

1568946

На правах рукописи
УДК 621.745.5

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

САФРОНОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ
ОТХОДОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ФАСОННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ЧЁРНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Кирилл

Москва – 2000 г.

Работа выполнена в Камском политехническом институте на кафедре «Машины и технология литейного производства»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Васильев В.А.

доктор технических наук, профессор Бех Н.И.

доктор технических наук, профессор Фоченков Б.А.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1568946

Семенов Н.Н. Основы теории

Ведущая организация:

ОАО «Научно-экспериментальный комплекс» (НЭК) г. Елабуга

Защита состоится «20» декабря 2000 г. в 14³⁰ час. на заседании диссертационного совета Д053.15.05 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:

ч. 5.

Библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Экземпляр, заверенный печатью, просим

[] 2000 г.

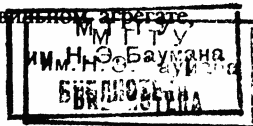
1568946

Семенов В.И.

Актуальность темы. Производственная деятельность крупных машиностроительных предприятий сопряжена с образованием в достаточно больших количествах и разнообразной номенклатуры отходов в том числе и дисперсного вида, которые представляют большую проблему по вовлечению их в технологический процесс как по причине их дисперсности, так и наличия в них неметаллических включений, а также окисленной формы существования металлических элементов. Чтобы оценить масштабы образования железосодержащих отходов машиностроительного производства, достаточно привести примеры по работе электродуговых печей, в которых улавливается плавильная пыль в количестве 10 — 20 кг/т чугуна и стали, кузнечных и термических цехов, в которых образуется окалина в количестве 20 — 50 кг/т изделий. При работе других подразделений машиностроительного комплекса также образуются дисперсные железосодержащие отходы: шламы электрохимической и электроэрозионной обработки, гальванические, от очистки сточных вод, обработки изделий дробью, напылительных, заточных, помольных операций, обнажачивания и других видов обработки металлов резанием. Все это вывозится в отвалы. При этом обществу наносится значительный экологический ущерб, а машиностроительные предприятия вынуждены нести бремя издержек по организации захоронений и уплате штрафов.

В отраслях промышленности, связанных с производством первичного металла, известны технологические решения по утилизации указанных отходов. В первую очередь это относится к аглодоменному производству и альтернативным вариантам получения первичного металла: «Мидрекс», «Корекс», «Ромелт». Но, во-первых, на самих предприятиях с полным металлургическим циклом образуется большая масса отходов в виде пылей, окалины, отсева агломерата и окатышей, которая в пересчёте на металл составляет 10 % объёма производства первичного металла. Указанные отходы утилизируются лишь наполовину, а остальные накапливаются в отвалах и отстойниках. Во-вторых, обсуждаемые агрегаты с большой единичной мощностью предназначены для выплавки первичных металлов в условиях металлургического завода и не приемлемы для машиностроительных предприятий, производящих изделия из конструкционных материалов. В-третьих, современные экономические условия в нашей стране сложились таким образом, что при всеобщем росте цен тарифы на железнодорожные перевозки увеличивались значительно быстрее, чем цены на продукцию и услуги во всех других отраслях народного хозяйства. Поэтому остро стоит вопрос о максимально возможной степени утилизации отходов машиностроительного комплекса внутри него, которое позволит повысить полноту использования приобретаемых материалов и сырья, а также улучшить экологическую обстановку в регионе.

Таким образом, научно-техническая проблема утилизации наиболее трудно поддающихся этой операции дисперсных отходов производства, в которых ценные элементы могут находиться в окисленном состоянии, является актуальной. В настоящей работе проблема утилизации дисперсных отходов решается через технологические процессы приготовления расплава чёрных металлов в вагранках и специализированном электротермическом плавильном агрегате.



1568046

осуществляющем твердо- и жидкофазную металлизацию элементов, а также изготовления литейной металлизированной формы. Указанные процессы являются эффективными при утилизации дисперсных отходов производства, так как в процессе плавки с металлизационными аспектами происходит образование двух несмешивающихся жидких фаз: шлаковой и металлической. Первая из них ассимилирует неметаллические включения, вторая поглощает ценные составляющие отходов даже, если они присутствуют в них в окисленном состоянии. Что касается литейной металлизированной формы, изготовленной из дисперсных железосодержащих отходов производства, то и в этом случае проблема утилизации полностью решается так как отслужившая свой ресурс форма используется как шихтовый материал при плавке литейных сплавов.

Цель и задачи работы - разработка технологических решений и их теоретического обоснования по утилизации дисперсных отходов машиностроения в технологическом процессе литья на этапах приготовления расплава чёрных металлов и изготовления формы. Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- Разработка методологии определения технических показателей ваграночной плавки чугуна на комбинированном дутье с использованием дисперсных отходов производства.

- Исследование и анализ эффективности замены в ваграночном процессе топливного, флюсового и металлического компонентов кусковой шихты, загружаемой сверху, вдуваемыми в горн дисперсными отходами.

- Разработка принципиальной схемы технологического процесса и конструктивного его оформления с теоретическим обоснованием отдельных этапов утилизации дисперсных железосодержащих отходов при приготовлении расплава чёрных металлов путем прямого синтезирования в специализированном электротермическом плавильном агрегате с раздельным проведением металлизации элементов в твердой и жидкой фазах.

- Исследование прочностных характеристик композиций из дисперсных железосодержащих отходов, стойкостных показателей изготовленных из них металлизированных литейных форм и тепловых её свойств.

- Исследование особенностей образования форм графитных включений серого чугуна, полученного прямым синтезированием из дисперсных железосодержащих отходов в специализированном электротермическом плавильном агрегате без модифицирующего воздействия на жидкий металл, при затвердевании в песчаной форме в естественных условиях охлаждения, а также в металлизированной литейной форме в условиях регламентированного режима охлаждения путём закалки из жидкого состояния и изотермической выдержки затвердевшего чугуна при температуре 1223-1273 К.

- Опробование и внедрение результатов работы по получению качественных фасонных отливок и работоспособных изделий из них из дисперсных отходов машиностроения в промышленных условиях.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Разработан комплексный метод определения технических показателей ваграночной плавки чугуна на комбинированном дутье с использованием в

процессе дисперсных отходов производства.

- Разработаны концепции и подтвержденные экспериментальными данными методики расчета эффективности мероприятий по организации работы вагранки с вдуванием в горн на различных его горизонтах пылегазовых смесей, содержащих дисперсные отходы производства в качестве заменителей топливной, флюсовой и металлической частей кусковой шихты, загружаемой сверху.

- Установлена взаимосвязь между развитием реакции Белла-Будуара в ваграночном процессе и эффективностью коксоберегающих мероприятий, связанных с повышением теплового эквивалента кокса, дополнительным введением в ваграночный процесс веществ с положительным тепловым эквивалентом или заменяющих таковые с более низким тепловым эквивалентом.

- Разработаны критериальные модели технологического процесса специализированного плавильного агрегата на постоянном токе, с электродуговым нагревом прямого действия, с катодной поляризацией металлической фазы, с донным выпуском металла, в котором осуществляется прямое синтезирование чёрных литейных сплавов из дисперсных железосодержащих отходов производства путем жидко- и твердофазной противоточной цементирующей металлизации необходимых элементов.

- На основании исследования механических и тепловых свойств композиций из дисперсных железосодержащих отходов предложена технологическая схема изготовления металлизированной литейной формы многофазового действия, вобравшей в себя преимущества металлической и песчаной форм.

- Установлена склонность серых чугунов, полученных в специализированном плавильном агрегате из дисперсных железосодержащих отходов, к образованию компактных форм графита без модифицирующего воздействия на жидкий металл при затвердевании в песчаной форме в естественных условиях охлаждения, а также в металлизированной литейной форме в условиях регламентированного режима охлаждения путём закалки из жидкого состояния и изотермической выдержки при температуре 1223-1273 К.

На защиту выносятся следующие вопросы:

- комплексный метод определения технических показателей ваграночной плавки на комбинированном дутье с использованием дисперсных отходов производства;

- экспериментальные исследования, теоретический анализ и методика определения эффективности замены в ваграночном процессе кусковых материалов топливной, флюсовой и металлической частей загружаемой сверху шихты вдуваемыми в горн дисперсными отходами производства;

- принципы организации технологического процесса, критериальные модели и специализированный плавильный агрегат для утилизации дисперсных железосодержащих отходов при приготовлении расплава чёрных металлов путем прямого синтезирования из элементов, металлизированных твердо- и жидкофазным способами;

- экспериментальные результаты и теоретический анализ особенностей формообразования графита серых чугунов, полученных из дисперсных железосодержащих композиций в специализированном плавильном агрегате без мо-

модифицирующего воздействия на жидкий металл, при затвердевании в песчаной форме в естественных условиях охлаждения, а также в металлизированной литейной форме в условиях регламентированного режима охлаждения путём заковки из жидкого состояния и изотермической выдержки при температуре 1223-1273 К;

- результаты исследования прочностных характеристик и тепловых свойств композиций из дисперсных железосодержащих отходов на различных стадиях изготовления металлизированной литейной формы многоразового использования, а также методика моделирования теплового взаимодействия затвердевающей отливки и литейной формы;

и научные положения, являющиеся результатом анализа экспериментальных данных по формообразованию графита серых чугунов, полученных из дисперсных железосодержащих отходов машиностроения в специализированном электротермическом плавильном агрегате, а также явлений ваграночной плавки чугуна на комбинированном дутье с вдуванием в горн дисперсных отходов производства:

1. Серые чугуны, получаемые прямым синтезированием из дисперсных железосодержащих отходов в специализированном электротермическом плавильном агрегате, проявляют склонность к образованию компактных форм графита без модифицирующего воздействия на жидкий металл при затвердевании в песчаной форме в естественных условиях охлаждения, а также в металлизированной литейной форме в условиях регламентированного режима охлаждения, обуславливающего метастабильную кристаллизацию чугуна из жидкого состояния и протекание 1 стадии графитизации цемента, совершающейся при изотермической выдержке с литейного нагрева в течение кратковременного периода (≈ 2 часа) при температуре 1223-1273 К.

2. Всякое коксосберегающее мероприятие, связанное с введением в ваграночный процесс дополнительных веществ, обладающих положительным тепловым эквивалентом, или веществ, заменяющих таковые с более низким тепловым эквивалентом, а также внедрение мероприятий, увеличивающих тепловой эквивалент кокса, приводит к его «основной» экономии с параллельным ослаблением реакции Белла-Будуара и получению в связи с этим «дополнительной» экономии кокса тем большей, чем выше его доля газифицируется в редуccionной зоне.

Достоверность результатов. Экспериментальные исследования проводили на основе теории инженерного эксперимента с проверкой адекватности теоретических моделей по статистическим критериям Стьюдента и Фишера. Эксперименты неоднократно дублировались, а их результаты подвергались статистическому анализу на предмет оценки достоверности и воспроизводимости. Достоверность теоретических и экспериментальных данных подтверждена также практическим использованием результатов работы.

Практическая ценность и реализация работы

Разработаны и внедрены технологические процессы и специализированный плавильный агрегат прямого синтезирования сплавов (литейные чугуны: серые, белые, легированные; штамповые стали; ферромолибден), а также тех-

нология изготовления металлизированных литейных форм из дисперсных железосодержащих отходов производства (пыли: бигхаузная, от обработки изделий дробью; кузнечная окалина; молибденовый шлам).

