

Е.Х.Шахпазов, Г.А.Дорофеев

Новые синтетические композиционные материалы и технология выплавки стали с их использованием



Москва 2008

УДК 621.745.4

Е.Х.Шахпазов, Г.А.Дорофеев. Новые синтетические композиционные материалы и технология выплавки стали с их использованием.
— М.: Интерконтакт Наука, 2008, 272 с.

ISBN 978-5-902063-34-6

В книге рассмотрены новые синтетические композиционные материалы (синтиком), разработанные в РФ, и технология выплавки стали с их использованием в кислородных конвертерах и электродуговых печах заводов РФ и зарубежных стран, включая США, ФРГ, Южную Корею, Польшу. Представлены состав, свойства и особенности новых материалов, механизм, термодинамика и кинетика окисления углерода и других элементов в синтикоме, энерготехнологические характеристики материала, выход годного. Оценены экономические и экологические аспекты производства и потребления синтикома, а также перспективы развития и применения материалов этого типа в производстве стали.

Книга может быть полезной технологам, работникам научных и исследовательских организаций, преподавателям и аспирантам, работающим в области металлургии.

ISBN 978-5-902063-34-6

© Е.Х. Шахпазов, 2008

© Г.А. Дорофеев, 2008

Содержание

Введение	7
Глава 1. Первородные шихтовые материалы	15
Литература	32
Глава 2. Состав, свойства и особенности новых синтетических композиционных материалов типа синтиком®	33
2.1. Общие сведения и формула синтикома	33
2.2. Основные металлургические особенности синтикома	42
2.3. Особенности окисления углерода в синтикоме	44
2.4. Возможная экономия энергии и дожигания CO до CO ₂	45
2.5. Области применения синтикома	45
2.6. Новые перспективные области применения синтикома	47
Литература	48
Глава 3. Механизм, термодинамика и кинетика окисления углерода и других элементов в синтикоме	49
3.1. Методика исследования кинетики обезуглероживания при нагреве и плавлении синтикома	49
3.2. Особенности взаимодействия углерода и оксидов железа в синтикоме	51
3.3. Результаты экспериментальных исследований процессов в синтикоме	55
3.4. Особенности процессов в синтикоме с углеродсодержащим наполнителем	62
Выводы	65
Литература	67
Глава 4. Выход жидкого железа из синтикома	68
4.1. Исходные данные	68
4.2. Анализ выхода железа из синтикома различного состава	71
4.3. Оценка стоимости железа, полученного из синтикома	79
Выводы	82
Литература	84
Глава 5. Энерготехнологические характеристики синтикома	85
5.1. Основные реакции при нагреве и плавлении синтикома	85
5.2. Расчет термохимических параметров синтикома	87
5.3. Анализ расчетных и экспериментальных данных	93
5.4. Определение охлаждающего эффекта синтикома	100
5.5. Систематизация характеристик синтикома	106
Выводы	108
Литература	109

Глава 6. Технология производства синтикома	110
6.1. Исходные материалы	111
6.2. Способ производства	112
6.3. Механическое воздействие	113
6.4. Тепловые явления	122
6.4.1. Аналитический метод расчета кинетики затвердевания отливки	123
6.4.2. Численный метод расчета кинетики затвердевания расплава	132
6.5. Технология и оборудование	139
Литература	148
Глава 7. Выплавка стали в кислородных конвертерах с использованием синтикома	149
7.1. Исходные положения	149
7.2. Результаты испытаний синтикома в конвертерах ОАО «НЛМК»	153
7.3. Испытания синтикома в конвертерах ОАО «Северсталь»	159
7.4. Использование в конвертерах синтикома на основе углеродистого полупродукта	164
7.4. Новые области применения синтикома	169
Выводы	174
Литература	175
Глава 8. Исследование технологии применения синтикома в конвертерном производстве	177
8.1. Моделирование процесса формирования металлозавалки	177
8.2. Методика проведения опытных плавов в 360 т конвертере	184
8.3. Анализ результатов исследований	193
8.4. Оптимизация режима формирования комплексной металлозавалки	198
8.5. Баланс железа при различных вариантах формирования металлозавалки	200
Выводы	205
Литература	208
Глава 9. Применение синтикома в дуговых печах	209
9.1. Результаты исследований	209
9.2. Влияние синтикома на содержание примесей цветных металлов	214
9.3. Особенности окисления углерода	219
9.4. Механизм образования шлаков при переплаве синтикома	227
9.5. Влияние синтикома на удаление фосфора и серы	228
9.6. Влияние синтикома на содержание азота в металле	230

9.7. Выход годного железа при использовании синтикома в металлопихте	232
9.8. Влияние синтикома на расход электроэнергии	238
9.9. Газотворная способность синтикома и особенности дожигания СО до СО ₂ при его использовании	241
Литература	248
Глава 10. Экологические аспекты производства и применения синтикома	250
10.1. Снижение удельных показателей загрязнения воздуха в доменном производстве	250
10.2. Влияние синтикома на окисление железа во время расплавления металлозавалки	255
10.3. Энергозатраты на производство синтикома	257
Литература	258
Глава 11. Экономическая эффективность синтикома	259
11.1. Экономическая эффективность производства синтикома в доменном производстве	259
11.2. Эффективность применения синтикома в сталеплавильном производстве	259
11.3. Определение себестоимости, цены и прибыли от производства и реализации различных марок синтикома	261
Выводы	264
Литература	265
Глава 12. Направления физико-химических исследований и совершенствования синтикома	266
12.1. Состояние вопроса	266
12.2. Направления дальнейших исследований	269

Введение

Черная металлургия испытывает непрерывно возрастающий дефицит чистой металлошихты, необходимой для выплавки сталей с жестко регламентированным содержанием примесей типа $\text{Cu}+\text{Sn}+\text{Mo}+\text{Cr}+\text{Ni}$, предназначенных в первую очередь для производства плоского проката для особо сложной вытяжки, изготовления металлического корда, изделий ракетно-космической техники, атомного и энергетического машиностроения, буровых платформ и т.д. Пониженное качество стального лома требует проведения его тщательной предварительной подготовки и, в ряде случаев, исключает или сильно ограничивает возможность его использования при выплавке сталей ответственного назначения. В свою очередь снижение качества производимой металлопродукции и увеличение стоимости металла за счет дополнительных технологических операций ухудшает позиции стали и снижает ее конкурентоспособность по сравнению с другими конструкционными материалами. Одним из вариантов решения проблемы выплавки высококачественных сталей является увеличение объемов производства и использования новых видов чистой первородной металлошихты. Именно этому вопросу посвящена данная монография.

В России фирмой "Интермет-Сервис" (г.Тула) в сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими и проектными организациями и крупнейшими металлургическими предприятиями страны при поддержке Министерства промышленности РФ и Министерства науки и технологии РФ разработан принципиально новый синтетический композиционный материал оксид-металл, получивший общее название Синтиком® (от первых букв его названия синтетический композиционный материал оксид-металл. Далее везде синтиком). Этот материал в базовом варианте состоит из металлической высокоуглеродистой основы – чугуна или полупродукта и оксидов железа и представляет собой слиток в виде твердой смеси этих компонентов. Источником оксидов железа служат различные твердые окислители – железорудные окатыши, руда, агломерат, окалина. Наряду с этим в состав синтикома могут быть введены дополнительно углеродсодержащие и шлакообразующие компоненты.

Для производства синтикома используются чугуно-литейные разливочные машины доменных цехов. Для этого на машинах монтируется дополнительное оборудование, позволяющее вводить в жидкий металл различные наполнители в заданных количествах и регулировать расход жидкого чугуна. Это оборудование не препятствует использованию машины для разливки чугуна по обычной технологической схеме. Благодаря этому разливочная машина становится универсальным агрегатом, способным отливать как чушки чугуна, так и слитки синтикома. Из 1 т чугуна или углеродистого полупродукта можно получить от 1,05 до 1,43 т синтикома, оксиды железа которого являются источниками получения дополнительного железа и кислорода.

Созданный материал не имеет аналогов в мире и принципиально отличается от известных материалов, в том числе твердого чугуна, более высоким комплексом металлургических свойств и широкой сферой применения.

Состав синтикома, технология его получения и применения защищены патентами России и 30 ведущих государств. Торговая марка синтикома “Синтиком®” (“Synticom®”) зарегистрированы патентными ведомствами России США. В России лицензии на производство синтикома приобретены ОАО “Северсталь”, ОАО “Чусовской металлургический завод”, ОАО “ЛМЗ “Свободный Сокол”, ОАО “Тулачермет”.

Комплекс работ в этой области удостоен премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 2001 г. и юбилейной премии им. С.И.Мосина, а также медали ТТП РФ “Золотой меркурий”. Синтиком отмечен трижды Дипломами с отличием и Золотыми медалями Всемирной выставки изобретений “Эврика-Брюссель”.

При использовании первичных исходных компонентов синтиком является первородной шихтой, имеющий высокую чистоту по содержанию вредных и нежелательных элементов, известный состав, свойства, происхождение и наследственность. По своим физическим свойствам синтиком относится к чистой тяжеловесной шихте, отличаясь от нее в лучшую сторону более низкой температурой плавления (1150 – 1250°С), постоянством формы, массы, размеров и свойств, а также повышенной удельной поверхностью и относительно небольшой массой слитков (менее 35кг).

По сравнению с другими видами металлошихты синтиком содержит наибольшее количество углерода и кислорода — соответственно до 6 и 7,5 %, тесно смешанных между собой и обладающих высокоразвитой контактной поверхностью. Благодаря этому в синтиком в процессе его приготовления заранее заложены возможности для быстрого реагирования углерода с собственным кислородом при нагреве и расплавлении. Эти свойства синтикома обеспечивают сдвиг окисления углерода в начало плавления металлошихты, вследствие чего достигается непрерывное обезуглероживание ванны на протяжении всей плавки – от начала проплавления и до выпуска металла. При этом происходит одновременное окисление примесей металлической основы синтикома – кремния, марганца, фосфора, титана, ванадия, хрома и превращение чугуна в низкоуглеродистый полупродукт – первичную сталь. Оксиды железа, отдав подобно донору свой кислород на окисление примесей, восстанавливаются до железа. За счет ввода оксидов железа в чугун при трансформации его в синтиком удается дополнительно получить 65 – 150 кг железа на 1 т чугуна по цене твердого окислителя.

Процессы нагрева, плавления, окисления углерода и других примесей, восстановление железа из его оксидов, образование плака, рафинирование в синтикоме идут параллельно и одновременно.

Главным отличием и преимуществом синтикома является характер основной реакции – окисления углерода, занимающей до двух третей от

общей продолжительности плавки. В синтикоме эта реакция протекает с огромными скоростями, достигающими 0,2 – 0,4 % /мин и более, что превышает скорость окисления углерода в кислородно-конвертерном процессе.

Синтиком является материалом с регулируемым окислительно-восстановительным потенциалом. Это достигается за счет изменения в нем соотношения кислорода и восстановителей, в первую очередь, углерода. Изменение этого соотношения позволяет также регулировать в широких пределах — от 0,8 до 1,45 энергетический потенциал синтикома по отношению к скрапу, охлаждающий эффект которого принимается за единицу. Благодаря этому синтиком может быть как охладителем плавки, так и энергоносителем. Это наряду с другими преимуществами синтикома предопределяет его универсальность и широкий диапазон применения — от электропечей до кислородных конвертеров, работающих как на жидком чугуна, так и на полупродукте, в том числе физически и химически холодном.

Синтиком является дополнением или альтернативой чистому тяжеловесному стальному лому, твердому чугуну и железу прямого восстановления. Он может использоваться как самостоятельно, так и в комбинации с существующими видами металлопихты, включая жидкий чугун. Его доля в металлопихте конвертеров в отличие от твердого чугуна не имеет ограничений и позволяет полностью заменить весь лом, открыв тем самым возможность формирования металлозавалки конвертеров из одной первородной пихты — жидкого чугуна и синтикома.

Синтиком может использоваться без каких-либо ограничений и в электроплавке. Это отличает его от жидкого и твердого чугуна, доля которых в металлозавалке электродуговых печей обычно не превышает 30 %. Трансформация чугуна в синтиком полностью устраняет эти ограничения и позволяет работать электропечи с любой долей синтикома вплоть до 100 %. Возможность формирования из чистых первородных материалов повышает конкурентоспособность электросталеплавленного производства в отношении сортамента выплавленных сталей до уровня конвертерного процесса.

Широкомасштабные промышленные испытания синтикома проведены на ряде отечественных и зарубежных предприятий, включая США, ФРГ, Южную Корею, Молдавию, Мексику, Испанию, Турцию, Польшу, Чехию, Белоруссию, Узбекистан. Проведенные испытания подтвердили перспективность синтикома для кислородных конвертеров и электропечей различного типа. Окисление углерода в синтикоме имеет два максимума, один из которых отвечает температуре плавления металлической матрицы (1150 – 1250°C), а другой твердого окислителя (1380 – 1420°C). Раннее окисление углерода обеспечивает кипение металла и шлака в период расплавления металлозавалки при пониженных температурах, ускоряет их нагрев и рафинирование и улучшает использование энергии дожигания CO до CO₂.

Наряду с ролью металлошихты синтиком способен выполнять и другие не менее важные технологические задачи. Среди них — интенсификация процесса окисления углерода на заключительной стадии продувки при пониженном содержании углерода в металле, перемешивание ванны после окончания продувки продуктом реакции окисления углерода в синтикоме — монооксидом углерода, ускорение шлакообразования и рафинирования, снижение энергоемкости сталеплавильных процессов, а также охлаждение оставленного конечного шлака и его вспенивание для нанесения слоя шлака на футеровку конвертера — создания гарнисажа.

Таким образом синтиком является универсальным материалом с весьма широким спектром применения и большими технологическими возможностями.

Состав синтикома, его свойства, окислительно-восстановительный и энергетический потенциалы синтикома задаются еще на стадии его изготовления применительно к сортаменту стали, типу сталеплавильного агрегата, его индивидуальным особенностям марке стали. Поэтому синтиком является материалом с запрограммированным заранее составом и свойствами и прогнозируемыми результатами плавки. Это позволяет отнести синтиком к продуктам высокой технологии “хайтек” и “умной шихте”.

Отличия синтикома от его прародителя — чугуна носят не только количественный, но и качественный характер. Эти отличия превращают синтиком, несмотря на общую с чугуном металлическую основу, в материал принципиально нового вида и с принципиально новым комплексом металлургических свойств. Благодаря своим преимуществам в ближайшей перспективе твердый чугун при выплавке сталей в конвертерах и электропечах постепенно будет вытеснен синтикомом.

Синтиком как материал, еще молод, он только начинает свою жизнь. Со временем по мере накопления знаний и опыта потенциальные возможности этого материала раскроются более полно. Можно предполагать, что синтиком найдет широкое применение в современном сталеплавильном производстве при выплавке чистых сталей. Его применение открывает новые дополнительные возможности для совершенствования технологии выплавки стали, повышения ее качества, расширения сортамента выплавляемых сталей и дальнейшего улучшения технико-экономических показателей сталеплавильного производства. Тем самым синтиком способствует повышению конкурентоспособности стали и укрепляет ее позиции как основного конструкционного материала современной техники.

Как известно, черная металлургия в настоящее время столкнулась с проблемой дефицита металлолома, ухудшением его качества и резким возрастанием цен на него. Впервые в истории черной металлургии цены на лом почти достигли уровня твердого товарного чугуна. Можно ожидать, что эта родившаяся тенденция станет доминирующей и охватит все регионы мира с развитой металлургией. В связи с этим работы по созданию новых видов металлошихты приобретают особую актуальность.

Одним из путей уменьшения дефицита чистой шихты является организация массового производства новых синтетических видов материалов типа синтиком с использованием результатов упомянутой отечественной разработки. Это заставляет по другому посмотреть на доменное производство как наиболее реального источника жидкого чугуна, в том числе для последующего перевода части его в твердую металлошихту — синтиком. Значительные перспективы в новых условиях открываются и для развития жидкофазных способов получения углеродистых расплавов типа Ромелт, Корекс и других.

Изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что выполненные в РФ разработки, позволяющие обеспечить превращение жидкого чугуна в аналог чистого тяжеловесного лома, каким является синтиком, не говоря о других областях его использования, имеют важное значение для черной металлургии и широкие перспективы для коммерческой реализации. Поэтому данная монография, обобщающая основные вопросы, связанные с разработкой и применением синтикома, может представить интерес для черной металлургии.

В заключение коснемся вопрос о предшествующих работах в данном направлении, ибо без них изложение материала не будет полным. Идея использования разливочной машины для получения гетерогенных отливок из жидкого расплава и твердого наполнителя впервые была предложена Е.А. Уехлингом еще в 1904 г. (патент № 788.964 от 2 мая 1905 г.). Развитием этого предложения является композиционная отливка, состоящая из различных твердых наполнителей, залитых жидким чугуном патент США 3.948,612 от 6 апреля 1976 г., автор У.Шультен-Баумер, заявка на патент № 1458228 Великобритании, публикация 8 декабря 1976 г. № 4576 с приоритетом от 29 декабря 1972 г.

Дальнейшим шагом в этом направлении стали исследования, выполненные в Донецком политехническом институте под руководством В.И. Мачикина в 1980-1984 гг. Однако в то время эти идеи не получили практического воплощения.

