше, чем у окатышей и других видов металлизированных материалов, поэтому облегчается их использование в сталеплавильных агрегатах. В производимом продукте можно получить любое заранее заданное содержание углерода (от 0,1 до 6 %), что позволяет использовать его для выплавки практически любых марок стали.

5. Основные показатели процесса при использовании угля в качестве восстановителя и природного газа для отопления печи следующие: расход природного газа - 280 м³/т, расход угля - 220 кг/т, расход тепла - 15,8 ГДж/т, тепловой к.п.д. процесса - 41,3 %.

Анализ теплового баланса установки показал, что для промышленного агрегата основные потери (физическое и химическое тепло отходящих газов и загрузочных тележек) могут быть сокращены не менее чем на 30 %, что позволит снизить расход тепла в промышленном агрегате до 13 ГДж/т продукта.

6. Впервые показано, что благодаря экранизирующему действию выделяющегося оксида углерода возможно восстановление рудугольных формовок в атмосфере, окислительной по отношению к железу. При отоплении печи продуктами неполного горения природного газа коэффициент расхода воздуха α может быть равен 0,8 до степени металлизации 30 %, 0,7 - до степени металлизации 60 %, а затем атмосферу необходимо иметь базокислительную ($\alpha \leq 0,5$).

Кроме того, установлено, что выделяющийся во время восстановления рудугольных заготовок газ составляет от 18 до 30 % количества дыма, образующегося при сжигании топлива для отопления печи. Этот газ существенно снижает окислительный потенциал печной атмосферы и даже при полном сжигании топлива в печи позволяет получать до 10 % ($\text{CO} + \text{H}_2$). Это повышает эффективность работы агрегата, его теплотехнический к.п.д. и технико-экономические показатели.

7. Разработана математическая модель процесса металлизации, которая позволяет определять оптимальные технологические параметры и обеспечить получение заготовок с заданным химическим составом.

Ошибка предсказания в условиях опытно-промышленного производства составляла 7-10 %.

8. На основе анализа существующих способов газификации твердого топлива для снабжения восстановительными газами установок прямого получения железа предложен процесс, предусматривающий газификацию угля в шлаковом расплаве, барботируемом дутьем, обогащенным кислородом.

Для обеспечения работы печи восстановления рудугольных формовок мощностью 500 тыс. т/год предполагается использовать агрегат с площадью пода 24 м^2 и производительностью по углю 25-30 т/ч.

9. Разработанная схема позволяет создать технологию получения металлизированного сырья, основанную на использовании в качестве энергоносителя исключительно энергетических углей. Общий расход угля (на восстановление и отопление печи) составит при этом 650-700 кг/т. Такая технология позволяет значительно повысить комплексность использования минерального сырья, обеспечивает возможность сжигания высокосольных сернистых углей и других низкосортных топлив при снижении выбросов пыли в 3-5 раз, оксидов серы в 1,5-2 раза и оксидов азота в 2,5-3 раза по сравнению с обычно используемыми способами сжигания твердого топлива. Особо перспективной представляется схема прямого получения железа в жидкой ванне (например, по технологии МИСиС) с использованием отходящих газов в разработанном нами агрегате для металлизации рудугольных брикетов.

Обоснована возможность применения способа газификации твердого топлива в расплаве также в тепло- и электроэнергетике, для обезвреживания и утилизации бытовых и промышленных отходов, в том числе шламов ТЭС. В настоящее время при нашем участии строится опытно-промышленная установка сжигания угля в расплаве на базе котла ТП-150 на Харьковской ТЭС "Эсхар".

10. Проведенные исследования по переплаву в 1,5 т, 3 т и 100 т электропечах металлизированных окатышей ОЭМК и тяжеловесного металлизированного сырья выявили ряд преимуществ последнего. Отсутствовали выбросы металла и шлака. Плавление окатышей происходит в основном в шлаке или на границе раздела шлак-металл, а более плотные заготовки частично погружаются в металл, что интенсифицирует процесс плавления и снижает угар металла на 5-10 % отн.