Разработан комплексный метод определения технических показателей ваграночной плавки на комбинированном дутье с вдуванием в горн дисперсных отходов производства, являющийся базой для прогнозных расчётов эффективности ресурсосберегающих мероприятий.

Основные разработки диссертации в области ресурсосберегающих технологических процессов с использованием дисперсных отходов производства апробированы на машиностроительных предприятиях РМЗ и ТЭТЗ г.г. Торез и Снежное, химическом заводе им. Л.Я. Карпова г. Менделеевск, ОАО «КАМАЗ» г. Набережные Челны и внедрены на последнем машиностроительном комплексе. Общий итог результатов внедрения научных разработок, выраженный в виде годового экономического эффекта в масштабах производства и цен периода до 1991 года, оценивается порядка 1 млн. руб.

Апробация работы. Основное содержание работы по теме диссертации изложено в 54 научных публикациях, в том числе 8 авторских свидетельств СССР и патентов РФ.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 1 и 2 Международных симпозиумах по проблемам комплексного использования руд (г. Санкт-Петербург, 1994г., 1996 г.). Международных научно-технических конференциях (г. Ижевск, 1994 г.; г. Набережные Челны, 1996 г., 1997 г., 1999 г., 2000 г.; г. Тольятти, 1996 г.). Межгосударственной научно-практической конференции (г. Пенза, 1994 г.). Всесоюзной конференции (г. Казань, 1990 г.), Межреспубликанских научно-практических семинарах литейщиков (г. Чебоксары, 1987 и 1990 г.). Республиканских научно-технических конференциях (г. Одесса, 1988 и 1990 г.; г. Набережные Челны, 1988 и 1990 г.). Зональной научно-технической конференции (г. Ярославль, 1987 г.). Региональной научно-технической конференции (г. Барнаул, 1988 г.), научно-практической конференции литейщиков Западного Урала (г. Пермь, 1989 г.). Областной научно-производственной конференции (г. Брянск, 1983 г.), Межвузовской научно-практической конференции (г. Набережные Челны, 1998 г.).

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, библиографического списка из 232 наименований и приложения. Её содержание изложено на 498 страницах машинописного листа и включает 50 таблиц и 71 рисунок.

Во введении обоснована актуальность и сформулированы цель и задачи работы, изложена научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются вопросы утилизации дисперсных промышленных отходов в ваграночном процессе.

Вагранка является наиболее удачным из всех плавильных агрегатов, применяемых в машиностроительном комплексе, по эффективной утилизации дисперсных отходов производства, так как этот агрегат закрытого типа и использо-

ет для протекания в нем процессов газовой среды. В силу этого вагранка способна без какой-либо сложной предварительной обработки эффективно воспринимать дисперсные отходы в виде потока в несущей газовой среде.

Для оценки эффективности использования дисперсных промышленных отходов в ваграночном процессе разработан комплексный метод определения его технических показателей ваграночной плавки на комбинированном дутье, учитывающий многообразие и взаимосвязанность физико-химических явлений. Ваграночный процесс характеризуется многокомпонентностью, фазностью и -вариантностью методов ведения плавки (широкий набор шихтовых материалов, топлива, комбинированное дутье с повышенными параметрами по температуре, содержанию кислорода). Обсуждаемые в настоящей работе вопросы использования дисперсных отходов производства в ваграночном процессе внесут коррективы в балансы тепла и материалов, которые и будут определять степень эффективности предлагаемых мероприятий.

В основу определения технических показателей ваграночной плавки положен комплексный метод расчета, совмещающий решение вопросов по расходам топливной, флюсовой, металлической частей шихты и комбинированного дутья. Для этого составляется система линейных уравнений, представляющих из себя материальные балансы, связывающие между собой расходы различных компонентов шихты в соответствии с заданным составом жидких продуктов плавки, и тепловой баланс, определяющий соотношение между расходами кокса и остальными компонентами шихты. Для обычных условий плавки состав получаемого чугуна регламентируется количеством углерода, кремния и марганца. С учетом этого можно составить шесть уравнений и определить соответственно расход шести компонентов шихты:

1) по выходу чугуна: $\sum(n \cdot e_n) = 1$ (1)

2) по основности шлака: $\sum(n \cdot RO_n) = 0$ (2)

3) по содержанию углерода в чугуне: $\sum(n \cdot \overline{C}_n) = 0$ (3)

4) по содержанию кремния в чугуне: $\sum(n \cdot \overline{Si}_n) = 0$ (4)

5) по содержанию марганца в чугуне: $\sum(n \cdot \overline{Mn}) = 0$ (5)

6) по тепловому балансу: $\sum(n \cdot \overline{q}_n) = 0$ (6)

где n - обобщенное обозначение относительного расхода различных компонентов шихты.

Комплексный метод учитывает то обстоятельство, что расчет относительного расхода кокса находится в тесной взаимосвязи с расчетом шихты, так как вносимые коксом минеральные примеси существенно влияют на выход и состав шлака, на расход флюса. С другой стороны расчет шихты предопределяет потребность ваграночного процесса в тепле, а значит и расход кокса в связи с образованием жидких продуктов плавки с определенным отношением количества шлака к чугуну и расходом флюса.

В уравнениях (1) - (6) материальные характеристики (e - выход чугуна; u - выход шлака; RO - содержание свободных оснований; $\overline{C}$, $\overline{Si}$, $\overline{Mn}$ - избыток (недостаток) соответствующего элемента по сравнению с заданным содержанием

его в чугуне) и тепловые эквиваленты $\bar{q}$ вычисляются единообразно для всех материалов по их химическому составу и заданным или принятым параметрам плавки. При решении системы уравнений (1) - (6) определяются расходы кокса, флюса и четырех компонентов шихты.

В уравнение (6) входят тепловые эквиваленты компонентов шихты и вдуваемых материалов, представление о которых и способ их вычисления непосредственно вытекает из теплового баланса ваграночного процесса. Использование для этой цели общего теплового баланса затруднительно, так как изменение внешних условий ваграночной плавки существенным образом сказывается на температуре отходящих газов. Однако, есть особенность ваграночного процесса, заключающаяся в том, что каковы бы ни были условия его проведения, изменение температуры материалов и газов по высоте вагранки характеризуется наличием уровня, на котором разница температур принимает минимальное значение (порядка 50°). При этом температура материалов равна примерно 1123 К, а газов 1173 К. Такая особенность изменения температуры газов и материалов по высоте вагранки позволяет сделать ряд выводов:

1. В вагранке существуют две зоны теплообмена - верхняя и нижняя. Границей зон считается уровень, на котором разница между температурами газов и материалов минимальна. В верхней зоне теплообмена происходит передача тепла от поднимающихся горячих газов к опускающимся компонентам шихты. В нижней зоне теплообмена, кроме теплопередачи от газов к материалам, происходят и другие физико-химические процессы: горение топлива у фурм, разложение известняка, восстановление части углекислоты и водяного пара раскаленным коксом, шлакообразование, плавление.

2. Вариации внешних условий ваграночной плавки приводят к изменению температуры отходящих газов и уровня, разграничивающего верхнюю и нижнюю зоны теплообмена. При этом каких-либо существенных изменений в температуре газов и материалов на этом уровне не происходит.

Ввиду отмеченных выше особенностей, расчёт тепловых эквивалентов по тепловому балансу нижней зоны вагранки будет свободен от существенных ошибок, вызываемых нестабильностью температуры отходящих из печи газов.

На машиностроительных предприятиях, использующих привозной кокс в качестве топлива для приготовления расплава чугуна, до 30 % его количества бракуется при сортировочных операциях перед загрузкой в вагранку. Проблему полного использования для технологических целей приобретаемого кокса предложено решать путем доизмельчения коксовой мелочи до пылеобразного состояния и вдувания ее через фурмы в горн. Разработана принципиальная схема комплекса приготовления пылевидного топлива и формирования аэросмеси с вдуванием её в вагранку для условий чугунолитейных производств машиностроительных предприятий.

Оценка эффективности вдувания пылетвёрдого топлива в горн вагранки, произведенная по соотношению тепловых эквивалентов коксовой пыли и кускового кокса, приводит к значению коэффициента замены последнего первым, меньшему 1, так как тепловой эквивалент коксовой пыли меньше, чем у кокса, загружаемого сверху. Обусловлено это различиями в условиях горения. Куско-

вый кокс приходит в горн подогретым горячими газами, поднимающимися вверх, а коксовая пыль вдувается холодной. По этой причине полезный расход тепла у кускового кокса имеет отрицательное значение, в то время как у остальных материалов — положительное. Такое различие в условиях горения топлива сказывается на отношении водяных эквивалентов шихты и газа в сторону его понижения в верхней ступени теплообмена, что приводит к росту температуры отходящих из печи газов и, следовательно, увеличению потерь тепла.

Однако, опытные ваграночные плавки с вдуванием коксовой и угольной пыли показали, что коэффициент замены кокса превысил единицу и достигал значений 1,1 - 1,2 кг/кг. Анализ результатов ваграночных плавки даёт основание считать, что подход к вопросу об экономии кокса, основанный на соотношении тепловых эквивалентов топлив, является упрощённым и не учитывает других особенностей физико-химических превращений процесса горения топлива в условиях шахтной плавки. Газификация углерода кокса, загружаемого сверху, происходит двояким способом. Во-первых, часть его, дошедшая до уровня фурм, сгорает с образованием углекислого газа. Этот процесс формирует кислородную зону. Другая часть углерода кокса газифицируется, не доходя до уровня фурм, за счет взаимодействия с поднимающимся вверх углекислым газом. Этот процесс формирует редуccionную зону, свободную от кислорода дутья. Таким образом, расход кокса на единицу выплаваемого чугуна можно разбить на две части: ту, которая сгорает у фурм в кислороде дутья, и другую, которая идет на восстановление углекислоты в редуccionной зоне. Иными словами в условиях шахтной плавки топливо не может сгореть полностью с образованием высших оксидов. Полнота горения топлива определяется множеством факторов, главными из которых являются реакционная способность кокса и его расход, определяющий долю кокса в шихте. Чем выше реакционная способность кокса и больше его доля в шихте, тем интенсивнее протекает процесс восстановления углекислоты и паров воды раскаленным коксом, тем меньше тепловой эквивалент топлива.

Таким образом, помимо основной экономии кокса при вдувании пылевидного топлива имеет место в силу изложенных выше обстоятельств и дополнительная, обусловленная уменьшением его доли в шихте и, следовательно, ослаблением восстановительных процессов углекислоты и паров воды раскаленным коксом.

Коэффициент замены кокса вдуваемым пылевидным топливом с учетом основной и дополнительной экономии кокса определяется следующим выражением:

$$K = \frac{\Delta K}{S} = \frac{q_s}{q_k} \left[1 + \chi_o \left(1 + \frac{12,02}{q_k} \right) \right],$$

где $\Delta K = \Delta K_{\text{осн.}} + \Delta K_{\text{доп.}}$ - экономия кускового кокса при вдувании пылевидного топлива в количестве S ; q_s и q_k - тепловые эквиваленты вдуваемого пылевидного топлива и кускового кокса; χ_o - доля кокса от общего его расхода, газифицируемого в редуccionной зоне; 12,02 - тепловой эффект реакции Белла-

Будуара, МДж/кг кускового кокса.