Новый этап по созданию материалов и способов их получения открылся в 1988 году, когда возникла острая необходимость в чистой первородной шихте, необходимой для выплавки кордовых сталей в электропечах Белорусского металлургического завода, только что введенного в строй. Начиная с этого момента по заданию Минчермета СССР и далее Роскомметаллургии РФ в бывшем НПО "Тулачермет", ныне ОАО "Тулачермет" начались широкие исследовательские работы. В результате этих исследований 07 декабря 1990 г. была получена первая промышленная партия синтикома. Полученный материал был использован в дуговой печи цеха № 4 НПО "Тулачермет", а также в 100 т дуговых печах Узбекского и Белорусского металлургических заводов. Проведенные плавки подтвердили перспективность созданных материалов. Значительную роль в этой работе сыграли сотрудники НПО "Тулачермет" А.С. Белкин, Г.В. Винокуров, В.В. Казанский,

М.А.Цейтлин, Е.Н.Ивашина, С.Г.Мурат, Р.П.Коротина, а также работники БМЗ А.Г.Афанасиади, А.Г.Стеблов, и др.

Дальнейшие исследования в этой области продолжались в ООО "НПМП "Интермет-Сервис" (г.Тула). Серьезным шагом в этом направлении стали работы по созданию технологического процесса производства синтикома, выполненные ОАО "НЛМК" и ООО "НПМП "Интермет-Сервис". Значительный вклад в работу внесли работники ОАО "НЛМК" В.В.Рябов, Б.Т.Чернобривец, В.А.Дворников и сотрудники ООО "НПМП "Интермет-Сервис" А.В.Макуров, А.Н.Панфилов, Д.А.Совков, В.И.Тамбовский, А.Г.Зубарев и др. Промышленная партия синтикома производства ОАО "НЛМК" была поставлена на ОАО "ВТЗ" и использована для выплавки грубных сталей. Активное участие в этой работе принимали представители ОАО "ВТЗ" В.Г.Зимовец, В.Ю.Кузнецов, А.Я.Харламов, В.В.Анищенко, В.И.Тазетдинов, А.А.Сафонов и др., а также специалисты ООО "НПМП "Интермет-Сервис", ФГУП "ЦНИИЧермет им. И.П.Бардина" (В.И.Маторин, Ю.Д. Морозов, В.В.Прогонов и др.) и ВНИИГаза (А.И.Гриценко, Н.И.Аненьков). Выполненный комплекс работ подтвердил эффективность применения синтикома в шихте электропечей при выплавке грубных сталей, в том числе для северного исполнения.

Существенный вклад в развитие работ по синтикому внесен ОАО "Северсталь" и сотрудниками этого предприятия В.И.Агарышевым, С.М.Чумаковым, С.Д.Зинченко, А.В.Луканиным, А.Б.Лятыным и др. Впервые в практике конвертерного производства была подтверждена возможность выплавки особо чистых сталей на первородной шихте, состоящей из жидкого чугуна и синтикома. Особый интерес представляют такие опыты по использованию в электродуговой шахтной печи комбинированной шихты, включающей жидкий чугун, лом и синтиком (Б.Я.Балдаев и др.).

В последние годы большие работы по организации промышленного производства синтикома были выполнены в ОАО ОМК и ОАО "ЧМЗ". На этом предприятии разработана технология получения синтикома из углеродистого полупродукта, получаемого при деванадации природно-легированных чугунов и обладающего специфическими свойствами. Впервые на этом предприятии показана возможность использования синтикома при деванадации чугуна и его рафинирования от примесей.

Наибольший вклад в эти работы внесли А.М.Седых, Е.Л.Шевелев, О.Б.Орионов, А.С.Костин (ОАО "ОМК") и А.А.Карпов, Е.А.Васин, К.Н.Коломийцев, И.А.Кирияков, В.А.Сергиенко, Г.Г.Гаврилюк и др. (ОАО "ЧусМЗ").

Значительный вклад в развитие работ по синтикому был внесен сотрудниками Молдавского металлургического завода, где были впервые выполнены системные исследования электроплавки с использованием в шихте синтикома. Это А.К.Белитченко, Н.А.Богданов, А.В.Кутаков, И.В.Деревянченко, В.А.Гоменюк и др.

Заметной вехой являются испытания синтикома производства ОАО "Свободный Сокол" на заводе "Хута Катовице" в Польше. Необходимо отметить роль в этом В.Д.Меньщикова, специалистов фирмы "Оптимал" М.Галушки, Т.Дарлевски, В.Гржибовского, а также директора завода "Хута Катовице" Е. Вирошлага.

Основные физико-химические исследования процессов в синтикоме выполнены в ГТУ "МИСиС" под руководством д.т.н., проф. В.А.Григоряна и д.т.н., проф. А.В.Павлова, которым авторы выражают особую благодарность. Эти исследования экспериментально подтвердили, что композиты типа синтиком принципиально отличаются от известных и образуют собой новый класс предварительно подготовленных материалов.

С момента рождения синтикома активное участие в работе принимали руководитель Роскомметаллургии С.З.Афонин и работники этого комитета Л.Н.Шевелев, Ю.В.Уткин, Г.А.Шаманов, В.И. Акинфиев и др., которые внесли значительный вклад в эту проблему.

Особо следует отметить работы по продвижению синтикома в зарубежные страны. Значительную роль в этом сыграло ГВЭО "Тяжпромэкспорт" и его работники К.О.Семенов, А.А.Стецурин, В.С.Смирнов и др. В значительной мере именно благодаря их усилиям новая российская разработка — синтиком получила известность в США, Канаде, Китае, Бразилии, Мексике, Венесуэле, Нигерии и др. странах.

Благодарности и признательности заслуживают зарубежные партнеры. Это кипрская фирма "Юниброс Стил" во главе с В.Деличем и ее сотрудники — Р. Савкович, Д. Джурич, фирма "Плантадженет Холдинг" (г.Сан-Франциско) — Д.Андерсен, Т.Севино; фирма ASI (г.Сан-Франциско) — Т.Болоздыня; компания "Дипроиндука" (г.Торонто, Канада) — Э.Риера, П.Сейдеман; Ченстоховский политехнический институт (Польша), д.т.н., проф.Е.Щивка; металлургический завод "Стил Дайнемикс (США) — К.Буссе, М.Миллет; фирма "Эко-сталь" (ФРГ) — Ю. Калиш, Г.Зиккерт, М.Будрас; бразильские фирмы "Инсайт Трейд" — К.де Альмейда, "Сажа" — Л. Сангинелли, "Сидерсул" — Ж. Роша.

Особо следует отметить фирму DSK (г.Детройт, США) — М.Уилкинсон, Т.Уилсон. Именно усилия М.Уилкинсона и Т.Уилсона позволили провести широкомасштабные испытания синтикома на металлургических заводах США. Выражаем им признательность и благодарность.

Основные работы по созданию новых материалов для сталеплавильного производства были выполнены ООО "НПМП "Интермет-Сервис". Значительный вклад в развитие этих работ внесли А.В.Макуров, А.Н.Панфилов, Д.А.Совков, В.И.Тамбовский, В.С.Гребенников, Л.З.Матвеев, С.В.Руднев, А.В.Шелягович и многие-многие другие.

Авторы выражают признательность Т.Н.Одородько и И.П.Венглинской за большую помощь в подготовке рукописи.

Первородные шихтовые материалы

Основными шихтовыми материалами современного сталеплавильного процесса являются жидкий передельный чугуи и стальной металлолом. Если первый из них относится к первородной шихте и отличается пониженным и известным содержанием примесей цветных металлов, а зачастую еще подвергается рафинированию от серы, фосфора и кремния, то стальной лом является вторичным сырьем и характеризуется повышенной загрязненностью остаточными элементами, не удаляемыми в процессе плавки. Использование этого материала, даже в относительно небольших количествах (10 % и более) в значительной мере снижает эффективность жидкого чугуна, а в отдельных случаях сводит на нет преимущества его как чистой первородной шихты. В этом случае лом можно уподобить ложке дегтя в бочке меда. Особо это относится к амортизационному лому, наиболее загрязненному примесями, и на который приходится большая часть потребляемой металлошихты.

В связи с тенденцией увеличения производства стали высокой чистоты, а также в связи с неуклонным ухудшением качества лома и увеличением доли в шихте амортизационного лома, проблема применения вместо лома шихтовых материалов, свободных от загрязнения, приобретает особую актуальность [1 – 9]. Успешное решение этого вопроса позволит увеличить долю первородных материалов в металлозавалке вплоть до 100 %, исключив из шихты в случае необходимости низкокачественный лом с высокой степенью загрязненности. Конвертерный процесс, имеющий в металлошихте преобладающую долю жидкого чугуна, в случае исключения из шихты «грязного» скрапа и замены его альтернативными чистыми материалами получит серьезные конкурентные преимущества в отношении качества выплавляемой стали. В этом случае исходная шихта конвертерной плавки будет полностью состоять из чистых материалов, что обеспечит соответствующее повышение качества металла.

Не меньшее значение эта проблема имеет и для электросталеплавильного производства, основной шихтой для которого служит металлолом. Без чистых материалов вообще невозможно обеспечить качества электростали, приближающегося к конвертерному металлу.

В последнее десятилетие наблюдается широкое развитие исследований, ставящих задачу повышения исходной чистоты шихтовых материалов. Успешное их решение позволило бы устранить парадокс, присущий

конвертерному процессу с момента его рождения и не устраненный до сих пор. Речь идет об обязательном применении в этом процессе вторичного материала — металлолома, имеющего в большинстве случаев неизвестные состав, происхождение, наследственность и обладающего в большинстве случаев повышенным содержанием вредных и нежелательных примесей, и нестабильной чистой, оценка которой к тому же весьма затруднена. Получается абсурдная картина, когда качество конечного жидкого металла определяется не жидким чугуном, составляющим основу металлозавалки, а металлоломом неопределенного состава и, как правило, загрязненного примесями.

Наличие чистой шихты позволило бы также улучшить структуру металлозавалки в электродуговых печах за счет ввода в завалку доли этих материалов и смягчить или исключить вообще негативное влияние загрязненного лома на качество стали.

До настоящего времени черная металлургия не располагает в достаточном количестве первородными материалами, позволяющими формировать металлозавалку из чистой металлошихты. Именно этим обстоятельством, а также необходимостью выплавки стали с пониженным и стабильным

Таблица 1.1

Допустимые содержания остаточных элементов в сталях различного сортамента

Процесс	Вид металлошихты	Вид готовой продукции	Содержание элементов, масс. %		
			Cu	Sn	$\Sigma(\text{Cu, Sn, Cr, Ni, Mo})$
Конвертер	Чугун+аморт.лом	Холоднокатаная для глубокой вытяжки	0,02 – 0,03	<0,003	<0,1
Конвертер	Чугун+аморт.лом	Холоднокатаная для автомобилестроения	0,03 – 0,05	<0,003	<0,13
Конвертер	Чугун+аморт.лом	Холоднокатаная для вытяжки и покрытий	0,03 – 0,05	<0,003	<0,15
Конвертер	Чугун+аморт.лом	Рядовые марки, толстые листы, рельсы	0,05 – 0,1	<0,005	<0,2
Электропечь	Скрап рыночный+ Железо ПВ	Горячекатаная, рядовые листы	0,1 – 0,15	<0,01	<0,4
Электропечь	Скрап рыночный+ аморт.лом	Прутки, катанка	0,25 – 0,4	<0,025	<0,6
Электропечь	Скрап рыночный	Арматурный профиль	0,3 – 0,5	<0,04	<0,8
Электропечь	Аморт.лом+ легирующие	Специальные стали	0,08 – 0,13	<0,01	Cr + Ni + Mo

содержанием микропримесей объясняется рост интереса к обеспечению потребностей сталеплавильного процесса в чистой металлошихте.

Требования к содержанию вредных элементов в некоторых видах стальной продукции, представлены в табл.1.1 [1].

В 1999 году в странах Евросоюза разработана классификация сталей, основанная на допустимом уровне суммарного содержания меди, молибдена, хрома и олова (табл.1.2).

Таблица 1.2

Классификация сталей по содержанию в них примесных микроэлементов

Класс	(Cu+Mo+Sn+Cr), масс. %	Область применения стали
0	$\leq 0,033$	Авиапромышленность, атомная энергетика, спец. нефтяная арматура, спец. подшипники, электроды для ЭСП.
1	$\leq 0,090$	Высокопрочные для сверглубокой вытяжки, мартенситно-стареющие, тонкая проволока, подшипники, белая жечь для вытяжки.
2	$\leq 0,280$	Стали для глубокой вытяжки, холодной вытяжки, глубокой высадки, штамповки, бесшовные трубы.
3	$\leq 0,335$	Сортовой прокат для автомобилестроения, резервуары высокого давления, штрипсовая сталь.
4	$\leq 0,390$	Трубы массового назначения, белая и черная жечь, холоднокатаная калиброванная и колесная стали, листы под эмалирование и оцинкование.
5	$\leq 0,600$	Толстая проволока, крупный сортовой прокат, металл для фасонных профилей, горячекатаные рулонные стали.
6	$\leq 0,800$	Арматурные и строительные стали
7	$> 0,800$	Остальной сортамент

Приведенные данные свидетельствуют о весьма жестких требованиях к отдельным видам выплавляемых сталей по содержанию остаточных элементов, представленных тяжелыми цветными металлами. Наличие широких пределов их допустимой концентрации в различных видах сталей является вынужденным и указывает на различную степень загрязненности лома. Отсутствие сведений о среднем составе массы металлошхты, состоящей, как правило, из лома различного происхождения и неизвестного состава затрудняет оценку качества лома, используемого в плавке.

Примерная оценка степени загрязненности различных видов металлошхты приведена в табл.1.3 [1].

Таблица 1.3

Типичное содержание остаточных элементов в различных видах металлошихты

Шихтовые материалы	Суммарное содержание Cu, Sn, Cr, Ni, Mo, масс. %, не более
1. Железо прямого восстановления (губчатое железо, металлизированные окатыши, брикетированное железо)	0,02
2. Жидкий чугун, твердый чушковый чугун, углеродистый полупродукт	0,06
3. Отходы металлообработки, оборотный лом	0,35
4. Металлолом	0,55
5. Пакетированный лом	0,22
6. Тяжеловесный амортизационный лом	0,56
7. Дробленный очищенный лом (шреддер)	0,6

В качестве конкретного примера ниже приведен химический состав металлизированных окатышей, изготавливаемых из руд КМА ОАО "ОЭМК" (табл.1.4).

Таблица 1.4

Химический состав металлизированных окатышей ОАО "ОЭМК"

№ п.п.	Наименование показателей	Количество
1.	Массовая доля, % не менее:	
	Углерода	1,2
	Железа металлического	86,0
	Железа общего	90,0
2.	Степень металлизации, % не менее	94,0
3.	Массовая доля, % не более:	
	Диоксида кремния	4,5
	Серы	0,005
	Фосфора	0,015
	Суммы серы и фосфора	0,018
	Меди	0,006
	Цинка	0,002
	Олова	0,002
	Свинца	0,001
	Никеля	0,015
	Хрома	0,02
	Сурьмы	0,001
	Висмута	0,001
	Вольфрама	0,01
	Мышьяка	0,001
	Молибдена	0,01
4.	Основность CaO/SiO_2 , не менее	0,3

Как следует из табл. 1.4, железо прямого восстановления ОАО "ОЭМК" отличается высокой чистотой и содержит не более 0,055 % суммы Cu, Sn, Cr, Ni, Mo.

Как видно, общее содержание примесей Cu, Sn, Cr, Ni, Mo в наиболее чистой (железо прямого восстановления) и наиболее загрязненной пихте (амортизационный пакетированный лом) отличается в 50 раз. Эти данные указывают на трудности, которые сопровождают получение так называемых чистых сталей с жестко регламентированным содержанием остаточных элементов.

Проблема обеспечения потребностей современного сталеплавильного производства чистыми шихтовыми материалами решается по разным направлениям. Среди них можно выделить следующие:

1. Увеличение объема выпуска жидкого чугуна в существующих доменных печах и освоение новых жидкофазных процессов получения чугуна или углеродистого полупродукта (процессы Корекс, Ромелт, Хайсмелт и др.).

2. Рост производства различных видов восстановленного железа в твердом виде. Ведущее место в производстве этого сырья занимает процесс Мидрекс, далее следует с большим отставанием Хил III. На долю всех остальных процессов приходится всего 15 % общего производства.

Оба эти направления объединяет стремление в максимальной степени использовать потенциал существующих способов производства первичного железа.

3. Разработка новых способов получения железа и новых видов металлошихты.

В настоящее время насчитывается свыше 100 способов бескоксowego получения железа и 1100 патентов. В абсолютном большинстве эти процессы направлены на производство уже известных видов металлошихты. Исключением являются лишь некоторые из них. Среди них следует отметить процесс фирмы Кобе Стил [2], позволяющий получать гранулы чугуна в твердом виде. Такого материала в распоряжении сталеплавыльщиков еще не было.

Технология производства гранул твердого чугуна из железорудных окатышей с использованием в качестве восстановителя угля — процесс JТmk3® не имеет аналогов. Полученный материал следует отнести к новому виду металлического железосодержащего материала для выплавки стали.