Сквозные энергозатраты технологического процесса производства

стали на основе металлизированного сырья, получаемого по нашей технологии, на 6,9 % ниже, чем при производстве конвертерной стали, на 22 % превышают энергозатраты процесса выплавки электростали на скрапе и на 12,1 % - плавки на металлизированных окатышах.

Загрузка горячего металлизированного сырья позволит снизить расход энергии по нашему варианту примерно на 15 %.

Кроме того, учитывая, что стоимость единицы теплоты при сжигании природного газа примерно в три раза выше, чем при сжигании угля, можно признать выплавку сталей с использованием тяжеловесного металлизированного сырья энергетически и экономически целесообразной.

11. Сравнительные исследования свойств сталей из обычной шихты и на основе металлизированного сырья выявили ряд преимуществ последних. Так, направляющие башмаки шахтных клетей и накладки конвейер-струга из стали 35ХГСА на основе металлизированного сырья имели стоимость в 2,5-3 раза выше, а шарошечные долота из стали 18ХНЗМА - в 2,6 раза выше, чем изделия из базовой стали.

При повышении количества металлизированного сырья в шихте от 25 до 100 % выносливость металлокорда (число циклов изгиба) увеличилась с 10931 до 14967.

Углеродистая конструкционная судостроительная сталь, выплавленная из полученного нами продукта, имеет ударную вязкость при температуре - 40 °С примерно в два раза выше чем базовая, а низкий (- 100 °С) порог хладноломкости позволяет рекомендовать ее для работы в северных районах.

Более высокие эксплуатационные свойства имеет опытная сталь ШХ15, причем наиболее заметно это сказывается на вязкости стали, которая повышается на 60 %.

По нашему мнению, повышение эксплуатационных свойств металла, полученного на основе металлизированного сырья, связано прежде всего с упорядочением его структуры, снижением количества примесей цветных металлов и газов.

Использование полученных нами изделий на предприятиях металлургической и горной промышленности позволило получить первичный экономический эффект в сумме около 100 тыс.руб. (в ценах до 1986г.).

12. Институтом "Укрспроммет" установлено, что получение и использование металлизированного сырья наиболее целесообразно на предприятиях с объемом производства 1-3 млн.т стали в год. Расчет-

ные характеристики агрегата мощностью 500 тыс.т/год в ценах 1988 г.: капитальные затраты - 21,0 млн.руб., годовая прибыль - 13,4 млн.руб., срок окупаемости капитальных вложений - 1,7 года. На основании выполненных проработок разработанная технология была включена в проекты перспективного развития заводов им.Петровского и Карла Либкнехта в г.Днепропетровске, а также Руставского и Тганрогского металлургических заводов.

Таким образом, полученные теоретические и практические результаты позволяют сделать вывод о том, что разработанная нами технология производства и переработки металлизированного сырья соответствует современным представлениям об уровне экологической безопасности; предлагает решение всего комплекса вопросов от получения исходных материалов до производства готовых изделий; позволяет организовать эффективное производство металлопродукции с учетом реально складывающейся в Украине и за рубежом ситуации с сырьевыми материалами и энергоресурсами.

Основное содержание диссертации
опубликовано в следующих работах:

1. Сафьянц С.М. Некоторые аспекты твердофазного восстановления оксидов железа.-Препринт ДОНУТИ АН Украины.- 1993.- № 9.- 30с.
2. Safiants S.M. Modelacion matematica de los procesos de reduccion directa por la via carbotecnica (Математическое моделирование процессов углеродического восстановления) // Collec.de Trab.scient.-tecн. CENIM.- 1993.- № 2.- P.63-70.
3. Сафьянц С.М., Пахомов И.А., Великов С.Н. Взаимодействие рудоугольных заготовок с газовой фазой в процессе восстановления // Изв. Вузov. Черная металлургия.- 1983.- № 3.- С.144.
4. Сафьянц С.М., Родионов С.Н., Фаркаш Л. Исследование спекваемости железных руд // Совершенствование технологии производства черных металлов.- Киев: Техніка.- 1975.- С.30-33.
5. Сафьянц С.М., Г.В.Кухарь, С.Н.Родионов. Расчет теплотехнической и экономической эффективности производства железогубчатых заготовок // Повышение эффективности производства черных металлов.- Киев: Техніка.- 1976.- С.72-73.
6. Safiants S.M. The New Process of Coke-free Metallurgy // Proc. Int. Symposium on Direct Reduction.- Lybia.- December, 1990.