Приведенное уравнение указывает на те факторы, которые определяют эффективность этого мероприятия. Она тем выше, чем больше отношение тепловых эквивалентов пылетвёрдого топлива и кокса и чем больше его доля расходуется в редуccionной зоне, то есть, чем ниже полнота горения кокса. Расчеты коэффициента замены кускового кокса вдуваемым пылевидным топливом по указанному уравнению согласуются с практически полученными, что подтверждает правомерность рассуждений о существовании дополнительной экономии кокса.

В практике приготовления расплава чугуна в вагранках в качестве основного флюса широко используется сырой известняк, загружаемый сверху. Недостатком в применении этого материала является наивысшее значение отрицательной величины теплового эквивалента ($\approx 3,3$ МДж/кг) из всех используемых в плавке материалов. Это обусловлено большим полезным расходом тепла ($\approx 2,5$ МДж/кг), главными статьями которого являются разложение карбоната кальция и его уголекислоты. На компенсацию большого отрицательного эквивалента сырого известняка требуется расходование кокса в количестве $\approx 0,26$ кг/кг сырого известняка. Эта проблема усугубляется при работе на высокоосновных шлаках с целью выплавки низкосернистого чугуна, пригодного для получения в нем компактных форм графитных включений. Эффективным решением обсуждаемой проблемы может быть переход на технологию вдувания порошкообразных высокоосновных материалов, свободных от карбонатных солей кальция и магния, например: основные шлаки металлургического производства, отходы при получении карбида кальция, остатки, образующиеся при работе ацетиленовых сварочных генераторов, гальванические шламы, зола сланцев и сами сланцы, порошкообразная известь. Были проведены опытные ваграночные плавки с вдуванием в горн через фурмы измельченного высокоосновного металлургического шлака и порошкообразной извести в качестве заменителей сырого известняка, загружаемого сверху.

Такое мероприятие приводит к получению положительных результатов, основанных на экономии тепла, затрачиваемого на диссоциацию карбонатных солей известняка и реакцию восстановления части уголекислоты раскаленным коксом, который притом экономится, а также на уменьшении потерь тепла с отходящими газами. Но есть и отрицательная сторона, которая заключается в дефиците тепла, обусловленном вдуванием в горн холодного материала.

Проведен анализ для условий базового периода ваграночной плавки расчетных характеристик кускового известняка, загружаемого сверху, и вдуваемых порошкообразных заменителей. Это анализ показал, что положительные стороны замены сырого известняка вдуваемыми порошкообразными заменителями с лихвой перекрывают отрицательную. Полезный расход тепла у сырого известняка ($2,52$ МДж/кг) значительно превышает аналогичную тепловую характеристику порошкообразных заменителей: извести ($1,70$ МДж/кг) и металлургического шлака ($1,96$ МДж/кг). В соответствии с этим и тепловые эквиваленты у порошкообразных заменителей значительно выше по сравнению с сырым известняком: у извести и металлургического шлака соответственно $-0,97$ и $-2,19$

МДж/кг выводимого из шихты сырого известняка.

Отмеченные обстоятельства создают предпосылки для экономии кокса при выводе сырого известняка из шихты и замене его вдуваемыми порошкообразными высокоосновными материалами. Экономия кокса состоит из его количеств, обусловленных разницей тепловых эквивалентов сырого известняка и порошкообразных высокоосновных его заменителей, уменьшением расхода кокса в редуccionной зоне на восстановление части углекислоты, выделяющейся при разложении сырого известняка, и сокращением затрат тепла на эту реакцию:

$$\Delta K = -\frac{\bar{q}_{\text{изв-ка}} - \bar{q}'_{\text{зам}}}{q_k} + \frac{1}{0,8726} \cdot \frac{12}{44} (CO_{2\text{CO}})_{\text{изв-ка}} \cdot (1 - \eta_c) \cdot \left(1 + \frac{12,02}{q_k}\right).$$

В последнем выражении: $\bar{q}_{\text{изв-ка}}$ - тепловой эквивалент сырого известняка, загружаемого сверху; $\bar{q}'_{\text{зам}}$ - тепловой эквивалент порошкообразного заменителя, вдуваемого через фурмы, в расчете на 1 кг сырого известняка; $(CO_{2\text{CO}})_{\text{изв-ка}}$ - содержание углекислоты сырым известняке; η_c - степень полноты горения углерода в кислороде дутья.

Расчет по выше приведенной формуле привел к значению экономии кокса при выводе из шихты 1 кг сырого известняка, равной 0,42 кг при замене его порошкообразной известью и 0,28 кг при замене металлургическим шлаком. Полученные результаты хорошо согласуются с опытными данными. Достигнутая экономия кокса в опытных периодах по сравнению с базовым при сохранении температуры жидких продуктов плавки на одинаковом уровне составила 15,3 кг/т чугуна при замене сырого известняка вдуваемой порошкообразной известью и 10,2 кг/т чугуна при замене вдуваемым металлургическим шлаком. Соответствующие показатели, определенные расчетным путем, равны 14,5 кг/т чугуна и 9,7 кг/т чугуна. При проведении опытных ваграночных плавков с вдуванием в горн порошкообразных высокоосновных материалов, заменяющих кусковый известняк, нагружаемый сверху, отмечалось улучшение процесса шлакообразования и реализовывалась возможность оперативной корректировки основности шлака.

В работе рассматривается вариант эффективного использования дисперсных железосодержащих отходов производства путем вдувания их ниже уровня фурм шахтной печи газонесущей средой, обладающей восстановительным потенциалом по отношению к оксидам железа. В этом случае дисперсные железосодержащие отходы выполняют роль частичных заменителей кусковой металлической шихты, загружаемой сверху и по ходу ваграночной плавки в процессе синтеризования расплава чугуна, в том числе и с прямым аспектом, если железо в отходах присутствует в окисленном состоянии. Указанная организация ваграночного процесса создает зону, расположенную ниже уровня воздушных фурм, где возможна металлизация железа и образование жидких продуктов из дисперсных отходов с разделением их на две фазы: металлическую и шлаковую. Газовая среда, в которой восстановительный потенциал оказался неисчерпанным за счет окисления кислородом дисперсных отходов, поднимаясь до

уровня фурм, сгорает и отдает тепловую энергию ваграночному процессу.

Были проведены опытные ваграночные плавки с вдуванием в горн бигхаузной пыли в потоке природного газа, соотношение между которыми составляло $1 \text{ кг} : 1 \text{ м}^3$, а также прогнозные расчёты на основе разработанного комплексного метода эффективности данного мероприятия. Анализ полученных и находящихся в хорошем согласии между собой экспериментальных и расчётных результатов привел к следующим техническим показателям эффективности: коэффициент замены металлического компонента шихты, загружаемого сверху, в виде смеси чугунов пылегазовой смесью составлял $0,58-0,61 \text{ кг/м}^3$; расход флюса увеличился на $0,03-0,04 \text{ кг}$ при вдувании 1 м^3 пылегазовой смеси, так как содержание свободных оснований в смеси чугунов больше; расход стального лома уменьшился на $0,05-0,06 \text{ кг}$, так как избыток углерода в смеси чугунов больше; расход ферросилиция уменьшился на $0,0011-0,0035 \text{ кг}$, так как недостаток кремния в смеси чугунов больше; расход ферромарганца уменьшился на $0,01-0,03 \text{ кг}$, так как в пылегазовой смеси марганец содержится в избытке, а в смеси чугунов - в недостатке. Примечательным является тот факт, что вдувание бигхаузной пыли, содержащей окисленное железо, в соотношении 1 кг/м^3 природного газа не вызвал увеличения расхода кокса, но наоборот, в силу положительного значения теплового эквивалента пылегазовой смеси, расход кокса уменьшился на $0,25-0,27 \text{ кг}$.

Глава 2 посвящена утилизации дисперсных железосодержащих отходов в специализированных электротермических процессах приготовления расплава чёрных металлов. Принципиальная схема технологического процесса утилизации дисперсных железосодержащих отходов машиностроения и плавильного агрегата представлены на рис. 1.

Исходными материалами для осуществления указанного процесса являются исключительно железосодержащие дисперсные отходы производства, в которых железо и другие элементы присутствуют как в окисленном, так и в восстановленном состоянии. Предложенная технологическая схема утилизации предусматривает получение расплава чёрных металлов путем синтеза его из необходимых элементов, присутствующих в дисперсных отходах. Начальной стадией технологического процесса является получение смеси дисперсных отходов в таком соотношении между собой, чтобы на заключительном этапе получались жидкие продукты плавки с заданными характеристиками по составу и свойствам. Жидкой составляющей смеси служат водные растворы поваренной соли и отработанного травителя медных плат на основе хлорного железа. Из полученной смеси формуруются гранулы, которые в процессе сушки приобретают конструктивную прочность ($\sigma_{\text{сж}}$ до 30 МПа), достаточную для осуществления транспортных операций по доставке их в плавильный агрегат. Упрочнение гранул обусловлено: 1) окислительными процессами присутствующего в них железа с образованием золя $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, переходящего в процессе сушки в гелеобразное состояние, и восстановленной мелкодисперсной меди; 2) физико-химическими превращениями образующегося при контакте жёёной извести с водой гидроксида кальция; 3) установленным нами наличием

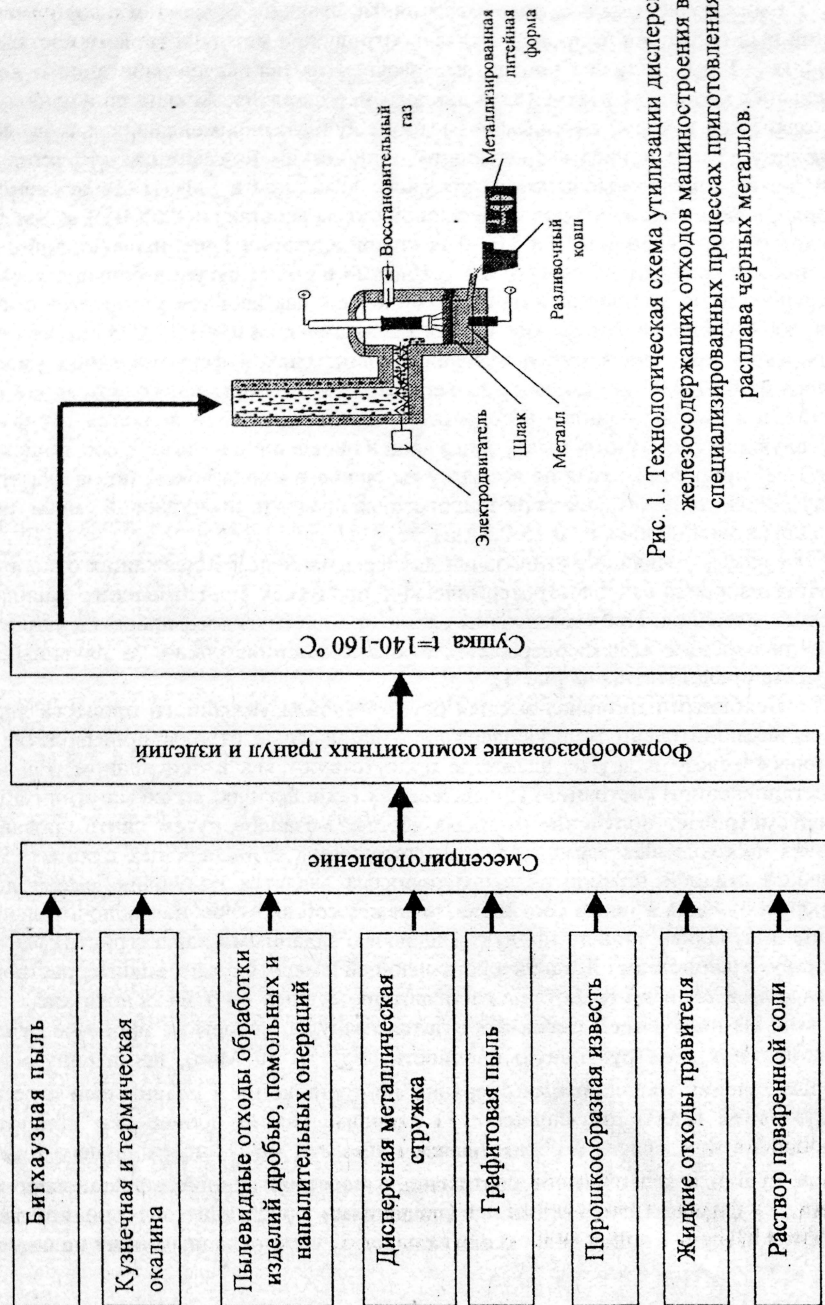


Рис. 1. Технологическая схема утилизации дисперсных железосодержащих отходов машиностроения в специализированных процессах приготовления расплава чёрных металлов.