Таблица 1.5

Типичный состав чугуновых гранул JТmk3®, масс. %

Углерод	2,5 – 3,4
Кремний	0,2
Марганец	0,1
Фосфор	0,06
Сера	0,05
Железо металлическое	96 – 98

По качеству эти гранулы близки к качеству доменного чугуна. Состав чугунных гранул представлен в табл. 1.5.

Гранулы обладают повышенной плотностью, достигающей по информации фирмы 7,4 – 7,6 г/см³, что соответствует плотности жидкого чугуна. Фирма Kobe Steel определяет технологию JTmk3® как технологию третьего поколения в производстве чугуна, впитавшую в себя из традиционной технологии выплавки чугуна состав материала (уровень 1), а от технологии прямого восстановления железа форму частиц и их фазовое состояние (уровень 2). Недостаток этого материала — относительно высокое содержание серы из-за использования угля в качестве восстановителя.

В самое последнее время возобновился интерес к процессу “Карбайд Айрон”, казалось уже навсегда утраченный после неудач его в прошлом. Напомним, что конечным продуктом этого процесса является весьма дисперсный порошок карбида железа размером 0,1 – 0,2 мм. По нашему мнению, у этого материала имеются хорошие перспективы.

4. Получение новых видов металлошхты на основе преобразования уже существующих и используемых в производстве сталей пихтовых материалов в новые с приданием им качественно новых свойств. Одним из таких материалов являются суперметаллическое губчатое железо в виде окатышей — так называемый Суперметаллик, разработанный фирмой Даниели [3]. Некоторые данные об этом материале приведены ниже в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Типичный состав материала суперметаллик (СПМ), масс. %

Общее содержание железа	90 – 94
Содержание железа металлического	82 – 89
Степень металлизации	>94
Общее содержание углерода (свободного и растворенного в железе)	1,5 – 4
Доля растворенного углерода в общем его содержании	70 – 100
Пустая порода	3 – 6
Фосфор	<0,08
Сера	<0,04

Суперметаллик представляет собой одну из модификаций железа прямого восстановления, а именно металлизированных окатышей. Этот материал является высокоплотным губчатым железом. Глубокая его пассивация обеспечивается в результате присутствия в нем углерода преимущественно в форме карбида железа. Последнее сближает суперметаллик с твердым передельным чугуном. Пассивация продукта на месте делает безопасным его хранение и транспортировку и исключает необходимость его брикетирования.

Материал отличается высокой степенью металлизации и регулируемое в широких пределах и повышенное до 4 % содержание углерода. Так называемый показатель ценности использования, определяемый как

стоимость необходимой завалки для получения жидкой стали, равен для СПМ 87,5 % против 83 % для обычного губчатого железа. Удельные затраты электроэнергии на 1 т жидкой стали при использовании СПМ сокращаются по сравнению с губчатым железом на 60 (кВт·ч)/т (с 550 до 490 (кВт·ч)/т). Это снижение объясняется более быстрым расплавлением суперметаллика благодаря более низкой температуре его плавления.

Фирмой Даниели разработаны технические решения, позволяющие повысить содержание углерода в восстановленном железе до 4 % и, что особенно важно, перевести 70 – 100 % углерода из свободного в связанное с железом состояние, то есть в форму карбида железа. Это обеспечивает пассивацию продукта и приближает данный материал к гранулам чугуна, улучшая тем самым металлургические свойства, в частности, понижая температуру плавления материала и его теплофизические характеристики. При этом устраняются также колебания содержания углерода и потери части свободного углерода с осыпанием.

Железо прямого восстановления является для электроплавки и конвертера первородной шихтой и имеет известное и низкое содержание остаточных элементов Cu, Sn, Cr, Ni, Mo. По этому показателю оно удовлетворяет требованиям к чистоте металлошихты и может использоваться в любых сталеплавильных агрегатах. При этом физические свойства железа прямого восстановления, в том числе размеры кусков, кажущаяся плотность, насыпная масса, удельная поверхность и др. параметры изменяются в широких пределах. Это предопределяет особенности их плавления и вообще поведение в плавке. Металлизированное сырье обладает значительно меньшим размером и массой отдельных частиц по сравнению с кусками лома. Размеры частиц варьируются в пределах 5 – 220 мм при их массе 0,05 – 2 кг.

Наилучшие физические свойства присущи брикетам горячего деформирования. В этом случае железо прямого восстановления имеет насыпную массу порядка 3,2 – 3,5 т/м³, кажущуюся плотность на уровне 5,8 г/см³ и общую пористость в пределах 15 – 20 %. Эти показатели значительно превосходят аналогичные показатели металлизированных окатышей и руды, и приближают губчатое железо к металлолому.

Металлизированные материалы имеют пористую структуру и этим принципиально отличаются от лома, обладающего плотной литой структурой. Поэтому железо прямого восстановления относится к пористым телам, обладает высокой удельной поверхностью (0,2 – 1 м²/г), превосходящей этот показатель для лома в 10³ – 10⁵ раз, и имеет значительную пористость 45 – 70 %. Поэтому оно характеризуется высокой склонностью к окислению при повышенной температуре.

Дополнительным фактором, способствующим этому, является высокая химическая активность восстанавливаемого железа и пониженная температура начала окисления на воздухе (170 – 600°С). При нагреве в окислительной атмосфере в условиях неограниченного доступа кислорода к

кускам губчатого железа степень окисления железа может быть весьма большой и достигать 70 %.

Особое развитие этот процесс получает при нагреве и плавлении этого материала при одновременной порционной загрузке, что увеличивает длительность пребывания восстановленного железа в окислительной атмосфере и при высокой температуре. Скопление материала на поверхности ванны при дискретной или непрерывной загрузке также оказывает негативное влияние, усиливая вторичное окисление железа. Вторичному окислению железа также способствует нагрев и плавление металлизированных материалов теплом от сжигания топлива, то есть окислительным пламенем.

Общим для химсостава продуктов прямого восстановления железа является наличие в них высокого содержания углерода, приближающегося к уровню передельного чугуна, и соотношение углерод-кислород, превышающее как правило стехиометрическую величину для реакции окисления углерода.

Это объясняется тем, что разработки новых шихтовых материалов, как правило, исходили из требований электроплавильного производства, для которого характерным признаком является ввод в шихту углеродосодержащих материалов в количестве 10 – 20 кг/т или 1 – 2 % углерода в металлошихте, а также спецификой технологии их производства. Избыточное содержание углерода является желаемым фактором для современной электроплавки, обеспечивая поступление углерода в металл и науглероживание ванны. Этот углерод помогает сохранить низкое содержание монооксида железа в шлаке и обеспечивает условия для формирования вспененного шлака. Присутствие избытка углерода также уменьшает необходимость дувания углерода — процесса менее эффективного и более дорогого по сравнению с доставкой углерода в составе металлошихты.

Металлизированные окатыши содержат 88 – 93 % железа общего и имеют степень металлизации 90 – 99 %. Этому отвечает содержание кислорода в пределах 0,5 – 2,8 %. По данным работы электродуговых печей наилучшие результаты с точки зрения условий плавления и износа футеровки получаются при наличии 0,8 – 1,5 % кислорода, что соответствует степени металлизации 92 – 96 % [4]. С учетом этого отношение углерода к кислороду должно быть $C/O = 0,6 - 1,1\%$. Однако в большинстве случаев материалы содержат углерода значительно больше.

Для конвертерной плавки избыточный углерод в этих материалах является по понятным причинам определенной проблемой. Несбалансированность их по соотношению $C - O$ приведет к увеличению содержания углерода в металле, необходимости его окисления, дополнительному вводу кислорода и увеличению длительности продувки. Предпочтительнее иметь в железе прямого восстановления соотношение углерод-кислород, близкое к стехиометрическому. В этой части требования к исходным материалам со стороны конвертерного процесса несколько другие, чем у электроплавки.

Поэтому повышенное содержание углерода в суперметаллике и чугуновых гранулах процесса JTmk3®, удовлетворяющее электроплавке, является препятствием для их применения в конвертере. С этих позиций разработанные материалы не вполне удовлетворяют требованиям кислородно-конвертерного процесса.

Условия расплавления металлошихты в конвертере и в электродуговой печи принципиально отличаются. Источником тепла для расплавления исходной металлошавалки в конвертере, прежде всего возвышающейся над чугуном части лома, служит окисление железа, углерода и других примесей, присутствующих в жидком чугуне и металлошихте, кислородом дутья. Физические свойства продуктов прямого восстановления позволяют в отличие от лома загружать их по ходу продувки — непрерывно или комбинированно. В этом случае их расплавление происходит в слое жидкого шлака. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

Сами свойства губчатого железа (развитая удельная поверхность, пористость, высокая химическая активность восстановленного железа, малые размеры частиц) и условия его нагрева и плавления в конвертере определяют вторичное окисление железа. Насыпная масса железа прямого восстановления достаточно высока и составляет $1,6 - 2,1 \text{ т/м}^3$, что превышает в большинстве случаев насыпную массу стального лома, изменяющуюся в интервале $0,5 - 1,9 \text{ т/м}^3$. Но истинная плотность лома превышает плотность губчатого железа и плотность жидкого чугуна.

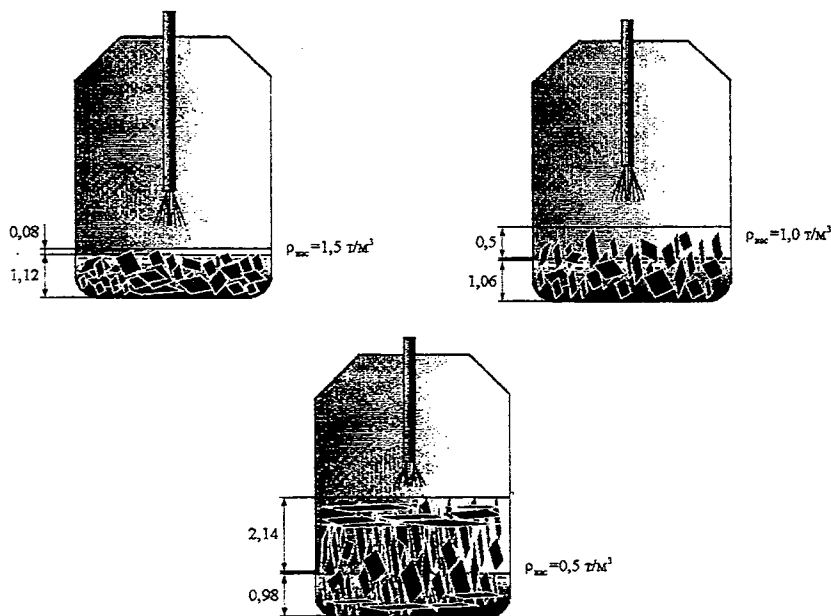


Рис. 1.1. Расположение металлошихты в кислородном конвертере при различной насыпной массе металлолома.

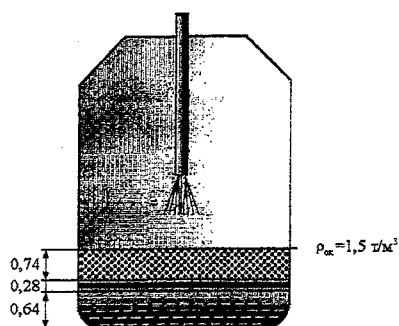


Рис.1.2. Расположение металлошихты при использовании металлизированных окатышей.

Поэтому при заливке чугуна на лом последний не всплывает. А остается погруженным в расплав чугуна, за исключением части легковесного лома, возвышающегося над уровнем жидкого расплава (рис.1.1). В отличие от этого губчатое железо не тонет в металлическом расплаве и располагается на поверхности металла, плавая на нем в частично погруженном состоянии. Лишь нижняя часть слоя этого материала находится в погруженном состоянии (рис.1.2).

Разница физических свойств оказывает решающее влияние на расположение железа прямого восстановления, поведение его и режим плавления. При замене лома более легкими окатышами и расположении их над уровнем чугуна кислород дутья будет интенсивно окислять железо, свойства которого к тому же благоприятствуют развитию этого процесса.

Свойства железа прямого восстановления в виде отдельных кусков и свойства слоя, образованного совокупностью кусков этого материала, значительно отличаются, прежде всего величиной коэффициента теплопроводности. Если теплопроводность единичного металлизированного окатыша или куска губчатого железа составляет $2,3 - 9,3 \text{ Вт/(м·К)}$ и находится на уровне легковесной металлической шихты, то в слое, состоящем из множества частиц, теплопроводность значительно меньше и составляет всего $0,35 - 1,05 \text{ Вт/(м·К)}$, то есть почти на порядок хуже. Это приводит к существенному замедлению процесса нагрева и расплавления слоя по сравнению с единичными окатышами. Кроме того, куски железа прямого восстановления независимо от формы их при вводе на поверхность ванны ошлаковываются шлаком. Это еще больше увеличивает размеры и массу слоя и снижает его активную теплопроводность. Отмеченные факторы, присущие железу прямого восстановления, осложняют их применение в конвертерном процессе.

Изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что для конвертерных процессов традиционное железо прямого восстановления, удовлетворяя

требованиям по чистоте, с позиции теплофизических свойств не является идеальным материалом. Представляется необходимым продолжить исследования в этой области с тем, чтобы полученные материалы в большей степени удовлетворяли требованиям конвертерного процесса.

В России родилось и развивается свое оригинальное направление в создании чистых первородных материалов, основанное на преобразовании твердого чугуна в композиционный материал с качественно новыми свойствами [10 – 16]. Разработанный материал получил название Синтиком® — от первых букв слов “синтетический композиционный материал оксид-металл”. В основе этого подхода лежит ввод в жидкий чугун в процессе разлива различных добавок — от окислительных до восстановительных. В качестве окислительного компонента могут использоваться железная руда, отсев мелочи агломерата, окалина, железорудные окатыши и другие. Восстановителями являются различные углеродсодержащие вещества — угли, кокс, графит и др. Введение этих добавок превращает чушки чугуна в композиционный материал наподобие снickerса. Благодаря этому открывается возможность варьирования окислительно-восстановительных и энергетических свойств в весьма широких пределах — от окислителя до восстановителя и от охладителя плавки до теплоносителя.

Ввод в чугун дополнительных ингредиентов принципиально изменяет функциональные возможности твердого чугуна, позволяя выполнять ему самые различные функции, и превращает его из сырья в высокотехнологичный продукт.

Прежде всего, чугун в виде синтикома может использоваться в качестве чистой первородной шихты, в частности заменителя металлолома в конвертерной плавке. Аналогичную роль он может выполнять и в электроплавке, используя вместо металлолома, жидкого и твердого чугуна, железа прямого восстановления, либо вместе с ними.

Синтиком создает возможность замены всего металлолома в конвертерной плавке вплоть до полного вывода его из состава металлозавалки. Благодаря этому достигается формирование металлозавалки конвертерной плавки полностью из чистых первородных материалов — жидкого чугуна и синтикома, основой которого служит тот же чугун, но в твердом виде. Это обеспечивает получение чистой стали с минимальным содержанием примесей цветных металлов и стабильно низкой концентрацией их от плавки к плавке.

Синтиком может также использоваться без ограничений в электроплавке. Это позволяет повысить долю первородных материалов в шихте электроплавки вплоть до 100 %. Благодаря этому электропечь получает возможность аналогично конвертеру работать с любой долей чистой шихты в металлозавалке. Отсюда вытекает возможность выплавки в электропечах чистых сталей, не уступающих в отношении содержания микропримесей цветных металлов сталям, получаемым в конвертере. При соответствующей технологии применения и вводе в состав синтикома углеродистых компонентов, синтиком является дополнительным энергоносителем. Этот

эффект основан на более полном использовании теплотворной способности углерода в синтикоме по сравнению с углеродом твердого чугуна, металлолома, науглероживателя, металлизированного сырья.

Материалы типа синтиком в отличие от твердого чугуна могут использоваться в конвертерах в количестве до 25 – 30 % и до 100 % в шихте электродуговых печей. В то же время синтиком может использоваться в сочетании с другими видами металлошихты, включая металлолом, в самых различных соотношениях без каких-либо ограничений.

Необходимо подчеркнуть, что основу синтикома составляет тот же железоуглеродистый расплав — чугун или полупродукт, только находящийся в твердом, а не в жидком состоянии. Одинаковый состав жидкого расплава и металлической основы синтикома, в том числе по содержанию микропримесей, полностью исключает влияние твердой части металлозавалки на чистоту выплавляемой стали. Этот случай является предельным и гарантирует достижение максимальной чистоты стали и стабильность ее состава.

В отличие от других видов металлошихты синтиком обладает более широкими функциональными возможностями. В частности, при вводе синтикома в жидкий металл развивается интенсивная реакция окисления углерода кислородом оксидов железа, имеющихся в синтикоме. Образующиеся пузырьки монооксида углерода вызывают барботаж металла и шлака и их перемешивание. Это, естественно, ускоряет окисление углерода, особенно в области концентраций ниже критических. Газообразующая способность синтикома составляет в зависимости от его состава 20 – 60 нм³/т композита. С учетом теплого расширения газа этот объем многократно возрастает. Это позволяет с успехом использовать этот материал для развития объемного кипения и перемешивания ванны. Высокая газотворная способность делает синтиком пенообразующим материалом, в частности, для вспенивания шлака. Это свойство открывает возможность для вспенивания конечного шлака конвертерной плавки с целью формирования шлакового гарнисажа на поверхности футеровки.