Р.1-7.

7. Сафьянц С.М., Пахомов И.А., Зятёв В.П. Использование первородного сырья для улучшения качества металла // Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке.- Днепропетровск: ДМетИ.- 1980.- С.126-129.
8. Safjants S.M., Konstantinov G.E., Morclego O. Caracteristicas de las aleaciones fundidas a partir de productos metalizados. (Свойства сплавов на основе металлизированного сырья) // Collec. de Trab. scient.+ tecn. CENIM.- 1993.- № 2.- P.17-21.
9. Сафьянц С.М., Иванов А.И., Самойленко Л.В. Разработка технологии восстановления рудугольных заготовок с применением безокислительной и восстановительной атмосферы // Sb. ved. VSB Ostrava.- 1980.- № 1.- P.281-284.
10. Сафьянц С.М., Пономарев Л.Л., Рузин Э.В. Исследование состава газовой фазы при восстановлении рудугольных формовок // Изв. вузов. Черная металлургия.- 1988.- № 9.- С.21-22.
11. Структурообразование железной губки, полученной восстановлением рудугольных заготовок / Л.В.Самойленко, С.М.Сафьянц, Довжук П.Я. и др. // Новое в производстве черных металлов.- Киев: Техніка.- 1977.- С.11-14.
12. Иванов А.И., Якобсон Ф.И., Сафьянц С.М. К вопросу о восстановлении Cr и Ni твердыми восстановителями // Новое в производстве черных металлов.- Киев: Техніка.- 1977.- С.7-9.
13. Самойленко Л.В., Иванов А.И., Сафьянц С.М. Фазовые превращения при восстановлении рудугольных брикетов // Изв.вузов. Черная металлургия.- 1979.- № 7.- С.17-19.
14. Witapianie stali węglovei z brykietow zelaza gabczastego / A.I.Iwanow, L.W.Samoienko, P.J.Dowzduk, S.M.Safjants (Выплавка углеродистой стали из брикетов губчатого железа) // Hutnik.- 1979.- № 12.- S.487-489.
15. Иванов А.И., Сафьянц С.М., Пахомов И.А. Металлизация железной руды с помощью твердого восстановителя // Metallurgia i odlevnictvo.- 1980.- № 6.- P.413-418.
16. Иванов А.И., Сафьянц С.М., Пахомов И.А. Технология прямого восстановления железа // Атомно-водородная энергетика и технология.- 1981.- № 2(9).- С.108-111.
17. Планирование экстремального эксперимента при исследовании вос-