вяжущих свойств у бигхаузной пыли, обусловленных оксидным и фазовым составом, соответствующим силикацементу.

Далее композитный материал попадает в плавильный агрегат, в котором протекают следующие физико-химические превращения: нагрев материала до температур порядка 1073-1273 К, металлизация окисленных элементов, плавление с образованием двух жидких фаз (шлаковой и металлической) и их перегрев. Благодаря указанным процессам синтезируется металлический расплав за счёт восстановленных в плавильном агрегате элементов в составе гранульной композиции из твёрдой и жидкой фаз. Твердофазная цементирующая металлизация основы расплава чёрных металлов (железа) осуществляется в противоточном реакторе плавильного агрегата газовой фазой, обладающей восстановительным потенциалом по отношению к оксидам железа и углеродным по отношению к восстановленному железу.

Композитный продукт, прошедший физико-химико-термическую обработку в противоточном реакторе, посредством вращения шнека попадает в жидкую ванну плавильного агрегата, в которой под воздействием трансформированной в тепло электрической энергии, выделяющейся при дуговом разряде и прохождении постоянного электротока через шлаковую фазу, протекают процессы плавления гранульной композиции с распределением её между двумя жидкими металлической и шлаковой фазами, жидкофазной металлизации, в результате которой восстанавливаются такие примеси расплава чёрных металлов, как кремний, марганец, алюминий, магний, и перегрева жидких продуктов плавки. Жидкофазная металлизация элементов протекает за счёт вводимого в ванну боя графитовых электродов, а также электролизных процессов благодаря катодной поляризации донного электрода и жидкой металлической фазы.

Для исследования особенностей протекания процесса синтеза расплава чугуна из дисперсных железосодержащих отходов был разработан и внедрён опытно-промышленный вариант плавильного агрегата с теоретическим обоснованием отдельных стадий технологического процесса в виде критерияльных моделей.

Лабораторные эксперименты по цементирующей металлизации различных композиций и влиянию на этот процесс технологических факторов дают основание утверждать, что каждая композиция в этом отношении уникальна. В этой связи для проектирования и управления технологическим процессом твердофазной противоточной цементирующей металлизации при прямом синтезировании расплава чугуна из дисперсных железосодержащих отходов разработана критериальная модель, при помощи которой можно прогнозировать технологические параметры реального процесса с учетом кинетических особенностей цементирующей металлизации данной разновидности материала, полученных в лабораторных исследованиях.

В основе критериальной модели лежат результаты лабораторных опытов по цементирующей металлизации стационарного слоя конкретной композиции. В качестве наполнительной части смеси использовались такие дисперсные железосодержащие отходы ОАО «КАМАЗ», как бигхаузная пыль производства серого и высокопрочного чугуна Камского литейного завода, кузнечная окали-

на, порошкообразные отходы железа при обработке изделий дробью. Полученные композиции представляют из себя капиллярно-пористые тела.

В работе установлена идентичная природа кинетики гетерогенных процессов металлизации и цементации, развивающихся в порах разных по составу композиций из дисперсных железосодержащих отходов, которые отличаются между собой по количественным и качественным параметрам пористого строения. Последнее обстоятельство определяет особенности диффузии газовых молекул в объёме пор и является причиной достаточно широкого разброса констант скоростей металлизации и цементации: $K_v = (5 - 23) \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ и $K_v' = (1,4 - 5,7) \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ соответственно. При этом кинетика обоих процессов описывается закономерностями реакций первого порядка, а при сопоставлении указанных констант скоростей обнаружена тесная прямолинейная связь между ними, характеризующаяся уравнением регрессии: $K_v' = 0,057 + 0,241 \cdot K_v$ с высоким значением коэффициента парной корреляции, равным 0,997.

Для того, чтобы результаты лабораторных опытов можно было использовать при рассмотрении реального объекта, необходимо sobлюсти идентичность условий процесса, а именно: температура и давление в реакционном пространстве, вид и состав исходной газовой фазы, расход её, отнесённый к единице массы железа. Последний фактор позволяет определить необходимые размеры элемента реальной конструкции реактора, например его длину при заданных величинах поперечного сечения, насыпной массы железа в металлизируемом материале и объёмного расхода газовой фазы. В сформированном таким образом элементе реального реактора будут наблюдаться те же кинетические закономерности цементирующей металлизации, что и в лабораторных условиях.

Анализ балансных уравнений скоростей процессов перемещения кислорода в составе гранульных композиций, газовой фазы и перехода между ними позволяет заключить, что количество остаточного кислорода, связанного с железом, в металлизируемом материале, покидающем реактор, зависит от концентрации углекислоты в исходном восстановительном газе и величины кинетического критерия противоточной металлизации, определяемым расходом металлизируемого материала. Чем выше указанные параметры, тем менее восстановленным оказывается материал. Максимально возможный скоростной режим работы противоточного реактора, при котором обеспечивается заданный уровень металлизации железа в гранульной композиции и исчерпание функциональных возможностей восстановительного газа, обуславливается определённым количеством элементов реактора. Нахождение указанного числа элементов реактора производится путём анализа результатов решения уравнений по определению количества связанного с железом кислорода, а также степени науглероживания восстановленного железа. Закономерности алгоритма составления уравнений следующие: 1) число совместно решаемых уравнений для определения количества связанного с железом кислорода (x , доля от исходного количества) в отдельных элементах реактора равно числу самих элементов; 2) любое уравнение из этого числа может быть составлено по схеме, в которой i номер элемента противоточного реактора:

$$K_x \cdot x_{i+1} = x_i \cdot \left[1 - \frac{1}{CO_2^f(x_i)} \cdot (CO_{2max} + K_x \cdot x_2 + \dots + K_x \cdot x_{i-1} + K_x \cdot x_i) \right]; \quad (1)$$

3) конструкция уравнений (1) такова, что составленная из них система решается путём последовательного выражения количества кислорода во всех элементах реактора через таковое в первом элементе. В итоге получаем полином относительно x_1 степени, определяемой по правилу 2^{n-1} , где n равно числу элементов противоточного реактора; 4) число совместно решаемых уравнений для определения степени науглероживания восстановленного железа (R) в отдельных элементах реактора равно числу самих элементов; 5) любое уравнение из этого числа может быть составлено по схеме:

$$R'_i = \frac{(1 - R'_{i+1} - R'_{i+2} - \dots - R'_n)}{K'_x} \cdot \left[1 - \frac{1}{CO_2^f} \cdot \frac{(CO_{2max} + K_x \cdot x_2 + K'_x \cdot x_3 + \dots + K_x \cdot x_{i+1} + K'_x \cdot R'_i + K'_x \cdot R'_2 + \dots)}{+ K'_x \cdot R'_{i-1}} \right] \quad (2)$$

В уравнении (2) $R'_{n+1} = 0$, а $x_{n+1} = 1$. При составлении системы уравнений следует учитывать те элементы реактора, в которых цементирующая способность газовой фазы (выражение в квадратных скобках) больше нуля.

Остальные символы в уравнениях (1) и (2) имеют следующий смысл: CO_{2max} - исходная концентрация углекислоты в рабочем газе; $CO_2^f(x_i)$ и CO_2^f - равновесные концентрации углекислоты при восстановлении железа с остаточным количеством кислорода x_i и при цементации восстановленного железа соответственно; K_x и K'_x - кинетический критерий противоточной металлизации и цементации соответственно (первый характеризует противоточный процесс с точки зрения соотношения интенсивностей перемещения кислорода в составе твёрдого материала по реактору и перехода его в газовую фазу в соответствие с кинетическими возможностями, второй определяет кинетические условия науглероживания восстановленного железа); K_x и K'_x - газовый критерий противоточной металлизации и цементации соответственно (первый характеризует процесс с точки зрения соотношения перемещения кислорода в составе твёрдого материала в одном направлении и газовой фазы в противоположном, второй определяет науглероживающую способность газовой атмосферы с точки зрения количества обрабатываемого железа).

Разработанная критериальная модель проверялась на адекватность результатов расчёта по модели и натурных экспериментов, проведенных на пилотном специализированном агрегате. Было получено, что отношение выборочных дисперсий, характеризующих ошибки модели и эксперимента, меньше табулированного значения критерия Фишера при надёжности 0,95. Это позволяет считать обе дисперсии статистически одинаковыми.

Плавильный агрегат для приготовления расплава чёрных металлов из дисперсных железосодержащих отходов является универсальным по разнообразию возможных вариантов проведения в нём металлургических операций и в том числе по виду используемого восстановителя. Выше были рассмотрены вопросы, связанные с металлизацией железа газообразным восстановителем. Такой режим работы имеет ограничение по производительности, так как увеличе-

ние скорости продвижения гранульной композиции по противоточному реактору вызовет рост остаточного количества кислорода в ней сверх заданного значения. Поэтому при повышении производительности специализированного агрегата в условиях технологических параметров, когда противоточный реактор не справляется с производством работы по металлзации железа, завершающая стадия металлзации последнего совершается жидкофазным восстановлением в шлаковой фазе плавильной ванны находящимся в ней твёрдым углеродом, например, боем графитовых электродов.