Синтиком, имея в своем составе оксиды железа, обладает развитым охлаждающим эффектом, и поэтому может использоваться также для охлаждения оставленного в конверторе жидкого шлака. В отличие от известного применения синтикома гарантирует полное охлаждение жидкого шлака до состояния затвердевания. Это исключает возникновение бурной реакции при заливке жидкого чугуна на окисленный конечный шлак. Следовательно, одним из вариантов использования синтикома в конвертерном производстве является охлаждение с помощью его жидкого шлака и возможности работы с оставлением части конечного шлака.

Относительно небольшие размеры чушек синтикома и их массы, а также постоянство их формы, размеров и массы открывают возможности для ввода этого материала по ходу продувки дискретным или непрерывным способом. Одновременно сохраняется возможность традиционной порционной

загрузки, в том числе совместно с металлоломом. Существующие системы подачи материалов в конвертер не позволяет вести загрузку фрагментированных металлических добавок по ходу плавки и лишают возможности использовать этот потенциал. Можно предполагать, что этот неиспользуемый сейчас резерв в ближайшей перспективе будет использован.

Чушки синтикома имеют плотность, близкую к плотности жидкого расплава чугуна или полупродукта. Это качество в сочетании с дополнительной энергией, приобретенной во время падения, обеспечивает погружение синтикома вглубь металлической ванны. Известно, что теплопередача от расплавленного металла к твердому телу отличается высокой интенсивностью. Эти факторы, а также низкая температура плавления металлической основы синтикома, с одной стороны, и высокая температура металлической ванны после ее расплавления ($1530 - 1570^{\circ}\text{C}$) резко ускоряет расплавление чушек синтикома, находящихся внутри жидкого расплава. Быстрое расплавление чушек внутри жидкой ванны позволяет вводить синтиком во время плавки.

Значительный интерес для сталеплавильных процессов представляет одна из разновидностей композиционных материалов типа синтиком, в котором вместо литой металлической основы – чугуна или углеродистого полупродукта используют измельченные железосодержащие металлодобавки. Получение синтикома с дисперсной металлической матрицей осуществляется по технологии брикетирования с использованием связующих компонентов. Источником металлодобавок могут быть металлоотсев фракции $0 - 10$ мм, получаемый из металлургических шлаков текущего производства и шлаковых отвалов. В настоящее время эти фракции преимущественно используются в агломерационном производстве. Этот способ применения является нелогичным и нерациональным, так как металлическое железо при этом возвращается в исходное оксидное состояние. Вследствие этого металлодобавки как металлическая шихта не используются.

Окусованные железосодержащие добавки могут дополнительно включать в свой состав углеродсодержащие вещества и шлакообразующие реагенты и иметь состав, аналогичный синтикому с литой чушковой основой. Помимо меньшей стоимости эти материалы могут содержать более высокую концентрацию углерода и совмещать фракции первородной металлошихты и энергоносителя. Тоже самое относится и к содержанию оксидов железа, которое в данном случае не имеет ограничений и может быть увеличено до $25 - 35\%$ вместо $10 - 20\%$ в синтикоме с литой матрицей. Возможность более широкого варьирования состава этого материала по сравнению с обычным литым синтикомом в сочетании с меньшей стоимостью железосодержащей части является одним из преимуществ нового вида синтикома.

Несколько слов об особенностях окисления углерода в присутствии железа газообразным кислородом. Как уже отмечалось выше, железо прямого восстановления и композиционные материалы типа синтиком отмечает

повышенное содержание углерода в растворенном и свободном состоянии. Как показали исследования, окисление углерода кислородом дутья в присутствии железа и одновременном его окислении протекает с огромными скоростями. Эти скорости в локальных зонах достигают 10 – 100 % углерода в минуту вместо 0,15 – 0,25 % углерода в минуту, отвечающих конвертерной ванне и которые являются максимальными по сравнению с мартеновскими и электродуговыми печами.

Поэтому в случае контакта этих материалов с кислородными струями происходит окисление углерода, сопровождающееся одновременным интенсивным горением железа. При этом выделяется значительное количество тепла, обеспечивающее расплавление исходного материала и поступление в окружающую шихту избыточного тепла. Последнее нагревает и расплавляет холодные шихтовые материалы, расположенные в непосредственной близости от сжигаемых материалов. Эти факторы заставляют по новому взглянуть на потенциал продуктов железа прямого восстановления и композиционных материалов типа синтиком. В этом случае при принятии необходимых мер частично или полностью снимаются ограничения по содержанию углерода в шихтовых материалах. Технология плавки при этом претерпевает определенные изменения.

Как уже отмечалось, физические свойства железа прямого восстановления позволяют использовать его в отличие от лома поразному, а именно загружать до начала плавки, вводить непрерывно по ходу плавки либо сочетать дискретный ввод с непрерывным. Соответственно этому изменяется условия расплавления. При вводе в исходную металлозавалку куски железа прямого восстановления вступают первыми в контакт с кислородом дутья. При этом происходит интенсивное вторичное окисление и сгорание железа одновременно с углеродом. Весьма высоким скоростям реакции окисления углерода в восстановленном материале, содержащем одновременно и углерод и железо, позволяет использовать железо прямого восстановления с любым, в том числе значительном содержанием углерода, не ограничивая его концентрацию в исходном материале. Поэтому при использовании металлизированного сырья в завалке ограничения по содержанию углерода отсутствуют. Конечно, высокое содержание углерода приводит к росту расхода кислорода на его окисление, но зато дает большее поступление тепла в начальный период продувки и улучшает тепловой баланс.

При подаче железа прямого восстановлению по ходу продувки они плавятся в шлаке преимущественно в периферийной зоне за пределами реакционной зоны. Этому способствует также то обстоятельство, что конструкция оборудования подачи сыпучих не обеспечивает рассредоточение вводимых материалов по поверхности ванны. В свою очередь неравномерное распределение их в объеме агрегата приводит к ошлаковыванию больших масс восстановленного материала, замедлению их проплавления, колебаниям процесса окисления углерода, сопровождаемым возрастанием скорости обезуглероживания ванны, и возникновением пикового газо-

выделения. Одновременно это сопровождается повышением выносов шлакометаллической фазы в газоотводящий тракт, заметалливанием фурм и элементов котла-охладителя и другими нежелательными явлениями. Наличие повышенной концентрации углерода усиливает эти эффекты, а также приводит к возрастанию расхода кислорода и длительности продувки. С этих позиций восстановленные материалы, которые предпочтительно вводить по ходу продувки, должны иметь ограниченное содержание углерода.

Изложенное выше показывает, что конвертерный процесс предъявляет другие требования к железу прямого восстановления по сравнению с электродуговыми печами. Сортамент восстановленных материалов включает в себя как материалы с высоким содержанием углерода, так и с малым его содержанием, близким к уровню стальному лому.

Анализ мировых тенденций и достигнутого уровня производства первичного железа — жидкого чугуна, углеродистого полупродукта и железа прямого восстановления для современного сталеплавильного производства, свидетельствуют о широком развитии исследований в этом направлении и определенных достижениях. Разработанные и производимые продукты первичного железа обладают известной и повышенной чистотой в отношении содержания примесей цветных металлов. Это создает предпосылки для их применения в качестве альтернативы загрязненному металлолому в конвертерах и электропечах для выплавки чистой стали.

Физико-химические характеристики железа прямого восстановления — пористость, плотность, высокое содержание углерода и кислорода, избыточное содержание углерода по отношению к концентрации кислорода, склонность к спеканию, вторичному окислению, пониженные теплофизические свойства слоя по сравнению с отдельными частицами существенно отличают эти материалы от металлолома. Это вызывает необходимость корректировки способов их ввода в агрегаты и технологии плавки.

Объем производимого металлизированного сырья не превышает 4 – 5 % от общего количества выплавляемой стали. В сочетании с относительно медленным ростом производства этой металлошихты и узкой географией выпуска — преимущественно страны латинской Америки и Ближнего Востока эти материалы не позволяют удовлетворить потребности сталеплавильного производства в чистой первородной шихте. Поэтому основные надежды на решение проблемы дефицита чистой шихты базируются на увеличении выплавки жидкого чугуна в доменных печах и широком развитии процессов жидкофазного восстановления, дающих в качестве конечного продукта жидкий чугун или углеродистый полупродукт. С этих позиций существенный интерес представляет процесс Корекс, доведенный до стадии промышленного процесса, а также процессы Ромелт, Хайсмет и их аналоги, прошедшие апробацию. Однако по состоянию на сегодня новые процессы жидкофазного восстановления по объемам выпуска значительно уступают доменному производству. Поэтому это производство еще длительное время сохранит свои позиции как основного источника получения жидкого чугуна,

Расширение выпуска жидкого чугуна и углеродистого полупродукта в агрегатах жидкофазного восстановления позволяет обеспечить в перспективе возрастающие потребности сталеплавильного процесса и в жидкой первородной шихте.

Одним из источников получения твердой чистой металлошихты для конвертерного и электросталеплавильного процессов является путь преобразования исходных жидких сплавов — чугуна или полупродукта в синтетические композиционные материалы — синтиком. Эти материалы содержат оксиды железа, являющиеся источником конденсированного кислорода для окисления углерода и других примесей литой металлической основы синтикома и превращение исходного высокоуглеродистого сплава в низкоуглеродистое железо. С этих позиций материалы типа синтиком являются аналогами чистого металлолома, твердого чугуна, железа прямого восстановления. Наличие одинаковой железоуглеродистой основы у передельного чугуна и углеродистого полупродукта и литого синтикома, отличающихся только физическим состоянием, обеспечивают гарантированное содержание микропримесей в стали, выплавляемой из твердой и жидкой шихты одинакового состава. В качестве исходного железоуглеродистого материала при получении композиционных материалов типа синтиком можно использовать предварительно рафинированный чугун с пониженным содержанием кремния, фосфора и серы. В этом случае расплав, образующийся при расплавлении чушек синтикома, обладает максимальной чистотой, и приближается к чистому железу.

Определенные перспективы представляют собой синтетические композиционные материалы с дисперсной металлической основой, получаемые путем окускования измельченных железосодержащих металлодобавок типа металлоотсева, извлекаемого из металлургических шлаков и очищенного от большей части шлаковых включений с другими компонентами, в частности, оксидами железа и углеродсодержащими веществами. В отличие от литого синтикома эти композиты допускают более широкое варьирование из состава, в частности, соотношение металлической части, углерод- и шлакообразующих компонентов. Это расширяет их функциональные возможности и сферы применения. Кроме того, стоимость их существенно ниже литого синтикома. Ускорение горения углерода в присутствии металлического железа при подаче на эту смесь газообразного кислорода существенно смягчает требования к исходной шихте по содержанию углерода и расширяет возможности использования металлошихты с высоким содержанием углерода. В этом случае недостатки, свойственные этим материалам, а именно большая удельная поверхность, высокая пористость, пониженная плотность, повышенная химическая активность исходных компонентов, склонность к вторичному окислению, превращаются в свою противоположность.

Наиболее благоприятные предпосылки для дальнейшего развития и обеспечения потребностей сталеплавильного производства имеют жидко-

В фазные способы получения чугуна и синтетические композиционные
е материалы типа Синтиком®, а также твердофазные процессы железа прямого
й восстановления в виде чугунных гранул.

Можно предполагать, что проблема создания новых материалов —
я заменителей лома будет решена в скором времени. Это позволит формировать
ь исходную металлозавалку из чистой первородной шихты и получать стали
в наивысшей чистоты.

Внимание к проблеме примесей цветных металлов в сталях, влияющих
л на физико-механические и эксплуатационные свойства готовой металло-
о продукции, приведет к введению новой классификации сталей, основанной
й на виде металлошихты, используемой для выплавки металла. Соот-
з ветственно этому принципу производимые стали могут быть разделены на
г три группы: из первородной шихты, металлолома и смеси первородных
, материалов и лома.

Такое положение уже имело место в черной металлургии, когда в
марочном сортаменте обязательно указывался способ выплавки стали и, тем
самым, состав исходной металлошихты. Сейчас опять возникла необхо-
димость в восстановлении разделения выплавляемых сталей по признаку
металлошихты.

Литература

1. Вагнер Ф., Великодня М. Перспективы развития внепечной обработки. "Steel Times International", выпуск на русском языке, № 7, сентябрь 1999 г., с.12 – 13.
2. Симонато Г., Мартинес А. Производство высокоплотного пассивированного железа прямого восстановления для электродуговых печей. "Steel Times International", выпуск на русском языке, № 10, сентябрь 2002 г., с. 9 – 13.
3. Установки Mesabi Nugget начало производства чугунных гранул по способу JТmk3®. "Steel Times International", выпуск на русском языке, № 12, май 2004 г., с. 4 – 5, 26.
4. Трахимович В.И., Шалимов А.Г. Использование железа прямого восстановления при выплавке стали. М.: Металлургия, 1982, 248 с.
5. Роменец В.А. Новые процессы производства металла. Состояние и перспективы. М.: МИСиС, 2001, 37 с.
6. Морозов А.Н. Современное производство стали в дуговых печах. 2-е изд., Челябинск.: Металлургия, 1987, 175 с.
7. Колпаков С.В., Старов Р.В., Смоктий В.В. и др. Технология производства стали в современных конвертерных цехах. М.: Машиностроение, 1991, 464 с.
8. Седых А.М., Юзов О.В., Афонин С.З. Черная металлургия России на фоне мирового рынка. Изд. 2-е. М.: ЗАО «Изд. Экономика», 2003, 256 с.
9. Поживанов М.А., Шахпазов Е.Х., Свяжин А.Г. Выплавки стали для автолиста. М.: Интерконтакт наука, 2006, 166 с.
10. Дорофеев Г.А., Уткин Ю.В., Афонин С.З. Труды третьего конгресса сталеплавильщиков. М.: Черметинформация, 1996, с.32 – 37.
11. Дорофеев Г.А., Уткин Ю.В., Тамбовский В.И. и др. Черная металлургия. Бюлл. НТИ. 1996, № 1, с.35 – 41.
12. Патенты РФ № 2001121, 2009207, 2075520, 2002571, 269478, 2092573, 2089331, 2087546 и др. Авт.: Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Уткин Ю.В., Шахпазов Е.Х. и др.
13. Патенты США № 5,738.704, 5,752.561. Авт.: Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х. и др.
14. Патент Китая № Z195190861.8. Авт.: Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х. и др.
15. Sizing Up Synticom 33 Metal producing. May, 1996, p.78.
16. Dorofeev G.A. Production and Use Syntikom®. International Meeting on Ironmaking. September 24-26, 2001, Belo Horizonte, Brasil, p.429-439.

Состав, свойства и особенности новых синтетических композиционных материалов типа синтиком®

2.1. Общие сведения и формула синтикома

Постоянное ухудшение качества стального лома и уменьшение его поступления, с одной стороны, и возрастающие требования к выплавляемой стали, с другой, вынуждают металлургов искать новые материалы для сталеплавильного производства. С этих позиций весьма важным шагом вперед стали создание и развитие процессов прямого получения железа. Однако современные мощности по производству губчатого железа и металлизированных окатышей, а также ряд существенных недостатков, которыми обладают данные материалы, не позволяет говорить о том, что проблема обеспеченности сталеплавильного производства металлошихтой в настоящий момент полностью решена.

В связи с нехваткой или невозможностью использования по тем или иным причинам таких материалов как стальной лом либо металлизированное сырье у сталеплавильщиков как и много сотен лет назад остался лишь один вид сырья, а именно передельный доменный чугун. Однако его применение при выплавке стали в составе металлошихты на уровне, близком к 100 %, технически, технологически и экономически не приемлемо.

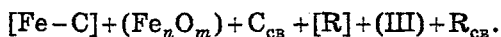
Выходом из сложившейся ситуации, на наш взгляд, является создание широкого спектра предварительно подготовленных синтетических композиционных материалов на основе передельного чугуна. При этом изменение металлургических свойств чугуна осуществляется за счет ввода в него различных наполнителей на стадии его разливки в слитки. Первым из таких материалов является синтиком®, получивший это название от первых букв синтетический композиционный материал оксид-металл. Синтиком в базовом варианте состоит из 75–95 % передельного чугуна и 5–25 % твердых окислителей — железорудных окатышей, железной руды, агломерата, окалины и др. [1 – 3] Железоуглеродистый расплав и оксиды железа, составляющие основу синтикома, относятся соответственно к металлам и минералам и поэтому обладают предельной контрастностью физико-химических свойств. Это обстоятельство привело к тому, что первоначально

этот материал получил название суперком. Искусственное объединение в одно целое столь разнородных компонентов с получением единого композиционного материала придает синтикому качественно новые свойства, отсутствующие у исходных компонентов при их раздельном применении. В результате этого синтиком качественно отличается от чугуна, составляющего основу композита. Это превращает синтиком в принципиально новый класс материалов с более высокими металлургическими свойствами и широким спектром применения.