- становительных процессов / А.И.Иванов, С.М.Сафьянц, И.А.Пахомов и др. // Изв.вузов. Черная металлургия.- 1981.- № 2.- С.12-15.
18. Иванов А.И., Пахомов И.А., Сафьянц С.М. Получение электрохимически активного губчатого железа // Изв.вузов. Черная металлургия.- 1981.- № 3.- С.183-184.
19. Иванов А.И., Сафьянц С.М., Пахомов И.А. Исследование твердофазного восстановления окислов железа углеродом // Металлургия и коксохимия.- 1982.- № 75.- С.57-61.
20. Углетермическое восстановление - эффективный способ получения активного железного порошка / А.И.Иванов, А.М.Новиковский, И.А.Пахомов, С.М.Сафьянц // Проблемы порошковой металлургии.- Ленинград.- 1982.- С.23-25.
21. Разбухание рудугольных окатышей при восстановлении / И.А.Пахомов, С.М.Сафьянц, А.И.Иванов и др. // Металлургия и коксохимия.- 1983.- № 79.- С.82-85.
22. Ядерно-металлургический комплекс на базе восстановления оксидов железа твердым углеродом / А.И.Иванов, И.Г.Белоусов, С.М.Сафьянц и др. // Атомно-водородная энергетика и технология.- 1983.- № 1(14).- С.13-15.
23. Экспериментальная установка прямого восстановления железа твердым углеродом с джоулевым энергообеспечением / А.И.Иванов, И.Г.Белоусов, А.П.Орехов, С.М.Сафьянц и др. // Атомно-водородная энергетика и технология.- 1983.- № 2(15).- С.20-21.
24. Металлизированное сырье - основа производства высококачественных сталей / А.И.Иванов, С.М.Сафьянц, Л.В.Самойленко и др. // Сталь.- 1984.- № 3.- С.4-5.
25. Сафьянц С.М. Процесс газификации твердого топлива в расплаве для металлургических и энергетических агрегатов / Деп. в ГИТБ Украины 15.10.93.- № 1993.- 42 с.
26. Опорно-промышленная отработка технологии получения тяжеловесного металлизированного сырья / А.И.Иванов, С.М.Сафьянц, И.А.Пахомов и др. // Теория и практика прямого получения железа.- М.: Наука.- 1986.- С.144-147.
27. Выбор рациональной формы восстанавливаемых рудугольных формовок / С.М.Сафьянц, Л.Л.Пономарев, Э.В.Рузин и др. // Физикохимия процессов восстановления металлов.- Днепропетровск.- 1988.- С.145.

28. Иванов А.И., Сафьянц С.М., Константинов Г.Е. Новый процесс прямого получения железа: технико-экономическая эффективность и экологическая чистота // *Фундаментальные основы экологически чистых технологий.* - Донецк. - 1991. - С.13-14.
29. А.с. 525330. Способ получения электродов / А.И.Иванов, В.Н.Уваров, М.П.Зборщик, С.П.Ефименко, С.М.Сафьянц и др. // *Открытия. Изобретения.* - 1978. - № 35. - С.46.
30. А.с. 606506. Способ получения электродов / А.И.Иванов, Д.Г.Чернета, Н.М.Виноградов, С.М.Сафьянц и др. // *Открытия. Изобретения.* - 1978. - № 17. - С.141.
31. А.с. 610388. Состав шихты для получения электродов / А.И.Иванов, С.М.Сафьянц, Л.В.Самойленко и др. // *Открытия. Изобретения.* - 1978. - № 21. - С.53.
32. А.с. 735019. Шихта для получения электродов / А.И.Иванов, Л.В.Самойленко, С.М.Сафьянц и др. // *Открытия. Изобретения.* - 1980. - № 18. - С.27.
33. А.с. 963278. Печь для восстановления рудоугольных материалов в жидком теплоносителе / И.Г.Белоусов, А.И.Иванов, С.М.Сафьянц и др. // *Открытия. Изобретения.* - 1982. - № 36. - С.83.
34. А.с. 1234438. Способ получения металлизированного продукта из концентратов / А.И.Иванов, В.И.Горда, С.М.Сафьянц и др. // *Открытия. Изобретения.* - 1985. - № 18. - С.29.
35. А.с. 1118688. Способ прямого получения железа из руд твердым способом / И.Г.Белоусов, А.И.Иванов, В.П.Орехов, С.М.Сафьянц и др. // *Открытия. Изобретения.* - 1984. - № 21. - С.46.
36. А.с. 1777352. Способ металлизации рудоугольных заготовок и туннельная щелевая печь восстановления / А.И.Иванов, Л.Л.Пономарев, С.М.Сафьянц и др. // *Открытия. Изобретения.* - 1990. - № 17. - С.7.

Подписано к печати 11.05.1994.

Формат 60×84/16. Бумага типогр. № 2. Печать офсетная.

Физ.п.л. 2,4. Уч.-изд.л. 2,33. Усл.п.л. 2,31.

Тираж 120 экз.

Донецкий государственный технический университет,
340000, Донецк, ул.Артема, 58

AB 30.181

AB 30.181