Следует отметить, что процесс жидкофазной металлзации железа протекает с более высокими скоростями по сравнению с твёрдофазным. В работе проведены эксперименты на пилотной установке специализированного агрегата по исследованию кинетики жидкофазной металлзации железа гранульной композиции с основностью 0,8 при температуре жидкой фазы 1773 К. По результатам экспериментов получено уравнение зависимости скорости (ϑ , $\text{кг Fe} / (\text{мин} \cdot \text{кг} \sum \text{MeO})$) перехода железа из шлаковой фазы в металлическую из 1 $\text{кг} \sum \text{MeO}$ (сумма масс всех оксидов, составляющих шлаковую фазу, кроме оксидов железа) от концентрации окисленного железа в шлаке ($(\text{Fe})_{\text{кг Fe} / \text{кг} \sum \text{MeO}}$):

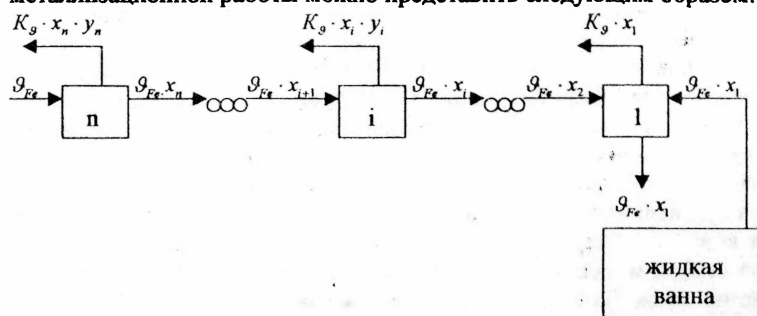
$$\vartheta = 0,498 \cdot (\text{Fe})^{1,57} \quad (3)$$

Численные значения константы скорости процесса и его порядка определялись минимизацией функции нескольких переменных методом покоординатного спуска Гаусса-Зейделя. Из приведенного уравнения следует, что процесс жидкофазной металлзации железа протекает с достаточно высокой скоростью. Расчеты периодов полупревращения показали, что в случае жидкофазной металлзации он равен $\tau_{0,5} = 0,6 \text{ мин.}$, в то время как при металлзации железа в твёрдой фазе $\tau_{0,5}$ колеблется в пределах 30-130 мин. в зависимости от особенностей пористой структуры гранульных композиций.

При работе специализированного плавильного агрегата в технологических условиях, когда процесс металлзации железа осуществляется в двух фазах, завершающая стадия этого процесса протекает в шлаковой фазе плавильной ванны. При этом, гранульная композиция, поступающая в плавильную ванну из противоточного реактора с недовосстановленным железом, является источником формирования жидких фаз, из которых шлаковая содержит столько окисленного железа, чтобы обеспечить необходимую скорость жидкофазной металлзации окисленного железа, равной массовому расходу последнего из противоточного реактора. Указанное количество окисленного железа определяется произведением следующих величин: массовым расходом общего железа в расчёте на 1 $\text{кг} \sum \text{MeO}$, остаточным количеством связанного с железом кислорода ($x_1 \cdot O_{\text{св}}$) относительно его содержания в FeO (0,286). Данное произведение увеличивается с повышением производительности специализированного плавильного агрегата, но до предельно возможного значения, определяемого по формуле (3) при концентрации окисленного железа в шлаке, равного таковому в исходной гранульной композиции. Этим определяется предельно возможная

производительность специализированного плавильного агрегата. Анализ технологических режимов работы пилотной установки с использованием газообразного восстановителя и боя графитовых электродов показал, что производительность специализированного агрегата в последнем случае при концентрации окисленного железа в шлаке, равной $(Fe)=0,3$ кг Fe/кг ΣMeO , выше, чем в первом в ~ 7 раз.

В работе решена задача о соотношении между собой процессов жидко- и твёрдофазной металлизации железа и влиянии на него технологических особенностей работы специализированного плавильного агрегата. Условную схему металлизационной работы можно представить следующим образом:



В данной схеме для каждого элемента противоточного реактора показаны потоки кислорода. Слева в элемент реактора кислород поступает в составе гранульной композиции $g_{Fe} \cdot x_{i+1}$ (g_{Fe} - расход железа, кг Fe / мин. · кг Fe в элементе). Под воздействием поступающего справа восстановительного газа происходит переход части кислорода гранульной композиции в газовую фазу в количестве $K_g \cdot x_i \cdot y_i$, зависящем от кинетической способности гранульной композиции к металлизации, определяемой константой скорости K_g , количества остаточного кислорода в ней x_i и металлизующей способности восстановительного газа y_i . Справа из элемента выходит поток кислорода в составе гранульной композиции, равный $g_{Fe} \cdot x_i$. Из уравнения баланса потоков кислорода определяется связанное с железом остаточное содержание кислорода гранульной композиции в элементе противоточного реактора:

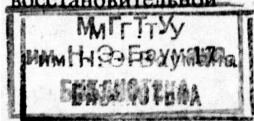
$$x_i = \frac{K_k \cdot x_{i+1}}{K_k + y_i} \quad (4)$$

и восстановительная способность газовой фазы, поступающей в этот элемент:

$$y_i = 1 - \frac{x_1 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_2 + x_3 \cdot y_3 + \dots + x_{i-1} \cdot y_{i-1}}{CO_2(x_i) \cdot K_k \cdot x_i}, \quad (5)$$

где $K_k = \frac{g_{Fe}}{K_g}$.

Полученные уравнения имеют безразмерный вид, что позволяет представить противоточный реактор в виде 1 элемента. В этом случае, обратившись к уравнению (5) и поставив условие о полном исчерпании восстановительной



способности газовой фазы, находим необходимую для этого величину кинетического критерия противоточной металлизации, которая определяется составом композиции и температурой в противоточном реакторе. Далее по уравнению (5) определяем величину x_1 , являющуюся массовой долей связанного с железом кислорода гранульной композиции, которая газифицируется в жидкой ванне твёрдым углеродистым восстановителем. Остальное количество кислорода ($1 - x_1$) газифицируется в противоточном реакторе газовым восстановителем..

Результаты проведенного анализа для различных композиций и температур в противоточном реакторе позволяют заключить, что при работе специализированного плавильного агрегата с использованием твёрдого углеродистого восстановителя, производящего жидко- и твёрдофазную противоточную металлизацию железа гранульной композиции из дисперсных отходов производства в условиях, когда газовая фаза полностью использует свою восстановительную способность по отношению к железу исходной гранульной композиции, металлизация последнего двумя указанными способами осуществляется в равных долях по количеству отнимаемого кислорода, если его количество в гранульной композиции обуславливает наличие фазового перехода $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leftrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$. По мере уменьшения количества связанного с железом кислорода, обуславливающего на начальной стадии металлизации фазовые переходы $\text{Fe}_3\text{O}_4 \leftrightarrow \text{FeO}$ и $\text{FeO} \leftrightarrow \text{Fe}$, долевое участие жидкофазной металлизации увеличивается тем интенсивнее, чем ниже температура в противоточном реакторе при наличии первого фазового перехода или чем выше температура в реакторе при наличии второго фазового перехода.

На пилотной установке были проведены опытные плавки на различных гранульных композициях и температурах в противоточном реакторе с целью проверки адекватности модельных представлений о развитии процессов жидко- и твёрдофазной противоточной металлизации железа твёрдым углеродистым восстановителем. Во всех случаях отношения выборочных дисперсий, характеризующих ошибку модели и эксперимента, были меньше табулированного значения критерия Фишера, что позволяет считать все дисперсии статистически одинаковыми, а разработанные модельные представления адекватными результатам эксперимента.

Одной из основных примесей в расплавах серых чугунов является кремний. Источником его при получении чугуна в разработанном специализированном плавильном агрегате в отличие от традиционных способов плавки является кремнезём гранульных композиций из дисперсных железосодержащих отходов машиностроительного комплекса. В плавильной ванне специализированного агрегата происходит жидкофазное восстановление кремния из шлака присутствующим в нём боем графитовых электродов. В данной работе проводились исследования по влиянию основности гранульной композиции ($b = \frac{(\text{CaO} + \text{MgO})}{\text{SiO}_2} = 0,5 - 1,2$) и температуры процесса ($T = 1773$ и 1873 К) на содержание кремния в выплавляемом чугуне (рис 2). По результатам исследования получены следующие уравнения регрессии: $[\text{Si}] = 2,3 - 0,84 \cdot b$, $r = 0,993$ (при

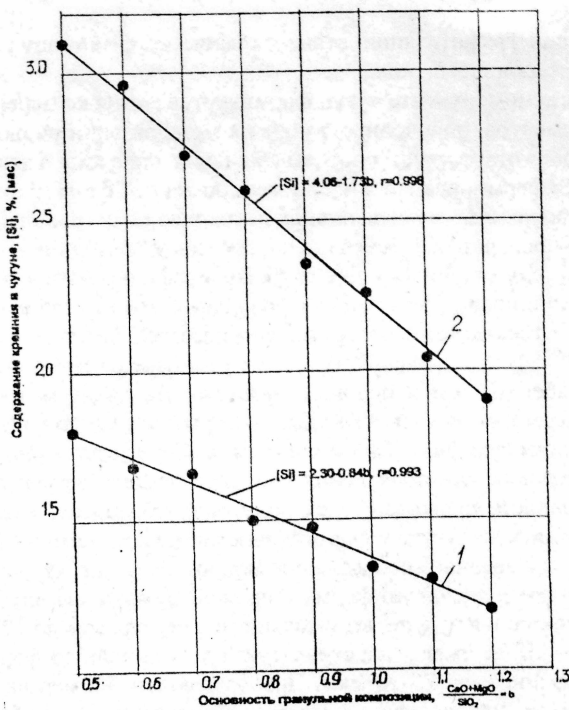


Рис. 2. Зависимость содержания кремния в чугунах от основности гранулярной композиции при температурах жидких фаз в плавильной ванне 1773 К (1) и 1873 К (2).

$T=1773 \text{ K}$) и $[Si] = 4,06 - 1,73 \cdot b$, $r = 0,998$ (при $T=1873 \text{ K}$). Таким образом, в исследованных пределах факторами, благоприятствующими переходу кремния в чугун, являются уменьшение основности гранулярной композиции и повышение температуры жидких фаз. Причём, влияние последнего фактора при меньших значениях основности несколько сильнее. Кажущаяся энергия активации перехода кремния в чугун при $b=0,5$ составила 144 кДж/моль, а при $b=1,2$ она уменьшилась до 133 кДж/моль.

Разработанный специализированный плавильный агрегат наряду с тем, что позволяет утилизировать дисперсные железосодержащие (в том числе и окисленное железо) отходы машиностроения, обладает и другой положительной особенностью, заключающейся в получении качественных серых чугунов с компактными формами графитных включений. Данная особенность основывается на том, что 1) выплавленный металл из-за наличия во всех фазах специализированного агрегата восстановительного потенциала и чистоты гранулярных композиций относительно поверхностно-активных веществ содержит их в малых количествах; 2) условия плавки в специализированном агрегате соответствуют тем, которые необходимы для удовлетворения термодинамического кри-

терия компактной графитизации в виде химического потенциала углерода в упорядочениях карбидного типа.

В предлагаемом агрегате чугуна формируется в высоко перегретой шлаковой фазе из элементов, полученных путём их металлизации из окисленного состояния. Поэтому отсутствует проблема влияния «плохой» наследственности шихты. Процесс формирования жидкой металлической фазы происходит «дождевым» способом, то есть из падающих в шлаковую фазу гранул. При этом благодаря развитой поверхности между каплеобразным состоянием чугуна и шлаковой фазой создаются условия для глубокого рафинирования металла. Перегрев жидких фаз в плавильной ванне таков, что он перекрывает первый и второй пороговые эффекты температурных зависимостей физических свойств расплавов чугуна. Эффект шлаковой обработки усиливается действием электрической дуги в особенности при использовании как это предусмотрено в предлагаемом нами агрегате постоянного тока, который к тому же протекает через жидкую металлическую фазу. Таким образом, в обсуждаемом плавильном агрегате созданы условия для проявления синергетического эффекта температурной, термовременной, шлаковой, электродуговой обработок, воздействующих на склонность расплава чугуна к формообразованию компактного графита.