Синтиком® (далее синтиком) — это общее название нового класса композиционных материалов с принципиально новым комплексом свойств, универсальным спектром применения и запрограммированным составом. Состав, свойства и поведение этих композитов в процессе выплавки стали задаются еще на стадии изготовления применительно к специфике конкретных сталеплавильных агрегатов. Производство синтикома осуществляют на модернизированных разливочных машинах для разлива чугуна в “чупки”, смешивая между собой высокоуглеродистый расплав с твердыми наполнителями. Для этого на машинах устанавливают дополнительное оборудование, позволяющее вводить в жидкий металлический расплав твердые компоненты в заданных количествах. В комплект дополнительного оборудования входят бункера для наполнителя, дозаторы для подачи его в литейные формы, система подачи расплава чугуна, прижимное устройство для притапливания всплывших частиц наполнителя, система синхронизации скорости подачи наполнителя и чугуна со скоростью движения ленты с расположенными на ней изложницами (литейными формами). Для формирования слитков с более равномерным распределением наполнителя подача жидкого чугуна может осуществляться в два приема. Установленное оборудование не препятствует использованию машины для разлива чугуна по обычной технологии. Поэтому первоначальные функции разливочной машины чугуна сохраняются в полном объеме.

Материалы типа синтиком включают в свой состав железоуглеродистый сплав и оксиды железа, а также углеродсодержащие и шлакообразующие компоненты. Они объединены в единое целое литой металлической матрицей, состоящей из чугуна либо углеродистого полупродукта. По физическому виду материалы представляют собой отливки, аналогичные по форме “чупкам” чугуна или полупродукта (рис. 2.1 и 2.2). Углерод играет роль восстановителя и энергоносителя, а оксиды железа — кислородоносителя и окислителя. Металлическая матрица выполняет в синтикоме также роль утяжелителя по отношению к оксидам железа, углеродным веществам и др. наполнителям, существенно повышая общую плотность композита до уровня жидкого чугуна и обеспечивая его погружение в расплав металла.

Обобщенная формула синтикома имеет вид:



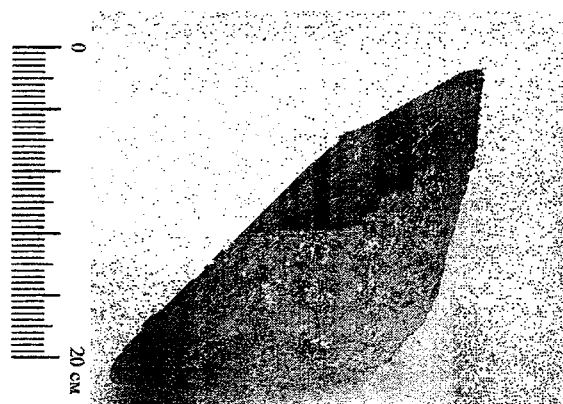


Рис.2.1. Внешний вид слитки синтикома.

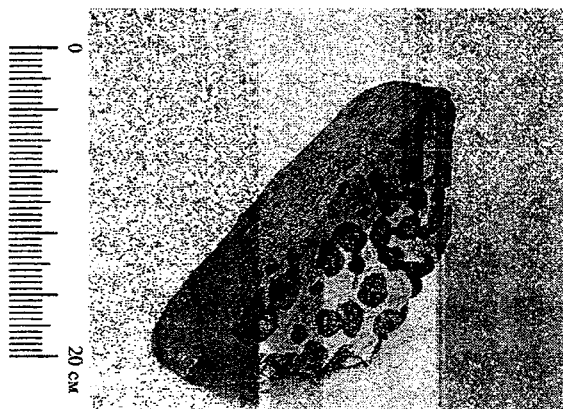


Рис.2.2. Слиток синтикома в разрезе.

где $[Fe-C]$ — железоуглеродистый сплав; $[Fe]$ — ведущий базовый элемент (железо); $[C]$ — углерод, растворенный в железе; $C_{св}$ — углерод в свободном виде, нерастворенный в железе; (Fe_nO_m) — оксиды железа; $[R]$ — элементы-восстановители, входящие в состав сплава $[Fe-C]$; $[R]_{св}$ — то же в свободном виде, нерастворенные в железе; $(Ш)$ — шлакообразующие компоненты.

Состав и основные характеристики распространенных марок композитов типа синтиком приведены в табл.2.1.

Теплопроводность синтикома составляет $14,5 - 21,5 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, теплоемкость $0,6 - 0,8 \text{ кДж/(кг}^\circ\text{K)}$, масса чушек $8 - 35 \text{ кг}$ и более. Удельная поверхность оксидов железа и высокоуглеродистой металлической матрицы в синтикоме изменяется в пределах $10 - 60 \text{ м}^2/\text{т}$ и намного превосходит межфазную границу шлак-металл в сталеплавильных агрегатах.

Таблица 2.1

Состав и основные характеристики композитов типа синтиком

Марка синтикома	Содержание основных компонентов, масс. %		Химический состав основных элементов, масс. %			Соотношение углерод-кислород	Общее содержание микро-примесей*, масс. %	Плотность, ³ Не более	Насыпная масса, т/м ³	Энерго-потенциал (охлаждающая способность)**
	Чугун (полупродукт)	Твердые окислители	Fe _{общ}	C	O					
СК10	90	10	92,9	3,8	2,8	1,35	Не более 0,05	6,7	2,8-3,2	0,89
СК15	85	15	90,5	3,6	4,2	0,85	Не более 0,05	6,6	2,7-3,1	1,03
СК20	80	20	89	3,4	5,6	0,6	Не более 0,05	6,5	2,6-3,0	1,24

* Cu+Cr+Ni+Sn+Mo,

** по сравнению со скрапом

Ввод в жидкий расплав чугуна твердых частиц — железорудных окатышей изменяет условия затвердевания расплава и приводит к изменению структуры чугуна синтикома.

На рис.2.3 приведена структура синтикома из высокоуглеродистого литейного чугуна до и после шлифовки. Исследования выполнены инж. Р.Каргиллом по заказу фирмы "Плантадженет Холдинг Лимитед" (г.Сан-Франциско, США). Чугунная матрица этого образца представляет собой (рис. 2.4) типичную микроструктуру серого чугуна с графитовыми чешуйками в ферритовой основе. Эти чешуйки видны как темная «паутина» и типичны для чугуна. На границе чугуна с окатышами, играющими роль холодильников, ферритовая структура и графитовые частицы измельчаются (рис. 2.5). Эти факторы указывают на более быстрое затвердевание чугуновой матрицы вблизи от поверхности окатышей. Обращает на себя внимание (рис. 2.4), что связь чугуновой матрицы с гранулами железа слабая, вследствие чего некоторые гранулы выпали из основы.

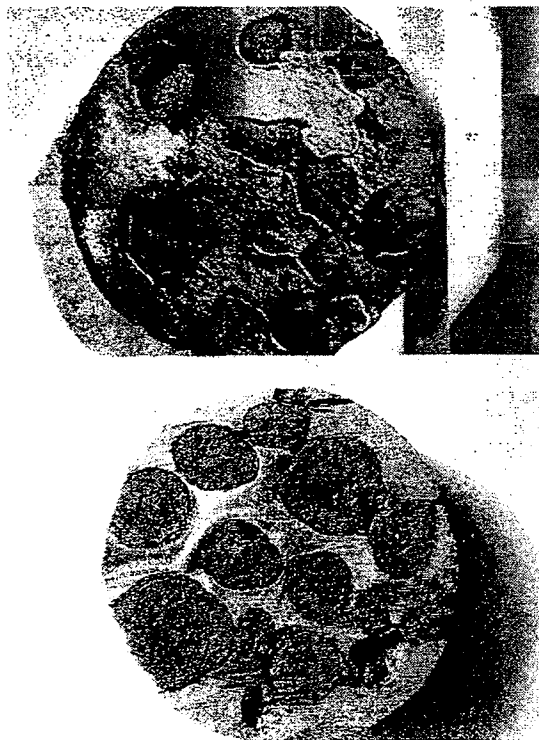


Рис.2.3. Внешний вид и разрез образца синтикома с нормальным охлаждением до и после шлифовки.

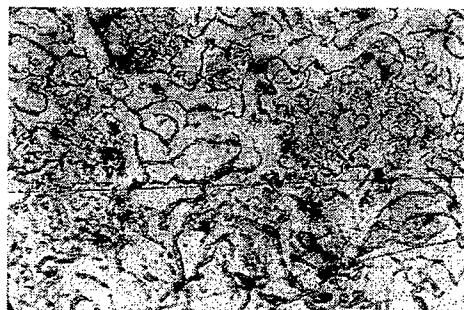
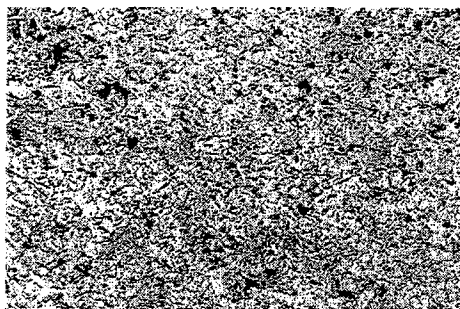


Рис.2.4. Структура чугуна синтикома образца А.

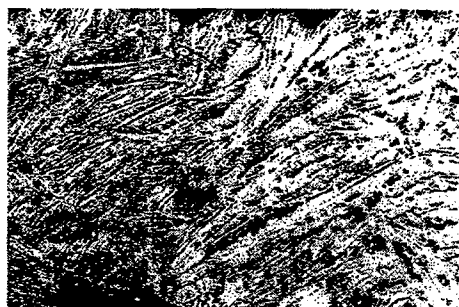


Рис.2.5. Структура чугуна синтикома образца А.

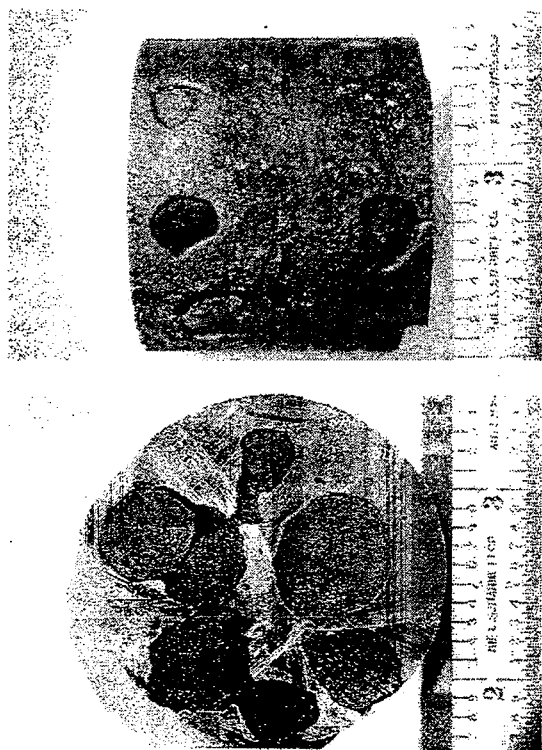


Рис.2.6. Внешний вид и разрез образца синтикома Б с ускоренным охлаждением до и после шлифовки.

Увеличение скорости охлаждения и затвердевания чугуна приводит к появлению в структуре синтикома значительного количества карбида железа Fe_3C . Внешний вид такого образца приведен на рис. 2.6. Белые прожилки внутри перлитной матрицы этого образца (рис.2.7) представляют собой карбид, возникший в результате ускоренного затвердевания чугуна синтикома. Типичная структура быстроохлажденного заэвтектического чугуна синтикома представлена на рис.2.8. Она представляет собой две фазы — карбид и перлит.

Изложенные выше данные свидетельствуют о том, что структура чугуновой матрицы синтикома может быть разной и изменяется в пределах от серого до белого чугуна.

Соотношение металлическая матрица — окислитель и соотношение углерод — кислород в синтикоме варьируются в широких пределах в зависимости от его предназначения (рис.2.9). Основным регулятором содержания углерода в синтикоме являются углеродсодержащие компоненты, вводимые дополнительно в состав композита. С этих позиций

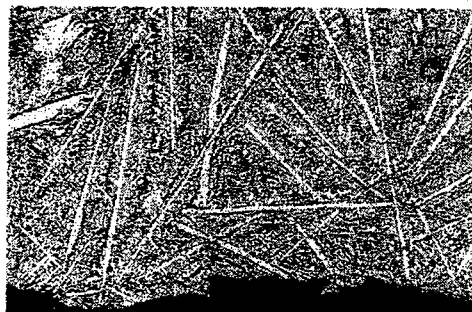
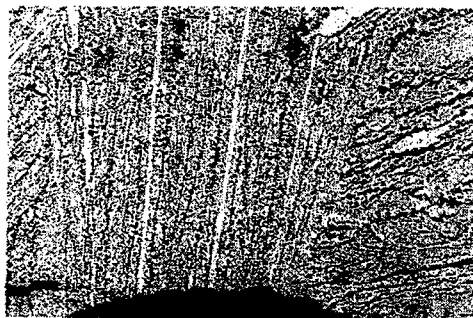


Рис.2.7. Карбид железа чугуна синтикома образца Б.

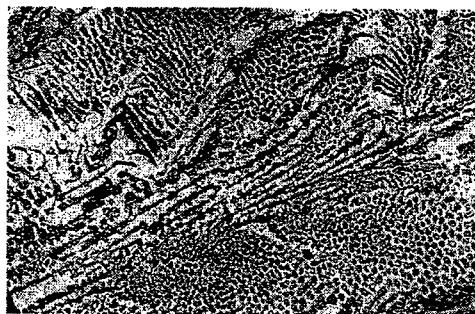


Рис.2.8. Структура чугуна синтикома образца Б.

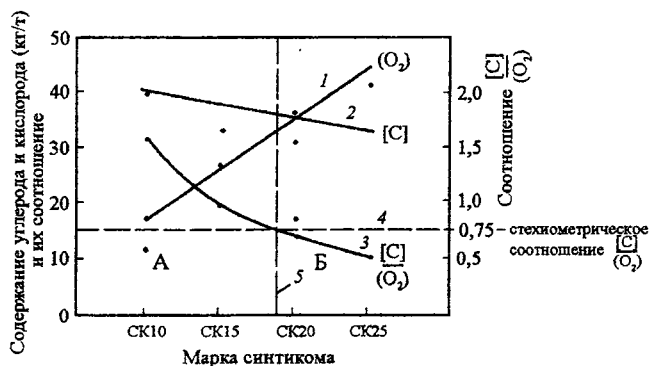


Рис.2.9. Зависимость содержания углерода и кислорода и их соотношения от состава синтикома: А — область, в которой соотношение $[C/O_2]$ меньше стехиометрической величины; Б — область, в которой соотношение $[C/O_2]$ больше стехиометрической величины; Линия 5 соответствует стехиометрической величине 0,75.

синтиком разделяется на два класса: не содержащий углерода и содержащий дополнительный углерод, например, в виде смеси его с оксидами железа (рудоугольные брикеты или окатыши).

Принцип “работы” синтикома основан на окислении примесей его железоуглеродистой матрицы — С, Si, Mn, P, Cr, V, Ti, Р во время ее расплавления собственным кислородом, содержащимся в самом материале, и одновременном восстановлении оксидов железа. В результате реакций окисления-восстановления исходная железоуглеродистая матрица (чугун, полупродукт) превращаются в низкоуглеродистый расплав, а оксиды железа частично или полностью восстанавливаются до железа. Полученное из оксидов новое железо в количестве 65 – 150 кг/т композита поступает в ванну печи, смешиваясь с жидким металлом. При наличии избытка оксидов железа часть их остается в невосстановленном состоянии и переходит в шлак. Степень восстановления оксидов определяется исходным составом синтикома, прежде всего содержанием углерода, и может достигать 100 %.

Процессы нагрева, расплавления, окисления углерода и др. примесей, восстановления оксидов железа, формирования шлака, образования продуктов реакций, выделения СО и его дожигания до CO_2 в синтикоме идут параллельно и одновременно.

Наличие в составе синтикома собственного окислителя-кислорода преимущественно в виде Fe_2O_3 обеспечивает идеальное согласование процессов окисления примесей его основы (рафинирования) и восстановления оксидов железа углеродом и другими примесями с нагревом и расплавлением композита.

2.2. Основные металлургические особенности синтикома

- Постоянство размеров “чушек”, их формы, массы и поверхности;
- Относительно небольшая масса “чушек” 8 – 35 кг.

Указанные выше качества открывают возможность ввода синтикома по ходу плавки, который может быть дискретным, непрерывным либо комбинированным. Это создает широкие возможности для совершенствования технологии электро- и конвертерной плавки.

- Известная металлургическая наследственность;
- Постоянство состава, физических и химических свойств.

Эти свойства позволяют отнести синтиком к чистой первородной шихте. Они гарантируют получение конечного металла с повышенной и стабильной чистотой по примесям цветных металлов.

— Одновременное присутствие высоких содержаний собственного кислорода и углерода — 0,5 – 7,5 и 2,7 – 6 %, соответственно;

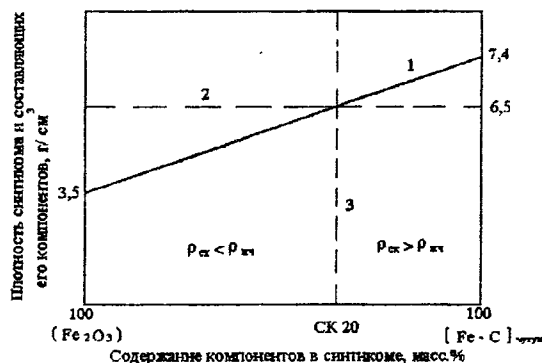
— Максимальный окислительно-восстановительный потенциал этих компонентов;

— Высокоразвитая удельная поверхность реагирования оксидов железа и железуглеродистой матрицы, равная 10 – 60 м²/т металлической матрицы;

Отмеченные особенности обеспечивают при расплавлении синтикома образование высокоактивной жидкой смеси углеродистого расплава и жидких оксидов железа, в результате чего достигаются исключительно высокие скорости окисления углерода и восстановления оксидов железа углеродом. Скорость обезуглероживания в синтикоме составляет 0,2 – 0,4 % С/мин. и более, что отвечает значениям, наблюдаемым в кислородных конвертерах, и существенно превышает скорости окисления углерода в дуговых печах. Скорость восстановления оксидов железа, отнесенная к единице объема материала, при этом также велика и составляет 10 – 83 кг/(с·м³). Это на несколько порядков выше, чем в доменных и шахтных печах. Высокие скорости реакции окисления углерода — восстановления железа и совмещение с расплавлением композита исключают их влияние на длительность плавки.

— Повышенная плотность материала, достигающая 6500 – 6700 кг/м³ и приближающаяся к плотности жидкого чугуна (рис.2.10).

Такая плотность в сочетании со скоростью их падения обеспечивает погружение “чушек” синтикома в объем жидкого чугуна и их нахождение в расплаве в течение времени, равно продолжительности расплавления “чушки” или времени ее жизни в металлической ванне. Благодаря этому оксиды железа, углерод и другие компоненты, находясь внутри чушек синтикома, удерживаются внутри металлической ванны от момента ввода их в жидкий металл и до полного расплавления. При наличии в синтикоме избыточного количества оксидов железа непрореагировавшие оксиды



- 1 - изменение плотности синтикома в зависимости от его состава;
 2 - плотность жидкого передельного чугуна чугуна, г/см³;
 3 - линия, в которой $\rho_{ск} = \rho_{ст}$

Рис.2.10. Зависимость плотности синтикома от его состава.

поступают в металлическую ванну, принося с собой кислород в конденсированном состоянии, который служит окислителем примесей ванны. С этих позиций введение в расплав синтикома представляет собой новый способ ввода кислорода в ванну.

— Регулируемая в широких пределах охлаждающая способность, которая может быть как больше, так и меньше охлаждающей способности лома.

Благодаря этому синтиком может быть как охладителем плавки, так и дополнительным энергоносителем.

— Температура плавления металлической матрицы и твердых окислителей, составляющая соответственно 1150–1250°C и 1290–1400°C, существенно ниже температуры плавления стального скрапа (1500–1530°C).

Пониженная температура плавления синтикома обеспечивает опережающее его расплавление по сравнению с более тугоплавкими составляющими металлошихты и всей металлозавалкой в целом.

Способность синтикома расплавляться при температуре, которая ниже температуры плавления лома на 250–350°C, в сочетании с наличием в составе синтикома кислорода в виде оксидов железа и углерода в растворенном либо растворенном и свободном состояниях, находящихся в тесном контакте и имеющих максимальную активность, создают необходимые и достаточные условия для начала интенсивного окисления углерода и восстановления железа из его оксидов в области весьма низких температур нагрева, начиная с 1150°C.

Отмеченное свойство синтикома не имеет аналогов в металлургии стали. Оно открывает возможность сдвига окисления углерода в электропечах на начало плавления твердой металлозавалки.

— Высокая газотворная способность в отношении выделения монооксида углерода, составляющая $20 - 70 \text{ нм}^3/\text{т}$ композита, обусловленная весьма значительным содержанием углерода и кислорода (рис.2.9).

Нагрев и расплавление синтикома сопровождается интенсивной реакцией между углеродом и кислородом, присутствующими в композите, образованием и выделением CO и CO_2 на плавящейся поверхности "чушек" синтикома. При вводе в жидкий металл композит выполняет роль очагов газовыделения в ванне, перемешивая металл и шлак и ускоряя процессы тепломассообмена аналогично донной продувке.

Присущий синтикому широкий комплекс весьма необычных свойств, отсутствующий у других материалов, предопределяет особое поведение композита в сталеплавильной ванне и открывают широкие предпосылки для более эффективного управления физико-химическими процессами сталеварения по сравнению с известными видами металлошихты.

2.3. Особенности окисления углерода в синтикоме

Углерод в синтикоме начинает окисляться в период его расплавления, когда исходная металлошихта находится в твердожидком состоянии, а не в жидкий окислительный период, как при других видах шихты. При расплавлении синтикома оксиды железа и его металлическая основа превращаются в жидкое состояние и нагреваются до высоких температур ($1450 - 1700^\circ\text{C}$), образуя между собой тесную смесь из железоуглеродистого расплава и жидких оксидов железа с весьма развитой поверхностью контакта. Эта гомогенная смесь аналогична той, что образуется в реакционной зоне при вдувании кислорода в жидкий металл. Поэтому окисление углерода — основная реакция сталеварения и восстановление оксидов железа углеродом протекают в расплавленном синтикоме с высокими скоростями. Благодаря этому окисление углерода в синтикоме не увеличивает длительность обезуглероживания ванны.

Окисление углерода, образование и выделение CO происходит непрерывно на протяжении всего периода плавления синтикома и, что особенно важно, более плавно и равномерно по сравнению с обезуглероживанием при использовании других видов металлошихты. Это обеспечивает более ровный и спокойный характер окисления углерода, гарантирует получение заданных, в том числе низких содержаний углерода в металлической ванне, снижает максимальную величину скорости обезуглероживания, позволяет получить равномерное образование и поступление CO по ходу плавки. При этом окисление углерода, образование CO , его дожигание до CO_2 , передача тепла дожигания окружающей шихте, окисление примесей чугуна синтикома — Si , Mn , Ti , Cr , P , его рафинирование, восстановление железа из оксидов, формирование шлаковой фазы происходит параллельно и одновременно с расплавлением компонентов шихты и всей металлозавалки в целом.

Отмеченные выше особенности указывают на то, что основная реакция производства стали, а именно окисление углерода в синтикоме протекает принципиально по-другому. Главным ее отличием является раннее начало окисления углерода при пониженных температурах нагрева композита еще в период его расплавления, причем с высокими и стабильными скоростями. Сочетание этих особенностей превращает синтиком в материал с уникальным комплексом свойств. Благодаря этому введение синтикома в шихту электроплавки означает внесение в нее элементов, характерных для кислородно-конвертерного процесса, а именно, окисление углерода с чрезвычайно высокими скоростями, отвечающими конвертерной плавке, причем с самого начала проплавления исходной металлозавалки.

2.4. Возможная экономия энергии и дожигания СО до СО₂

Плавление синтикома сопровождается образованием СО и его дожиганием внутри слоя твердой металлозавалки. Это обеспечивает идеальные условия для более полного дожигания СО до СО₂ и передаче тепла дожигания твердой и жидкой шихте, находящейся в печи. Вследствие этого степень дожигания и степень использования энергии дожигания существенно возрастают — до 90 – 100 и 50 – 90 % соответственно. В результате этого достигаемая экономия энергии от окисления углерода при применении синтикома увеличивается с 2 – 3 кВтч до 5 – 8 кВтч на 1 кг углерода по сравнению с другими видами металлошихты, в том числе твердого чугуна. В последнем случае окисление углерода, образование СО и его дожигание до СО₂ происходит после расплавления металлозавалки при жидком состоянии ванны и наличие на поверхности ее слоя шлака. Вследствие этого эффективность использования энергопотенциала углерода существенно падает. Дополнительное количество тепла, получаемое при окислении углерода синтикома, в котором соотношение С/О равно или больше стехиометрической величины, оказывается достаточным для частичной и даже полной компенсации затрат энергии на восстановление железа из его оксидов и ввода в печь энергии на уровне, отвечающему твердому чугуну. С этих позиций синтиком следует рассматривать как материал, существенно улучшающий использование углерода как энергоносителя. Особое значение это имеет для дуговых электропечей последнего поколения, отличающихся повышенной высотой рабочего пространства, гарантирующей лучшее использование тепла дожигания. Далее этот вопрос будет рассмотрен подробнее.

2.5. Области применения синтикома

Применение разработанных композиционных материалов позволяет довести долю первородной шихты в сталеплавильных агрегатах до 100 % и производить особо чистые марки сталей с пониженной и гарантированной

концентрацией примесей цветных металлов. Ввод твердого окислителя в объем передельного чугуна значительно интенсифицирует процесс окисления углерода и других элементов, позволяет повысить степень усвоения тепла дожигания и ускорить процесс расплавления металлошихты и нагрев металла до температуры выпуска. Эти композиты можно отнести к продуктам высокой технологии и поколению "умных" материалов, поскольку их состав, свойства и результаты программируются заранее на стадии их изготовления. Благодаря этому новые синтетические материалы обладают возможностями для удовлетворения самых разнообразных требований, предъявляемым сталеплавильным производством.

Композиционные материалы типа синтиком являются чистой первородной шихтой и обладают регулируемым охлаждающим эффектом по отношению к стальному лому, который может изменяться в зависимости от назначения в широких пределах — от 0,85 до 1,45.

Благодаря этим качествам применение синтикома обеспечивает следующие преимущества:

1. Прогнозирование с высокой точностью содержания углерода, фосфора, серы, хрома, никеля, меди и др. элементы в стали перед выпуском.

2. Выплавку качественной стали с низким содержанием хрома, никеля, меди, фосфора, серы.

3. Регулирование теплового баланса плавки без применения дополнительных теплоносителей и охладителей в условиях нехватки или избытка жидкого чугуна и стального лома.

4. Стабильность шихтовки плавки при различном соотношении долей жидкого чугуна и стального лома.

5. Точный расчет параметров кислородной продувки.

6. Сохранение или увеличение объемов производства стали при нехватке стального лома.

7. Снижение себестоимости качественной стали с низким содержанием вредных примесей.

С экономической точки зрения преобразование 1 т передельного чугуна в синтиком наиболее распространенных марок СК-15 и СК-20 обеспечивают дополнительное получение 65 – 150 кг/т чугуна нового восстановленного из оксидов железа и поступление 30 – 45 м³/т кислорода.

Материалы этого класса являются многофункциональными и могут выполнять наряду с ролью чистой шихты следующие функции:

- охладителя плавки или дополнительного энергоносителя;

- дополнительного регулятора восстановительно-окислительного потенциала процесса сталеварения;

- средства интенсификации процесса обезуглероживания ванны в области пониженных концентраций углерода;

- реагента для внедоменного рафинирования чугунов, в том числе природнолегированных;

- охладителя и раскислителя оставленного конечного шлака.

Материалы типа синтиком являются в металлургии стали первыми материалами, обладающими столь широким спектром применения.

Синтиком в качестве металлошихты может использоваться как самостоятельно, так и в комбинациях с любыми видами металлошихты, включая твердый и жидкий перепельный чугун, стальной лом, железо прямого восстановления.

С позиций твердой металлошихты синтиком является аналогом чистого тяжеловесного стального лома, отличаясь от него в лучшую сторону регулируемы́ми окислительно-восстановительными свойствами и широкими пределами изменения энергетического потенциала — от охладителя до энергетика, пониженной температурой плавления, постоянством размеров, формы и массы чушек и их относительно малой массой, а также содержанием окислителя в виде оксидов железа и в случае необходимости дополнительного количества свободного углерода.

Синтиком пожаро- и взрывобезопасен, экологически чист, не требует специальных мер при хранении, транспортировке и загрузке в печь. При плавлении "чушки" этого материала, благодаря образованию CO , не свариваются между собой в отличие от твердого чугуна и не образуют массивных конгломератов.

2.6. Новые перспективные области применения синтикома

— Интенсификация обезуглероживания по ходу продувки ванны, изменение характера окисления углерода с переводом его в режим объемного обезуглероживания ванны;

— Устранение падения скорости окисления углерода при снижении концентрации углерода в металле ниже 0,3 %, исключение переокисления металла и шлака;

— Нагрев металлической ванны, в том числе на заключительной стадии продувки за счет тепла дожигания CO до CO_2 ;

— Перемешивание металла и шлака после окончания продувки за счет CO , образующегося при реакции углерода и кислорода в синтикоме с частичным или полным отказом от донной продувки;

— Предварительное рафинирование перепельных чугунов, включая природнолегированные, от примесей Ti , V , Cr , Si , Mn ;

— Обработка конечных сталеплавильных шлаков для восстановления железа из его оксидов.

Одновременное сочетание в синтикоме различных качеств — металлошихты, технологической добавки, материала с изменяемым энергетическим потенциалом, а также средства рафинирования чугуна, реагента, охлаждающего шлака, позволяет рассматривать эти композиты как материалы с весьма широкими функциональными возможностями и значительной сферой

применения. Можно полагать, что отмеченные выше функции не исчерпывают всех возможностей синтикома.

Объединение отдельных компонентов единый материал — композит устраняет недостатки, свойственные составляющим компонентам — твердому чугуна и железорудным окислителям при их раздельном применении. Это открывает новые возможности для эффективного использования в производстве стали таких традиционных материалов как твердый чугун и железорудные окислители, объединенных в единый материал — синтиком.

Литература

1. Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х. 60 лет кислородно-конвертерному производству в России. Сб. статей. М.: Интерконтакт Наука, с.246 – 264.
2. Дорофеев Г.А. Шахпазов Е.Х. Проблемы черной металлургии и материаловедения. ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина”. 2007, № 1, с. 5 – 10.
3. Дорофеев Г.А., Шахпазов Е.Х., Югов П.И., Афонин С.З., Карпов А.А. Труды девятого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2007, с.76 – 84.

Механизм, термодинамика и кинетика окисления углерода и других элементов в синтикоме

3.1. Методика исследования кинетики обезуглероживания при нагреве и плавлении синтикома

Синтетический материал металл-оксид (синтиком) состоит в простейшем случае из передельного чугуна с распределенными в нем окисленными окатышами.

Синтиком обладает двойственной металлургической природой. С одной стороны, это металл с большим содержанием углерода, закономерности окисления которого хорошо изучены сталеплавильщиками [1 – 6]. С другой — в состав синтикома входит большое количество оксидов железа, механизм восстановления которых давно является предметом исследования рудно-термистов [7 – 11].

По отдельности эти процессы давно и хорошо изучены. Однако такое их необычное тесное переплетение, как в синтикоме, приводит к появлению новых явлений, систематическое исследование которых и проведено в настоящей работе.

Синтиком содержит в смешанном состоянии большие количества углерода и кислорода, готовых при достижении соответствующих условий к реагированию. В этом отношении он подобен металлизированным окатышам со свободным сажистым углеродом, для изучения процесса обезуглероживания которых вполне пригодны методы термогравиметрии со сканированием температуры с применением малой навески (менее 50 г) [12 – 15].

В отличие от таких окатышей синтиком гораздо более неоднородный объект и для его исследования более подходят способы аналогичные методам определения восстановимости окисленных окатышей с массой пробы до 1 кг [16]. Прямо использовать такие методики не представляется возможным из-за низкого верхнего температурного предела работы по таким методам (менее 1300°C). Синтиком же подвергается действию всего интервала металлургических температур — до 1600°C и выше.

Для изучения кинетики обезуглероживания и механизма плавления данного шихтового материала была разработана и использована оригинальная методика исследования, сочетающая большую массу образца с контролируемым линейным нагревом и непрерывным анализом газовой фазы. Эта лабораторная методика в дальнейшем может служить основой для создания аттестационных методов контроля качества синтикома.

Для изготовления образцов синтикома с заданным содержанием наполнителя применена технология литья в закрытые земельные формы отсечкой печного шлака. Синтетический чугу́н для литья синтикома выплавляли в 3-х кг открытой индукционной печи из армо-железа и порошка графита с добавлением 75 % ферросилиция, металлического марганца, ферросеры и феррофосфора. Получаемый чугу́н содержал обычно 4,3 % [C], 0,05 – 2 % [Si], 0,7 % [Mn], 0,03 % [S] и 0,1 % [P] (в среднем).

В состав синтикома вводили тот или иной наполнитель: окисленные окатыши, кусковую железную руду, синтетические безобжиговые рудогольные окатыши, офлюсованные окатыши, кусковой кокс и др.

Расчетное количество наполнителя засыпали в подготовленные земельные формы, закрывали и заливали жидким чугуном. Охлажденные отливки очищали от пригара и остатков литниковой системы, маркировали и использовали в дальнейших опытах. Схематическое изображение некоторых видов синтикома приведено на рис.3.1.

На полученных образцах провели опыты по исследованию поведения примесей синтикома при его нагреве и плавлении с последующей выдержкой расплава при 1660°C. Использована вакуумная печь сопротивления (рис.3.2), позволяющая работать в контролируемой атмосфере и отбирать



Рис. 3.1. Основные исследованные виды синтикома с оксидным и углеродистым наполнителями.