В работе проведены исследования микроструктуры чугуна в образцах, полученных литьём в песчаную форму с приведенной толщиной 2 мм (рис. 3). Графитные включения в чугуне, выплавленном с перегревом до 1773 К (ПГф1 – ПГр1 – ПГд45 – ПГ6), имеют пластинчатую прямолинейную форму с длиной, колеблющейся в пределах 25-90 мкм. Преобладающий размер включений графита равен 45 мкм. Распределение его в структуре чугуна в основном равномерное с междендритным оттенком. Количество включений графита оценивается 6 %.

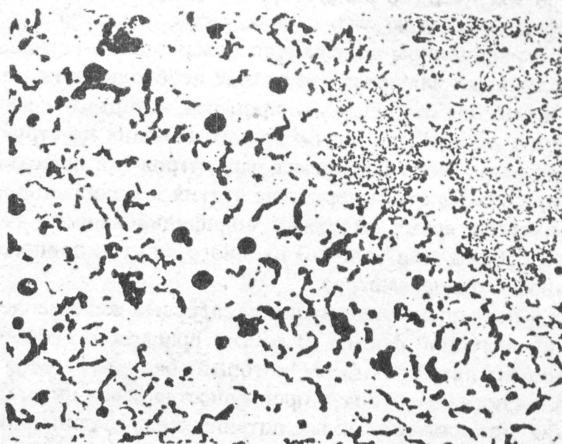
Более высокий перегрев жидкого чугуна в процессе плавки (1873 К) при вводит к изменению графитной структуры (ВГф2 (60) – ПГф1,2 (25) – ШГф4 (15) – ВГр1 – ПГр1 – ШГр1 – ВГд90 – ПГд15 – ШГд15,30). Преобладающей (≈60 %) формой включений графита является вермикулярная извилистая. Этот графит представлен в структуре в виде равномерно распределённых и изолированных включений. В структуре наблюдается также шаровидная и пластинчатая форма графитных включений, доля которых составляет соответственно ≈15 и 25 %. Причём, характер пластинчатой формы графитных включений существенным образом изменился. Оставаясь по форме прямолинейным и завихрённым, резко изменился размер включений (≤15 мкм) с междендритным распределением в виде колоний и точек. Шаровидный графит имеет правильную форму с диаметром равномерно распределённых включений 15-30 мкм. Кроме того, имеются в структуре и скопления мелких включений.

При перегреве жидкого чугуна в указанных выше пределах наблюдаются изменения в перлитной металлической основе в сторону увеличения её дисперсности, характеризующейся следующими средними значениями расстояния между пластинами цементита: 1 мкм при перегреве жидкого чугуна до 1773 К и 0,7 мкм при перегреве до 1873 К.

Отмеченные выше особенности формообразования графита в чугуне в



а



б

**Рис. 3. Микроструктура чугуна, полученного в специализированном плавильном агрегате из дисперсных железосодержащих отходов при перегреве жидкого металла до 1773 К (а) и 1873 К (б). Шлиф не травлен:
а - $\times 200$; б - $\times 100$.**

процессе его кристаллизации без модифицирующей обработки обусловлены составом исходных шихтовых материалов и совокупным влиянием комплекса внутри печных мероприятий, имеющих место в специализированном агрегате.

В работе предложена также стабильная и экономичная технология образования компактных форм графита, основанная на быстром охлаждении в литейной форме жидкого чугуна, соответствующего по составу серому с достаточно высоким содержанием кремния и без претензий к ограничению содержания поверхностно-активных элементов, так, чтобы произошёл его отбел с последующей кратковременной (≈ 2 часа) изотермической выдержкой с литейного нагрева при температуре 1223-1273 К для осуществления 1 стадии графитизации цементита. На рис.4 представлены микроструктуры чугуна с характерными формами графитных включений, полученными в результате различных режимов охлаждения.

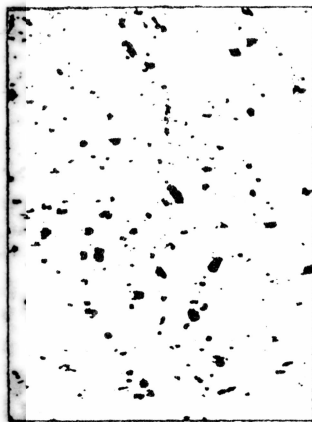
Предлагаемая технология получения компактных форм графитных включений в серых чугунах выгодно отличается от известных технологий производства высокопрочных чугунов с шаровидным и «вермикулярным» графитом на основе графитизирующего и сфероидизирующего модифицирования специально подготовленного жидкого расплава чугуна с заданной температурой и составом при ограниченном содержании поверхностно-активных элементов. Основными отличиями являются отсутствие необходимости в применении модификаторов и высокая стабильность процесса, которая в известных технологиях проблематична по причине значительного влияния на структуру получаемого чугуна многофакторного комплекса параметров (химический состав чугуна и модификатора, температура перегрева чугуна и модифицирования, размер частиц модификатора, время выдержки модифицированного чугуна), что требует тщательного соблюдения условий входного, внутри процессного и выходного контроля множества параметров.

Глава 3 посвящена утилизации дисперсных железосодержащих отходов в изготовлении литейной формы. В работе предложен способ изготовления металлизированных литейных форм, который соединяет в себе простоту технологии получения песчаных форм и преимущества перед ними металлических. Для изготовления металлизированных литейных форм применяются те же смеси, что и для получения гранульных композиций. Высушенная и упрочнённая благодаря тем же механизмам, что и в композитных гранулах, литейная форма подвергается восстановительному обжигу, в процессе которого она приобретает необходимую прочность и высокую тепловую активность. Эти важные для литейной формы качества приобретаются ею в результате протекания двух процессов: восстановления оксидов железа, благодаря которому происходит металлизация литейной формы с повышением ее тепловой активности, и спекания частиц, приводящего к упрочнению формы. Были проведены исследования механической прочности композиций из бигхаузной пыли и чугунной стружки на различных технологических этапах и фазового состава на рентгеновской установке ДРОН-4.

Металлизированные литейные формы в силу низкой их стоимости, обусловленной особенностями технологии изготовления, а также использованием



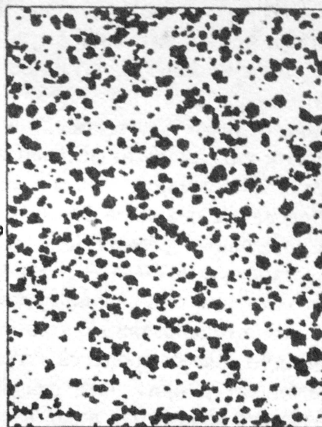
а



б



в



г

Рис. 4. Микроструктура чугуна:

а, б - в литом состоянии при затвердевании в песчаной форме и металлизированной в среде расплава соли соответственно; в, г - после изотермической выдержки в расплаве соли длительностью 40 мин. и 2 часа соответственно. а, б - $\times 200$; в, г - $\times 150$

исходных материалов в виде дисперсных железосодержащих отходов, могут найти своё применение в отличие от кокиля не только в массовом, крупносерийном, но и в мелкосерийном, опытно-промышленном производстве качественных отливок. В работе были проведены исследования по определению стойкости металлизированной литейной формы при литье различных сплавов, которая определяется десятками (сталь) и десятками тысяч (цинковые и алюминиевые сплавы) отливок.

Получение отливок с качественной структурой металла обуславливается высокой тепловой активностью металлизированной формы. В работе проведены исследования тепловых свойств металлизированной формы и влияния их на процесс затвердевания реальной отливки в сравнительном варианте с получением отливок в песчаных формах. Определение тепловых характеристик производилось на установках ИТ-А-400 и ИТ-С-400, позволяющих измерять теплопроводность и теплоёмкость соответственно. Была разработана также теплообменная модель взаимодействия отливки и литейной формы, которая позволяет иметь информацию о ходе процесса затвердевания отливки с изохронами распределения температур при учёте реальной конфигурации отливки, наличия перегрева литейного сплава над ликвидусом, кристаллизации литейного сплава в интервале температур, существования зазора между отливкой и формой.

Решение тепловой задачи основано на использовании классических уравнений Стефана-Шварца, полученных ими для одномерного пространства теплового взаимодействия двух полу бесконечных тел, несмотря на то, в задаче рассматривается отливка с реальной конфигурацией. Такой подход обусловлен существованием как в отливке, так и в форме поверхностей с одинаковыми температурами. Указанные изотермические поверхности ортогональны линиям теплового потока, которые имеют различные длины, но разделены на одинаковое число частей изотермическими поверхностями. Таким образом, в системе отливка — форма имеют место линии теплового потока с различными протяжённостью и направлением. Однако, благодаря существованию изотермических поверхностей все линии теплового потока одинаковы по длине, если за её единицу выбрано расстояние между соседними изотермами, хотя протяжённость этой единицы различна не только среди линий теплового потока, но и в пределах одной линии. В связи с этим решение одномерной задачи о распределении температуры во времени и по длине линии теплового потока даёт представление о теплообмене между отливкой и формой и о процессе затвердевания отливки. Определение конфигурации изотермических поверхностей и расстояния их до теплового центра в отливке производится при помощи натурального эксперимента по частичному оплавлению или растворению моделей отливки и формы, выполненных из соответствующих материалов, например, из воска, парафина и модельного сплава, применяемого в технологии точного литья, а также различных солей. В результате этих операций обнажаются изотермические поверхности. Произведя замер величины объёма частично сплавившейся модели и её поверхности, определяют расстояние изотермической поверхности до теплового центра. Это расстояние равно приведенному размеру, получаемому делением объёма модели на её поверхность. В итоге имеем длину линии тепло-

вого потока, разбитую на отдельные участки, которая выступает в роли пространственной координаты в уравнениях Стефана-Шварца. Правомерность указанных операций в определении величины линии теплового потока основывается на физической и геометрической идентичности явлений теплопереноса, растворения и плавления тел сложной формы. Согласно обобщённым феноменологическим закономерностям Р. Хаазе и Л. Онзагера, для термодинамических систем, характеризующихся экстенсивными и интенсивными параметрами в виде заряда и потенциала, вне зависимости от конкретных форм движения, поток заряда определяется коэффициентом проводимости и градиентом или напором потенциальной величины, которая, помимо всего прочего, определяется, согласно закономерностям Лапласа и Томсона, геометрической формой поверхности так, что в сравнении с плоской она выше над выпуклой и ниже над вогнутой поверхностью.

В главе 4 приводится сравнительный анализ качества отливок и эксплуатационных свойств изделий из них, при получении которых использовался расплав, приготовленный по базовой технологии из стандартных шихтовых кусковых материалов и по альтернативной методом прямого синтеза в специализированном электротермическом плавильном агрегате из дисперсных отходов машиностроения.