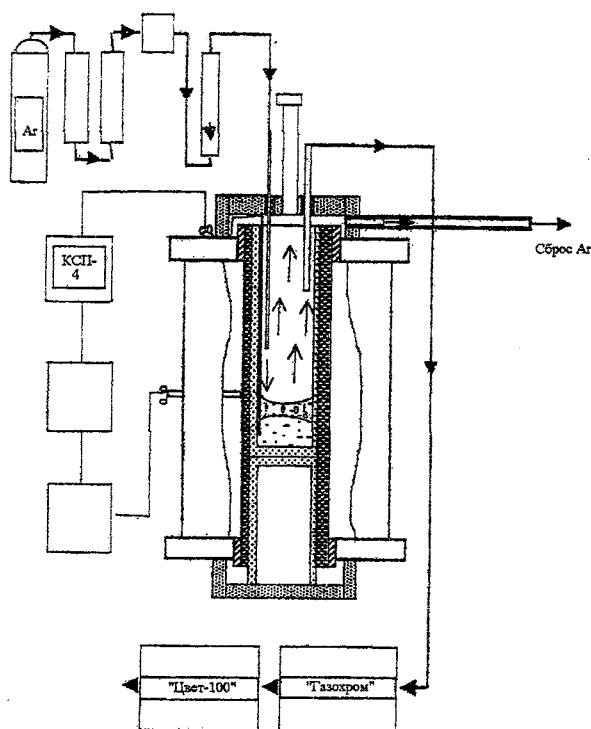


Рис. 3.2. Схема лабораторной установки.

пробы металла без попадания воздуха в рабочее пространство печи. Скорость линейного нагрева печи составляла $9 - 25^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Во время экспериментов образец синтикома, помещенный в газоплотный высокий алуновдвый тигель с внутренним диаметром 65 мм, омывался непрерывным стабилизированным потоком аргона с расходом 700 или $1000 \text{ см}^3/\text{мин}$. Часть ($30 \text{ см}^3/\text{мин}$) выходящего из реакционного объема аргона с захваченными газами, образовавшимися в результате окислительно-восстановительных реакций в синтикоме, анализировали при помощи универсального хроматографа "Газохром 3101" (анализ на $\{\text{CO}\}$ и $\{\text{H}_2\}$) и специализированного хроматографа "Цвет-100" с высокочувствительным детектором пирокатарометром (анализ на $\{\text{CO}_2\}$).

3.2. Особенности взаимодействия углерода и оксидов железа в синтикоме

В процессе нагрева и плавления пихтовой заготовки происходит взаимодействие углерода и оксидов железа по следующим реакциям [10]:





а также по реакциям:



Как видно из реакций, при окислении 1 моля углерода ($\mu_c = 12,011$ г) выделяется 1 моль CO ($V_\mu = 22414$ мл), который в дальнейшем может доокислиться до диоксида углерода, но количество молей газообразных продуктов реакции не изменится. Следовательно, при изменении массы углерода на величину dm_c будет выделяться dV_{CO} мл окиси углерода, откуда:

$$dm_c = \mu_c / V_\mu \cdot dV_{CO} \quad (3.8)$$

поделив левую и правую части уравнения на dt , получим:

$$dm_c / dt = \mu_c / V_\mu \cdot dV_{CO} / dt. \quad (3.9)$$

Учитывая, что $\mu_c / V_\mu \cdot dV_{CO} = v_{CO}$ — мгновенный объемный расход CO (мл/мин), то есть объем окиси углерода, выделяющийся в единицу времени, скорость горения углерода dm_c / dt (г/мин) равна

$$dm_c / dt = \mu_c / V_\mu \cdot v_{CO}. \quad (3.10)$$

Концентрация оксида углерода в газовой фазе $\{CO\}$ связана с мгновенным объемным расходом окиси углерода соотношением:

$$\{CO\} = 100 \cdot \frac{V_{CO}}{V_{Ar} + V_{CO} + V_{CO_2}}. \quad (3.11)$$

Используя полученные уравнения получаем выражение, связывающее скорость убыли массы углерода за счет образования оксида углерода с концентрацией оксида углерода в газовой фазе:

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{\mu_c}{V_\mu} \cdot V_{Ar} \cdot \frac{\{CO\}}{(100 - \{CO\} - \{CO_2\})}. \quad (3.12)$$

Если окисление углерода приводит к образованию диоксида углерода в газовой фазе CO_2 , то повторяя данные рассуждения, получаем аналогичное уравнение:

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{\mu_c}{V_\mu} \cdot V_{Ar} \cdot \frac{\{CO_2\}}{(100 - \{CO\} - \{CO_2\})}. \quad (3.13)$$

Итоговое уравнение, связывающее скорость окисления углерода с составом отходящих газов, равно сумме (3.12) и (3.13):

$$\frac{dm_c}{d\tau} = 100 \cdot \frac{\mu_c}{V_\mu} \cdot v_{Ar} \cdot \frac{\{CO\} + \{CO_2\}}{100 - \{CO\} - \{CO_2\}}. \quad (3.14)$$

Интегрируя выражение (3.14) в пределах от 0 до t , получаем выражение для описания зависимости количества сгоревшего углерода чугуна от времени:

$$m_c(t) = m_c^0 - \int_0^t (dm_c(t)/dt) dt. \quad (3.15)$$

Зависимость скорости изменения концентрации углерода в металле (приближенно) получается из уравнения (3.14):

$$\frac{d[C]}{d\tau} = 100 \cdot \frac{\mu_c}{V_\mu M_{Me}} \cdot v_{Ar} \cdot \frac{\{CO\} + \{CO_2\}}{100 - \{CO\} - \{CO_2\}}, \quad (3.16)$$

где M_{Me} — средняя по времени плавки масса жидкого металла.

Для условий нашего эксперимента, когда расход аргона через печное пространство поддерживали постоянным и равным $V_{Ar} = 700$ мл/мин, уравнение (3.13) можно переписать в виде:

$$\frac{d[C]}{d\tau} = \frac{100}{M_{Me}} \cdot 0,3746 \cdot \frac{\{CO\} + \{CO_2\}}{100 - \{CO\} - \{CO_2\}}. \quad (3.17)$$

Интегрируя выражение (3.17) в пределах от 0 до t , получаем выражение для описания зависимости концентрации углерода в металле от времени:

$$[C](t) = [C]_0 - \int_0^t (d[C](t)/dt) dt. \quad (3.18)$$

По уравнению (3.17) в дальнейшем рассчитывали мгновенную скорость окисления углерода при переделе синктикома, а по уравнению (3.18), проводя численное интегрирование, — концентрацию углерода в металле в любой момент плавки. В этом заключается одно из достоинств разработанной методики — она позволяет определять концентрацию углерода в металле на протяжении всего эксперимента, в том числе и там, где прямой отбор металла физически невозможен.

Введем новые интегральные параметры, характеризующие процесс передела синтикома в сталь: δ_C — степень обезуглероживания; α_O — степень восстановления; β_{Fe} — степень металлизации. По определению следует:

$$\delta_C = m_C(t) / \sum m_C, \quad (3.19)$$

$$\alpha_O = m_O(t) / \sum m_O, \quad (3.20)$$

$$\beta_{Fe} = m_{Fe}(t) / \sum m_{Fe}, \quad (3.21)$$

где $m_C(t)$ — масса углерода синтикома, сгоревшего к моменту t ; $\sum m_C$ — суммарное количество углерода, содержавшееся в чугуна синтикома до начала передела; $m_O(t)$ — масса кислорода синтикома, удаленного к моменту t ; $\sum m_O$ — суммарное количество кислорода, содержавшееся в оксидах железа синтикома до начала передела; $m_{Fe}(t)$ — масса железа из рудной части синтикома, восстановленного к моменту t ; $\sum m_{Fe}$ — суммарное количество железа, содержавшееся в оксидах железа синтикома до начала передела.

Используя рассуждения подобные приведенным выше, получили выражения, связывающие степень обезуглероживания, степень восстановления и степень металлизации с наблюдаемым в опыте составом отходящей газовой фазы:

$$\delta_n(\tau) = \frac{1}{\frac{(100 - \%ok)[C]_{isx}}{m_{sk}} \frac{\mu_{Int}^t}{10000}} \mu_{Int}^t, \quad (3.22)$$

$$\alpha_O(\tau) = \frac{1}{\frac{(\%ok)(Fe_2O_3)_{isx}}{m_{sk}} \frac{3\mu_O}{2\mu_{Fe} + 3\mu_O}} \mu_O Int^t, \quad (3.23)$$

$$\beta_{Fe}(\tau) = \frac{1}{\frac{(\%ok)(Fe_2O_3)}{m_{sk}} \frac{2\mu_{Fe}}{2\mu_{Fe} + 3\mu_O}} \mu_{Fe} Int^t, \quad (3.24)$$

$$\text{где} \quad Int_o^t = \frac{V_{Ar}}{V_\mu} \int_0^t \frac{\{CO\} + \{CO_2\}}{100 - \{CO\} - \{CO_2\}} dt, \quad (3.25)$$

t' — это такое время, когда $\alpha_o(t) = 1/3$ или

$$\frac{1}{m_{sk} \frac{(\%ok)(Fe_2O_3)}{10000} \frac{3\mu_o}{2\mu_{Fe} + 3\mu_o}} Int_o^t = 1/3. \quad (3.25)$$

Содержание оксидов железа в рудной части синтикома здесь рассчитывается по известной формуле $(Fe_2O_3) = (Fe_2O_3) + 1,11 \cdot (FeO)$.

Степень обезуглероживания, степень восстановления и степень металлизации связаны между собой следующими уравнениями:

$$\alpha_o(t) = \delta_o(t) \left(\frac{2\mu_{Fe} + 3\mu_o}{3\mu_c} \right) \left(\frac{[C]_{iss}}{(Fe_2O_3)_{iss}} \right) \left(\frac{100 - (\%ok)}{(\%ok)} \right), \quad (3.26)$$

$$\beta_{Fe}(t) = 3/2(\alpha_o(t) - 1/3). \quad (3.27)$$

Вычислив один из параметров δ_c ; α_o или β_{Fe} по уравнениям (3.26) и (3.27), легко рассчитать остальные. Отметим, что уравнение (3.26) наглядно показывает соотношение между окислительными и восстановительными процессами в синтикоме.

3.3. Результаты экспериментальных исследований процессов в синтикоме

На полученных кинетических кривых окисления углерода рис.3.3 – 3.8 можно выделить несколько характерных участков, соответствующих разным периодам плавления материала и окисления его примесей. Углерод синтикома начинает окисляться очень рано — уже с 750°C (рис. 3.8). До 1150°C взаимодействие углерода и кислорода идет в твердофазном режиме. При 1150 – 1200°C на кривой обезуглероживания появляется отчетливо выраженный перелом, указывающий на изменение условий окисления углерода. По этой температуре плавится чугун, снимаются диффузионные затруднения в доставке реагентов в зону реакции, и процесс переходит в режим жидкофазного окисления углерода чугуна кислородом твердых окатышей. Скорость окисления углерода при этом достигает колоссальных значений — 0,3 – 0,6 %/мин, превышающих даже скорость окисления углерода в кислородном конвертере [17].

Для выявления лимитирующих звеньев процесса рассмотрим механизм восстановления оксидов железа углеродом. Известно [7, 8, 10], что восстановление оксидов металлов твердым углеродом протекает преимущественно с участием газовой фазы, образующейся по реакции газификации углерода:



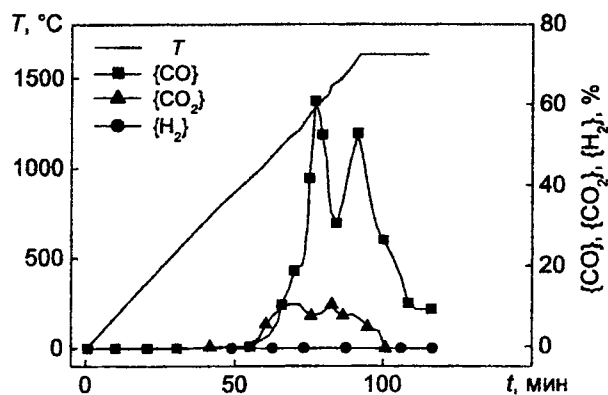


Рис. 3.3. Состав отходящих газов при нагреве и переплаве синтикома

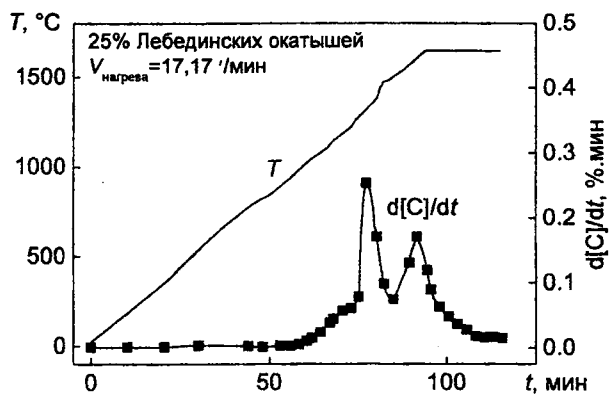


Рис. 3.4. Скорость окисления углерода при нагреве и переплаве синтикома.

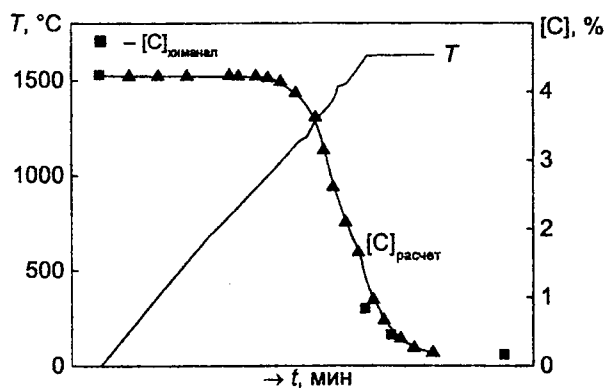


Рис. 3.5. Плавка Ж5 (25% леб. окат.)

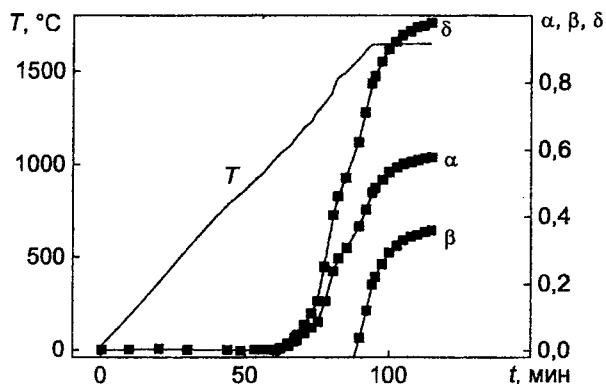


Рис. 3.6. Изменение параметров обезуглероживания синтикома

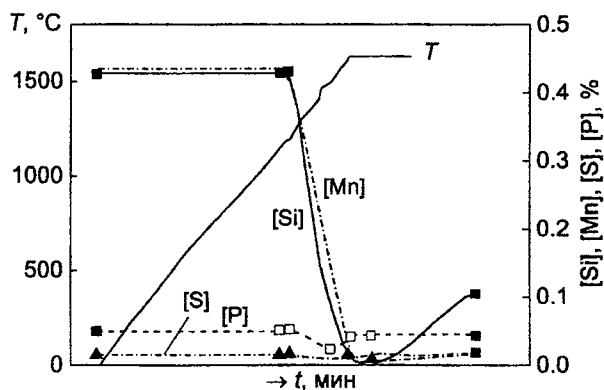


Рис. 3.7. Плавка Ж5 (25% леб. окат.)

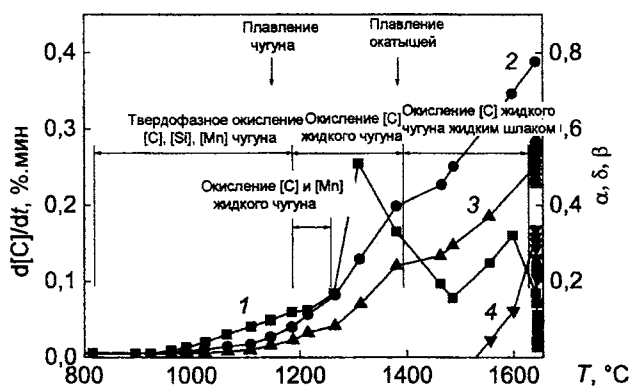


Рис. 3.8. Последовательность окисления примесей "железо-рудного" синтикома.



Согласно этой схеме, реакция (3.30) прямого восстановления оксида металла углеродом является суммарным результатом реакции косвенного восстановления (3.28) и реакции газификации углерода (3.29). Расходуемый по реакции (3.28) газ-восстановитель непрерывно восполняется по реакции газификации (3.29). Учитывая четкое пространственное разделение углерода (чугун) и оксидов железа (окатыши), такая схема представляется наиболее соответствующей действительности.

Расчетные составы газовых фаз, равновесные с углеродом или оксидами железа, сопоставлены на рис. 3.9 с экспериментально определенными составами газов, образовавшихся при переплаве синтикома. В области низких температур 700 – 800°C экспериментально наблюдаемый состав газовой фазы близок к равновесному для реакции газификации углерода, что свидетельствует о лимитировании процесса стадией косвенного восстановления. При повышении температуры и достижении интервала 850 – 1200°C состав газа близок к равновесному для реакции косвенного восстановления. Это означает, что реакция газификации не успевает регенерировать избытка оксида углерода по отношению к оксидам железа и, следовательно, эта реакция и является лимитирующим звеном суммарного процесса в этом температурном диапазоне.