Указанный анализ проводился на примере следующих отливок: поршневые маслосъёмные и компрессионные кольца, седла клапанов, вставка штампа для получения поковок вилки карданного вала. Данные отливки производятся в ОАО «КАМАЗ» (первые три - в ОАО «Камский литейный завод», последняя четвёртая - в ОАО «Камский кузнечный завод»). Для приготовления расплавов (серый специальный чугу́н (поршневое маслосъёмное кольцо), высокопрочный специальный чугу́н (поршневое компрессионное кольцо), молибденистый специальный чугу́н (седла клапанов), сталь 3Х5МФНСЛ (вставка штампа)) по альтернативному варианту методом прямого синтеза использовались следующие дисперсные отходы заводов ОАО «КАМАЗ»: бигхаузная пыль, кузнечная окалина, порошкообразные отходы железа при обработке изделий дробью, пылевидные отходы дробления ферросиликомагнелиевой лигатуры, графитовая стружка, молибденовый шлам, дисперсный хромистый отход электролитического хромирования поршневых колец, отработанный катализатор КЗА-ЗА, жидкий отработанный травитель медных плат на основе хлорного железа. Результаты сравнительного анализа качества опытных партий отливок и эксплуатационных свойств изделий из них показали:

Поршневое маслосъёмное кольцо - изменилась форма графитных включений с гнездообразной и пластинчатой завихрённой на червеобразную извилистую с небольшим количеством (~8 %) шаровидного графита. Такое улучшение формы графитных включений произошло без применения модификаторов путём обработки жидкого синтезируемого металла комплексом внутри печных факторов, имеющих место в специализированном электротермическом плавильном агрегате. В связи с этим возросли механические свойства колец: условный модуль упругости с $97,4 \cdot 10^9$ Па (базовый вариант приготовления расплава) до $123 \cdot 10^9$ Па (альтернативный вариант приготовления расплава); предел

прочности при изгибе с $41,2 \cdot 10^7$ Па (базовый вариант приготовления расплава) до $53,8 \cdot 10^7$ Па (альтернативный вариант приготовления расплава).

Поршневое компрессионное кольцо - микроструктура и механические свойства колец идентичны. Однако, требуемый уровень качества колец при альтернативном варианте приготовления расплава был обеспечен без обработки жидкого металла в ковше графитизирующими и сферондизирующими модификаторами за счёт комплекса внутри печных мероприятий и организации технологического процесса плавки гранульных композиций, обеспечившей получение расплава заданного химического состава, включая магний на уровне 0,04 %, с низким содержанием поверхностно активных элементов.

Сёдла клапанов - твёрдость металла и его структура в литом и термообработанном состоянии идентичны.

В ОАО «КАМАЗ-Дизель» были проведены сравнительные испытания на безотказность в течение 800 часов двигателей КАМАЗ-740.11-240, укомплектованными тремя указанными выше изделиями из отливок, полученных из приготовленных по двум технологическим вариантам (базовому и альтернативному) расплавов. Анализ результатов испытания двигателей показал идентичность характеристик качества деталей в отношении надёжности работы двигателей.

Вставка штампа для получения поковок вилки карданного вала - улучшилась макроструктура металла, которая характеризовалась по сравнению с литой вставкой, полученной по базовому варианту технологии, плотным строением, отсутствием неметаллических фаз, междендритной пористости и дендритной направленности. Это привело к повышению ударной вязкости металла вставки, прошедшей весь цикл термообработки, с $a_{n_{293}} = 0,24$ МДж/м² и $a_{n_{573}} = 0,36$ МДж/м² до $a_{n_{293}} = 0,38$ МДж/м² и $a_{n_{573}} = 0,61$ МДж/м². В ОАО «Камский кузнечный завод» были проведены испытания эксплуатационной стойкости литых вставок, полученных из расплавов, приготовление которых осуществлялось по базовому и альтернативному вариантам. Было установлено, что альтернативный вариант приготовления расплава привёл к увеличению эксплуатационной стойкости литых вставок до 6756 поковок, в то время как при базовом варианте приготовления расплава эксплуатационная стойкость литых вставок была на уровне 4189 поковок.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены технологические решения по утилизации дисперсных отходов производства путем их вдувания на различных горизонтах в горн вагранки. При этом дисперсные отходы производства, принимая участие в ваграночном процессе без какой-либо сложной предварительной обработки, заменяют компоненты топливной, флюсовой и металлической частей кусковой шихты, загружаемой сверху.

2. На основе разработанного комплексного метода расчёта технических показателей ваграночного процесса с комбинированным дутьем предложена

прогнозная методика определения эффективности и факторов, на неё влияющих, замены компонентов топливной, флюсовой и металлической частей кусковой шихты, загружаемой сверху, вдуваемыми в горн дисперсными отходами производства.

3. Разработана концепция, схема технологического процесса и специализированный плавильный агрегат на постоянном токе с электродуговым нагревом прямого действия для приготовления расплава чёрных металлов из гранульных композиций, состоящих из дисперсных железосодержащих отходов машиностроения, с осуществлением процессов жидко-и твердофазной противоточной цементирующей металлизации необходимых для синтезирования расплава элементов.

4. Установлена склонность расплавов серых чугунов, приготовленных в разработанном специализированном плавильном агрегате из дисперсных железосодержащих отходов, к метастабильной кристаллизации с увеличивающимся переохлаждением по мере повышения перегрева расплава. Эти обстоятельства обуславливают образование компактных форм графита и измельчение структуры металлической матрицы без воздействия модификаторов на расплав посредством совокупного влияния внутри печных факторов обработки жидкого металла: температурного, термовременного, шлакового, электродугового и электрокоткового.

5. Разработан технологический процесс изготовления металлизированной литейной формы из дисперсных железосодержащих отходов машиностроения и исследованы прочностные характеристики композиций на разных стадиях технологического процесса изготовления металлизированной литейной формы, а также её эксплуатационные и тепловые характеристики.

6. Проведен сравнительный анализ кинетических закономерностей теплового взаимодействия отливки и металлизированной литейной формы путем численного решения задачи о затвердевании отливки в совокупности с экспериментальными исследованиями тепловых характеристик материалов взаимодействующих тел и термографирования затвердевшего расплава чугуна. Данный анализ показал, что металлизированная литейная форма значительно превосходит по тепловой активности песчаную (критерий тепловой активности соответственно равен 0,64 и 0,11.) и приближается по этой характеристике к металлической.

7. Предложен технологический процесс получения отливок из серого чугуна с компактной формой графитных включений путем заливки в металлизированную литейную форму, находящуюся в среде расплавленной соли, жидкого металла с закалкой его из жидкого состояния. Эти мероприятия обуславливают метастабильную кристаллизацию с образованием аустенитно-цементитной структуры белого чугуна, в котором при изотермической выдержки с литейного нагрева при температуре 1223-1273 К в течение двухчасового периода происходит процесс разложения цементита с образованием компактных форм графита.

8. Внедрение результатов исследования в ОАО «КАМАЗ» показало, что не утилизируемые отходы дисперсного вида заводов указанного машинострои-

тельного комплекса с присутствием в них элементов в окисленной и восстановленной форме могут быть использованы в технологическом процессе литья на этапах приготовления расплава в специализированном электротермическом плавильном агрегате и изготовления металлизированной литейной формы для получения качественных фасонных отливок и работоспособных изделий из них (акты испытаний поршневых маслосъемных и компрессионных колец, сѐдел клапанов в ОАО «КАМАЗ — Дизель» и литых вставок штампа для получения поволоков вилки карданного вала в ОАО «Камский кузнечный завод» приведены в приложении к диссертации).

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Сафронов Н.Н., Горбенко Н.М. Расчет эффективности применения угольной пыли в ваграночном процессе // Рукопись деп. в институте "Черметинформация" № 3Д/970, 1980. БУ ВИНТИ "Депонированные научные работы". - 1981.-№ 2. - С. 99. - 9 с.
2. Сафронов Н.Н., Андронов В.Н. Об эффективности вдувания угольной пыли в горн вагранки // Литейное производство. - 1982. - № 1. - С. 29.
3. Сафронов Н.Н., Козлов В.И. Значение литейной технологии в ремонтном производстве // Тез. докл. Брянской областной научно-производственной конференции. – Брянск, 1983. - С. 155-156.
4. Сафронов Н.Н. Об эффективности замены в ваграночном процессе сырого известняка порошкообразной известью // Литейное производство. - 1984. - № 5. - С. 36.
5. Сафронов Н.Н., Герасимов Л.А., Шакин Н.М. Эффективность вдувания дополнительного топлива через фурмы вагранки // Литейное производство. - 1985. - № 8. -С. 28-29.
6. Колесников М.С., Трошина Л.В., Сафронов Н.Н. Влияние параметров литья и окончательной термообработки на ударную вязкость и теплостойкость стали 2Х5М2ФЛ // Современные технологические процессы получения высококачественных отливок. Повышение стойкости литейной оснастки и режущего инструмента: Тез. докл. межреспубликанского научно-практического семинара литейщиков. – Чебоксары, 1987. - С. 58-59.
7. Сафронов Н.Н. Алгоритм расчета технических показателей ваграночной плавки на комбинированном дутье // Применение ЭВМ для разработки технологических процессов литья, проектирования оснастки и анализа качества отливок: Тез. докл. зональной научно-технической конференции. – Ярославль, 1987. - С. 124-125.
8. Сафронов Н.Н., Козин В.А., Фролов С.М. Математическая модель процесса затвердевания литейного сплава в многослойной форме // Научно-производственные и социально-экономические проблемы производства автомобиля "КАМАЗ": Тез. докл. VI Республиканской научно-технической конференции КАМАЗ-КамПИ. - Набережные Челны. - 1988. - С. 50.
9. Сафронов Н.Н., Козин В.А., Якобсон А.И. Оценка возможности повышения производительности кокильных машин // Научно-производственные и

социально-экономические проблемы производства автомобиля "КАМАЗ": Тез. докл. VI Республиканской научно-технической конференции КАМАЗ-КамПИ. - Набережные Челны, 1988. - С. 56.

10. Сафронов Н.Н., Козин В.А., Якобсон А.И. Повышение стойкости кокилей путем физико-химической обработки формообразующей поверхности // Интенсификация технологических процессов в литейном производстве: Тез. докл. региональной научно-технической конференции. - Барнаул, 1988. Часть I. - С. 89.

11. Колесников М.С., Трошина Л.В., Сафронов Н.Н. О влиянии параметров кристаллизации на ударную вязкость и распределение легирующих элементов в литых штамповых сталях // Интенсификация технологических процессов в литейном производстве: Тез. докл. региональной научно-технической конференции. - Барнаул, 1988. Часть II. - С. 75.

12. Сафронов Н.Н., Козин В.А. Совершенствование технологии получения алюминиевых отливок в кокиль в условиях массового производства // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов: Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции. - Одесса, 1988. - С. 68-69.

13. А.С. 1575103 СССР, МКИ G 01 N П/14. Устройство для измерения скорости кристаллизации расплава / М.С. Колесников, Н.Н. Сафронов, А.И. Якобсон, Д.А. Новоселов, В.В. Малахов (СССР). - № 4494702/31-02; Заяв. 15.07.88; Опубл. 30.06.90, Бюл. № 24.

14. Сафронов Н.Н., Козин В.А. Расчет процесса затвердевания сплава в многослойной форме // Проблемы производства отливок: производительность, качество, экономия: Тез. докл. XV научно-практической конференции литейщиков Западного Урала. - Пермь, 1989. - С. 25-27.

15. Валиев Р.А., Сафронов Н.Н., Козин В.А. Структурно-фазовые изменения в бихаузной пыли при спекании // Наука - производству: Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции, посвященной 10-летию КамПИ. - Набережные Челны, 1990. - С. 27.

16. Сафронов Н.Н., Козин В.А. Изготовление элементов литейной оснастки на основе отходов металлургического производства // Охрана труда и прогрессивные технологические процессы в литейном производстве, порошковой металлургии и машиностроении: Тез. докл. межреспубликанской научно-практической конференции. - Чебоксары, 1990. - С. 172.

17. Валиев Р.А., Сафронов Н.Н., Чистяков В.А. Фазовые превращения при спекании металлургической пыли на основе оксидов железа // Прикладная Мессбауэровская спектроскопия: Тез. докл. Всесоюзной конференции. - Казань, 1990. - С. 8.

18. Сафронов Н.Н., Козин В.А. Экономичная технология ремонта кокилей // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов: Тез. докл. II Республиканской научно-технической конференции. - Одесса, 1990. - С. 8-9.

19. А.С. 1723179 СССР, МКИ С 22 С 35/00. Сплав для раскисления и легирования стали / О.Ю. Столяр, М.С. Колесников, В.И. Гусев, Н.Н. Сафронов (СССР). - № 4872450/02; Заяв. 05.06.90; Опубл. 30.03.92, Бюл. № 12.

20. Сафронов Н.Н., Козин В.А. Физико-математическая модель затверде-

вания сплавов в сложных условиях теплоотвода // Известия вузов. Черная металлургия. - 1991. - № 2. - С. 67-70.

21. Сафронов Н.Н. Математическое моделирование теплового взаимодействия отливки и формы в сложных условиях теплоотвода // Рукопись деп. в ВНИИТЭМР № 234 - мш 90, 1991. БУ ВИНТИ "Депонированные научные работы". - 1991. - № 4. - С. 74. - 25 с.

22. Сафронов Н.Н., Колесников М.С. Механическая прочность композита из отходов металлургического и механообрабатывающего производств // Рукопись деп. в ВНИИТЭМР № 117 - мш 91, 1992. БУ ВИНТИ "Депонированные научные работы". - 1992. - № 3. - С. 58. - 9 с.

23. А.С. 1773555 СССР, МКМ В 22 D 27/02. Способ получения литой формообразующей оснастки / Н.Н. Сафронов, В.А. Козин, А.И. Якобсон, А.Г. Хасанов (СССР). - № 4700286/02; Заяв. 05.06.89; Опубл. 07.11.92, Бюл. № 41.

24. Сафронов Н.Н., Томасов Н.Ю., Черныльцев В.П. Газопроницаемость пористых сред // Рукопись деп. в ВНИИТЭМР № 93 - мш 92, 1993. БУ ВИНТИ "Депонированные научные работы". - 1993. - № 2/3. - 42 с.

25. Сафронов Н.Н., Козин В.А. Получение ферромолибдена из дисперсных отходов производства // Проблемы комплексного использования руд: Тез. докл. 1-го Международного Симпозиума. - Санкт-Петербург, 1994. - С. 368.

26. Сафронов Н.Н., Карих Ф.Г. Способ утилизации дисперсных отходов производства // Методы исследования, паспортизации и переработки отходов: Тез. докл. II Межгосударственной научно-практической конференции. - Пенза, 1994. Часть II. - С. 16-17.

27. Карих Ф.Г., Сафронов Н.Н. О возможности контроля плавки стружки металла по составу отходящего дыма // Методы исследования, паспортизации и переработки отходов: Тез. докл. II Межгосударственной научно-практической конференции. - Пенза, 1994. Часть II. - С. 18-19.

28. Сафронов Н.Н. Моделирование тепловых процессов при затвердевании реальной отливки // Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии: Тез. докл. VI Международной научно-технической конференции. - Ижевск, 1994. - С. 76-78.

29. Патент 2007466 РФ, МПК 5 С 21 С 1/00. Способ получения чугуна с вермикулярным графитом / Н.Н. Сафронов, В.А. Козин, О.Ю. Столяр, А.И. Якобсон (РФ). - № 4908419/02; Заяв. 05.02.91; Опубл. 15.02.94, Бюл. № 3.

30. Сафронов Н.Н. Получение литейных чугунов из дисперсных отходов производства // Литейное производство. - 1995. - № 4-5. - С. 15.

31. Патент 2043820 РФ, МПК 6 В 22 С 1/18: Смесь для изготовления литейных форм / Н.Н. Сафронов, В.А. Козин, А.И. Якобсон, С.Г. Кустовский (РФ). - № 4800109/02; Заяв. 04.12.88; Опубл. 20.09.95, Бюл. № 26.

32. Сафронов Н.Н. Получение ферромолибдена из дисперсных отходов производства // Сталь. - 1995. - № 12. - С. 35-37.

33. Сафронов Н.Н. Влияние физической структуры на кинетику металлизации железосодержащих композитных материалов // Рукопись деп. в ВИНТИ № 2583 - В 95, 1995. БУ ВИНТИ "Депонированные научные работы". - 1995. - № 11. - 33 с.

34. Сафронов Н.Н. Металлизация железосодержащих материалов при различных параметрах внешних условий // Рукопись деп. в ВИНТИ № 2582 -В 95, 1995. БУ ВИНТИ "Депонированные научные работы". - 1995. - № 11. -54с.
35. Сафронов Н.Н. Физическая структура композитных материалов из дисперсных железосодержащих отходов производства // Рукопись деп. в ВИНТИ № 2581 - В 95, 1995. БУ ВИНТИ "Депонированные научные работы". - 1995.-№ 11.-29 с.
36. Сафронов Н.Н. Эффективность вдувания железосодержащих дисперсных отходов производства в горн вагранки // Рукопись деп. в ВИНТИ № 2731 - В 95, 1995. БУ ВИНТИ "Депонированные научные работы". - 1995. - № 12. - 11 с.
37. Патент 2078843 РФ, МПК 6 С 22 С 33/04. Способ подготовки шихты для получения ферромолибдена / Н.Н. Сафронов, В.А. Козин, М.С. Исламов (РФ). - № 94001532; Заяв. 17.01.94; Оpubл. 10.05.97. Бюл. № 13.
38. Сафронов Н.Н., Воронин Е.М. Разработка технологии утилизации отходов литейного производства машиностроительного комплекса // Молодая наука - новому тысячелетию: Тез. докл. Международной научно-технической конференции.- Набережные Челны, 1996. Часть I. - С. 73-74.
39. Сафронов Н.Н., Бикулов Р.А. Прямое синтезирование литейных алюминиевых чугунов // Молодая наука - новому тысячелетию: Тез. докл. Международной научно-технической конференции. - Набережные Челны, 1996. Часть I. - С. 84.
40. Сафронов Н.Н., Воронин Е.М. Решение проблем экологии Камского региона путем создания безотходных технологий в литейном производстве // Молодая наука - новому тысячелетию: Тез. докл. Международной научно-технической конференции. - Набережные Челны, 1996. Часть II.-С. 100-101.
41. Сафронов Н.Н., Бикулов Р.А. Утилизация отходов литейного и кузнечного производства при выплавке алюминиевых чугунов // Проблемы комплексного использования руд: Тез. докл. 2-го Международного Симпозиума. - Санкт-Петербург, 1996. - С. 324-325.
42. Патент 2089329 РФ, МПК 6 В 22 С 9/00. Литейная форма / М.С. Исламов, Н.Н. Сафронов (РФ). - № 93017890/02; Заяв. 06.04.93; Оpubл. 10.09.97. Бюл. №25.
43. Сафронов Н.Н., Бикулов Р.А. Прямое синтезирование молибденового чугуна для сёдел клапанов // Проблемы развития автомобилестроения в России: Тез. докл. Международной научно-практической конференции. - Тольятти, 1996. - С. 181-182.
44. Сафронов Н.Н. Критериальная модель противоточной металлизации при прямом синтезировании черных литейных сплавов // Рукопись деп. в ВИНТИ № 1537 - В 97, 1997. БУ ВИНТИ «Депонированные рукописи». - 1997. №7 - 15 с.
45. Карих Ф.Г., Сафронов Н.Н., Прокопьев С.В., Данилов В.А. Контроль электродуговой плавки композиций из дисперсных железосодержащих отходов производства по интенсивности спектрального излучения отходящего дыма // Механика машиностроения: Тез. докл. Международной научно-технической

конференции. - Набережные Челны, 1997. - С. 112.

46. Сафронов Н.Н., Сунгатуллин А.Р. О соотношении твердо- и жидкофазной металлизации при прямом синтезировании черных литейных сплавов // Механика машиностроения: Тез. докл. Международной научно-технической конференции, - Набережные Челны, 1997. - С. 121-122.

47. Корниенко Э.Н., Колесников М.С., Сафронов Н.Н., Воронин Е.М. Получение черных металлов из дисперсных отходов машиностроительного комплекса // Литейное производство. - 1998. - № 9. - С. 5-6.

48. Бикулов Р.А., Сафронов Н.Н. Инновационный процесс гарантированной компактной графитизации в литейных чугунах // Экономическая синергетика и инновационный процесс: Тез. докл. Межвузовской научно-практической конференции. - Набережные Челны, 1998. - С. 86-87.

49. Сафронов Н.Н., Сунгатуллин А.Р. Новый техпроцесс утилизации промышленных отходов литейного производства // Экономическая синергетика и инновационный процесс: Тез. докл. Межвузовской научно-практической конференции. - Набережные Челны, 1998. - С. 100.

50. Патент 2138561 РФ, МПК 6 С 21 С 1/08. Способ получения чугуна в вагранке / Н.Н. Сафронов (РФ) - № 95111301; Заяв. 30.06.95; Опубл. 27.09.99. Бюл. № 27.

51. Сафронов Н.Н., Воронин Е.М. Прямое синтезирование железоуглеродистых литейных сплавов // Литейное производство. — 1999. - № 6. — С. 19-20.

52. Сафронов Н.Н., Харисов Л.Р. Получение ферросилида и глинозёмистого цемента из композиций дисперсных отходов машиностроения // Композиты и глубокая переработка природных ресурсов: Тез. докл. Второго Международного симпозиума. - Набережные Челны, 1999. - С. 46-47.

53. Сафронов Н.Н., Хайруллин М.Р. Получение серых чугунов с компактными включениями графита // Проблемы конструирования, производства и эксплуатации современных колёсных машин: Межвузовский сборник. — Набережные Челны, 1999. -С. 130-131.

54. Сафронов Н.Н., Хайруллин М.Р. Получение и свойства синтетического чугуна из дисперсных отходов машиностроения // Техничко-экономические проблемы промышленного производства: Тез. докл. Международной научно-технической конференции. - Набережные Челны, 2000. - С. 150-151.

ЛР N 020342 от 7.02.97 г.

ЛР № 0137 от 2.10.98 г.

Подписано в печать 3.11.2000 г.

Формат 60х84/16 Бумага газетная Печать ризографическая

Уч.-изд.л. 1,2 Усл.-печ.л. 1,2 Тираж 100 экз.

Заказ 1308/89

Издательско-полиграфический центр Камского
политехнического института

423810, г. Набережные Челны, Новый город, проспект Мира, 13