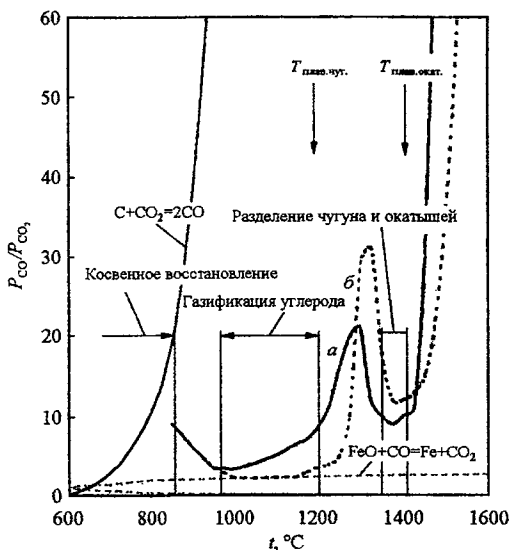


Рис. 3.9. Влияние температуры на состав газовой фазы, образующейся при нагреве и расплавлении синтикома.

Для расчета эффективной (кажущейся) энергии активации суммарного процесса окисления углерода (3.30), позволяющей дать дополнительное подтверждение правильности установления лимитирующей стадии процесса, воспользуемся расчетным аппаратом метода неизотермической кинетики [18 – 21]. В случае протекания твердофазных реакций в условиях непрерывного нагрева степень превращения оксидов железа синтикома а зависит от температуры по уравнению:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = A \cdot (1-\alpha)^n \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3.31)$$

где E — энергия активации процесса, n — порядок реакции; A — константа.

Результаты оценки кинетических параметров процесса дифференциально-разностным методом показаны на рис.3.10. Этим методом обработаны экспериментальные точки интервала 850 – 1200°C (зона твердофазных реакций). Несмотря на высокие статистические оценки достоверности линеаризации данных по дифференциально-разностному методу (F — критерий Фишера больше 4, а коэффициент корреляции r близок к единице), вычисленные энергии активации E колеблется в пределах 90 – 150 кДж/моль. Для реакции газификации углерода энергия активации составляет 170 – 210 кДж/моль, а для реакций косвенного восстановления 60 – 80 кДж/моль.

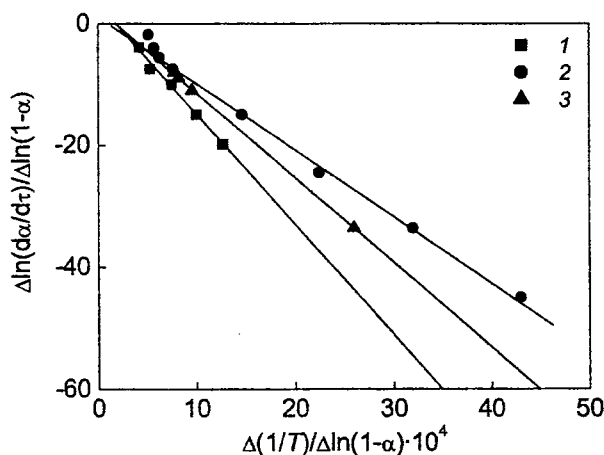


Рис. 3.10. Оценка энергии активации процесса восстановления оксидов железа синтикома.

Промежуточные значения энергии активации указывают на сложный механизм взаимодействия углерода и кислорода синтикома при 800 – 1200°C и его возможные изменения в зависимости от массы окатышей в синтикоме. Тем не менее, состав газовой фазы в этом температурном интервале 800 – 1200°C указывает на то, что за лимитирующую стадию здесь следует принять реакцию газификации углерода. О лимитирующей стадии газификации углерода говорит и тот факт, что при повышении температуры выше 1200°C плавится металлическая основа синтикома и реакция окисления углерода резко ускоряется (рис. 3.8). Плавление чугуна полностью снимает диффузионные трудности с доставкой углерода к окислителю. Жидкий чугун растворяет также и восстановленное железо с поверхности окатышей, облегчая доставку окислителя в зону реакции, но состав газовой фазы при этом изменяется в сторону резкого снижения содержания CO_2 , что говорит о преобладающей регенерации CO над ее расходом.

Плавление основы синтикома приводит к частичному разделению фаз и снижению скорости окисления за счет снижения суммарной поверхности реагирования. На кривой $P_{\text{CO}} / P_{\text{CO}_2} = f(T)$ (рис. 3.9) в этот момент появляется “провал”, вызванный окислением CO в слое выплывших окатышей, без дальнейшей регенерации CO_2 .

Усиление обезуглероживания расплава происходит только после плавления непрореагировавшей основы окатышей (зерен оксидов железа) при 1400°C и перехода оксидов железа в расплавленное состояние. Здесь идет “обычное” окисление углерода жидкого железа кислородом железистого шлака с лимитированием скорости диффузией в шлаковой фазе.

Окислительно-восстановительные процессы, происходящие при плавлении синтикома с наполнителем из бразильской и индийской гематитовой железной руды как по своей последовательности, так и по степени развития аналогичны процессам плавления синтикома с наполнителем из железорудных окатышей. Образца железной руды были любезно предоставлены компанией “Сидерсул” инж. Ж.М.Роша (Бразилия) и ГВЭО “Тяжпромэкспорт” инж. А.А.Стецуриным (РФ). В обоих случаях четко выражены стадии твердофазного взаимодействия составляющих синтикома (800 – 1180°C); жидкофазного окисления примесей чугуна кислородом кусковой железной руды (1200 – 1400°C); взаимодействия жидкого металла и жидкого шлака.

Кусковая железная руда в случае одинакового фракционного состава и степени чистоты по вредным примесям и пустой породе является полноценным заменителем окисленных окатышей в составе синтикома. Для повышения степени металлизации при сохранении приемлемой степени обезуглероживания необходимо иметь в составе синтикома не более 25 % железной руды. Для удаления фосфора и серы содержание в синтикоме руды следует, наоборот, увеличивать и применять скачивание окислительного шлака периода плавления с соответствующей потерей железа в виде недовосстановившихся оксидов. Выбор оптимального решения зависит от

чистоты по вредным примесям исходных компонентов синтикома, марки выплавленной стали, типа агрегата, и других производственных условий.

Таким образом, отличительная черта синтикома как нового шихтового материала — наличие первого и второго периодов окисления углерода, а именно, окисление углерода твердого и жидкого чугуна кислородом твердых окатышей. Пространственная структура синтикома при этом в основном сохраняется, обеспечивая большую удельную поверхность реагирования и, следовательно, большие скорости обезуглероживания при низких температурах.

Кремний и марганец чугуна выгорают при переплаве синтикома практически полностью, причем раньше, чем начинается интенсивное окисление углерода (см. рис. 3.7), оказывая при этом значительное влияние на кинетику окисления углерода в области твердофазных реакций.

Скорость обезуглероживания синтикома, состоящего из чугуна с $[\text{Si}] = 0,056 \%$, в низкотемпературной области существенно меньше по сравнению с образцами синтикома, содержащего чугун с $[\text{Si}] = 2,1 \%$. Устранение кремния из состава чугуна устаряет в значительной мере и стадию твердофазного окисления углерода твердого чугуна кислородом твердых окатышей, причем независимо ни от содержания окатышей в синтикоме, ни от скорости нагрева. Это объясняется, вероятно, уменьшением термодинамической активности углерода чугуна при уменьшении в нем концентрации кремния. Увеличение содержания кремния и марганца увеличивает также длительность окисления этих элементов после расплавления чугуна, что замедляет начало интенсивного обезуглероживания углерода синтикома.

Учитывая, что процесс окисления кремния — основной источник дополнительного тепла при переделе синтикома, вопрос об оптимальном содержании кремния в чугуне синтикома следует решать в зависимости от технологических задач использования синтикома в составе шихты сталеплавильной плавки.

Поведение фосфора и серы сложнее (рис. 3.7): в начале процесса, когда образуется большое количество железистого шлака фосфор и, в меньшей степени, сера переходят в шлак; в конце процесса, когда восстановлена большая часть оксидов железа, наблюдается устойчивая рефосфорация. Ресульфурация выражена слабо.

Из результатов статистической обработки экспериментального массива данных следует, что степень дефосфорации R_p увеличивается с ростом содержания окисленных окатышей в синтикоме (увеличение массы шлака, участвующей в процессе дефосфорации) и с уменьшением скорости нагрева этого шихтового материала. Высокая скорость нагрева вызывает и высокую мгновенную скорость окисления углерода, что увеличивает количество выброшенного из реакционной зоны шлака, не успевшего прореагировать с металлом.

Значимой разницы между влиянием вида окатышей (Лебединские или Михайловские окисленные окатыши) на удаление фосфора нет. Степень десульфурации в случае использования Лебединских окатышей заметно выше, чем Михайловских, вследствие образования менее кислых конечных шлаков при переработке синтикома в ее завершающей стадии, когда оставшийся шлак восстановлен и относительное количество оксидов кремния в шлаке в случае использования Михайловских окатышей больше. Это снижает основность шлака, его сульфидную емкость и соответственно степень десульфурации металла.

Использование офлюсованных окисленных окатышей с $\text{CaO/SiO}_2 = 5$ способствует переходу фосфора в шлак при наличии небольшой рефосфорации. Аналогичный эффект вызывает офлюсование окатышей плавиковым шпатом CaF_2 при сохранении полученных степеней дефосфорации и десульфурации до конца плавки, несмотря на незначительное содержание оксидов железа в конечном шлаке и низкий конечный углерод в железе.

Офлюсование железорудного наполнителя оказывает значительное влияние на кинетику окисления углерода. Ввод в состав железорудных окатышей того или иного вида флюса резко ускоряет или, наоборот, замедляет процесс окисления углерода синтикома. Данный фактор может позволить одновременно получать оптимальное сочетание степени металлизации окатышей синтикома и степени обезуглероживания чугуна со значительными степенями рафинирования от вредных примесей типа серы и фосфора.

3.4. Особенности процессов в синтикоме с углеродсодержащим наполнителем

Базовый вариант синтикомпозиционного шихтового материала металл-оксид представляет собой чугун с распределенными в нем путем литья окисленными железорудными окатышами. Его использование в шихте сталеплавильных агрегатов имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными видами металлошихты — металлоломом, металлизированными окатышами и чугуном.

Вместе с тем синтиком расходует внешнее тепло на восстановление входящих в его состав оксидов железа, что является нежелательным явлением при использовании синтикома в качестве шихтового материала, например, в современной дуговой плавке. Эндотермичность синтикома можно устранить за счет введения в его состав дешевых тепловыделяющих добавок, простейшими из которых являются углеродсодержащие материалы.

Для выбора оптимального типа углеродсодержащего наполнителя были изготовлены следующие типы окатышей: железорудные окатыши с ядром из кокса; рудококсовые окатыши; рудококсовые окатыши с ядром из кокса (см. рис.3.1).

Основными исходными материалами для изготовления наполнителей были железорудный концентрат Михайловского ГОКа ($\text{Fe}_{\text{общ}}$ — 62,7 %; Fe_2O_3 — 87,9 %; FeO — 1,6 %; SiO_2 — 7,66 %; Al_2O_3 — 0,21 %; MgO — 0,24 %; CaO — 2,4 %; S — 0,01 %; P — 0,22 %) и кокс ($\text{C}_{\text{тв}}$ = 85 %) в виде коксика 5–10 мм или коксовой пыли. В некоторых опытах кокс был заменен энергетическим некоксуемым углем. В часть окатышей добавляли до 10 % чугунных стружек для утяжеления наполнителя и улучшения смачивания поверхности таких жидким чугуном.

В качестве связки для углеродсодержащего наполнителя опробовали сульфидно-спиртовую барду, каменноугольный лак, различные марки цемента и гашеную известь.

Предварительно смешанную шихту окатывали в тарельчатом окомкователе до получения шариков диаметром 8–15 мм. Затем в случае использования в качестве связки сульфидно-спиртовой барды, каменноугольного лака и цемента сырые окатыши сушили на воздухе при 120°C, а при использовании гашеной извести упрочнение окатышей достигали выдержкой наполнителя в атмосфере воздуха с 30% углекислого газа в течение 60 минут при 120°C, имитируя обработку горячими дымовыми газами.

Прочность и термостойкость получаемых окатышей оказалась достаточной, чтобы окатыши не разрушались при заливке их жидким чугуном.

Наиболее близким по своим свойствам к “классическому” композиту оказался синтиком с наполнителем из окисленных окатышей Михайловского ГОКа и коксика (рис. 3.11). Практически одинаково развивается процесс

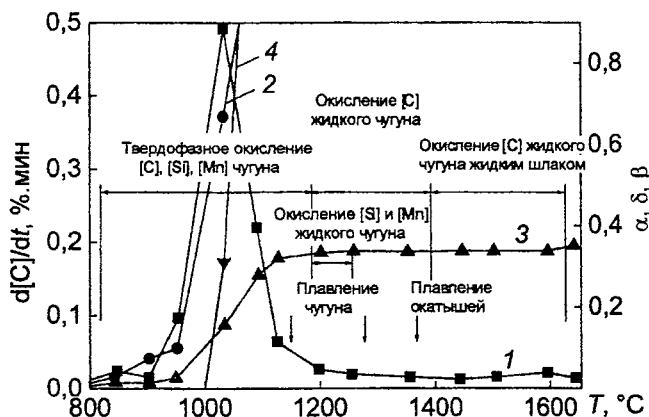


Рис. 3.11. Последовательность окисления примесей “рудококсового” синтика.

твердофазного окисления углерода в области $800 - 1180^{\circ}\text{C}$ и также резко происходит увеличение скорости окисления углерода при плавлении чугуна. В дальнейшем скорость окисления углерода поддерживается на высоком уровне за счет плавления самих окисленных окатышей ($> 1380^{\circ}\text{C}$). Однако здесь происходит восстановление практически всех оксидов железа, так как в условиях избытка углерода непосредственно в расплаве железистого шлака плавают куски кокса. Скорость окисления углерода достигает огромной величины $30,8\text{ \%}/\text{мин}$. При дальнейшем нагреве скорость окисления углерода непрерывно падает и к моменту достижения 1600°C повторного увеличения скорости окисления углерода не происходит по причине полного расходования оксидов железа. В конце плавки на поверхности чугуна плавают неизрасходованные куски кокса.

Принципиально иную картину окисления углерода наблюдали в опытах с синтикомом с рудококсовым наполнителем (см. рис.3.11). В этом случае за счет развития твердофазных реакций восстановления оксидов железа твердым углеродом к моменту начала плавления металлической основы синтика ($\sim 1130^{\circ}\text{C}$) все оксиды железа уже оказываются восстановленными. Максимум скорости окисления углерода в $0,5\text{ \%}/\text{мин}$. Наблюдали в интервале температур $1000 - 1050^{\circ}\text{C}$. После расплавления чугуна на его поверхности видны только частички порошка избыточного кокса и некоторое количество основного шлака, образовавшегося из карбонатной связи рудококсовых окатышей. Кипение шлака, естественно, отсутствовало.

Синтиком с наполнителем из железорудных окатышей с ядром из кокса по характеру окисления углерода занимает промежуточное положение между синтиками с наполнителями из окисленных окатышей и коксика и с рудококсовым наполнителем. В этом случае также получают развитие процессы твердофазного восстановления, но оксиды железа восстановиться полностью не успевают (при скорости нагрева $23,5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) и второй максимум скорости окисления углерода наблюдается уже в результате плавления чугуна синтика. К моменту достижения характеристической температуры 1380°C процесс окисления углерода практически завершается по причине израсходования оксидов железа. На поверхности жидкого металла также присутствует не кипящий основной шлак с плавающими в нем кусками избыточного кокса.

С теперь обезуглероживания синтика δ_{C} степень восстановления α_0 и степень металлизации β_{Fe} оказываются "перевернутыми" относительно этих величин для "классического" синтика. Степень восстановления α_0 и степень металлизации β_{Fe} достигают единицы (все оксиды железа восстановлены до чистого металла), а суммарная степень обезуглероживания синтика δ_{C} колеблется в пределах $0,15 - 0,4$. Соотношение конечных значений этих параметров показывает, что синтиком с углеродистым наполнителем обеспечивает эффективное восстановление оксидов железа из наполнителя, сохраняя большую часть растворенного углерода чугуна синтика неиспользованной.

Концентрация углекислого газа в отходящих газах плавки для всех изученных образцов синтикома более чем вдвое меньше, чем для «обычного» синтикома. Причина этого — наличие чистого углерода в реакционном объеме в течение всей плавки и соответствующее развитие реакции газификации.

Все изученные новые виды синтикома обеспечивают значительно более раннее и полное восстановление оксидов железа по сравнению с «классическим» синтикомом. Особенно быстро этот процесс происходит в случае синтикома с рудококсовым наполнителем, где процессы восстановления завершаются еще до плавления чугуновой основы синтикома. Выбор того или иного вида синтикома определяется конкретными требованиями сталеплавильной технологии. Располагая новыми видами синтикома, можно весьма гибко реагировать на самые разнообразные требования современной плавки стали.

Выводы

1. Впервые проведено систематическое изучение процесса нагрева и плавления образцов синтикома. В общем случае имеют место следующие отчетливо выраженные стадии: твердофазное взаимодействие составляющих синтикома ($700 - 1150^{\circ}\text{C}$) с лимитированием процесса реакцией газификации; жидкофазное окисление примесей чугуна твердыми окатышами ($1150 - 1400^{\circ}\text{C}$); взаимодействие жидкого металла с жидким железистым шлаком ($> 1400^{\circ}\text{C}$).

2. Наибольшая скорость окисления углерода синтикома ($0,3 - 0,6\% / \text{мин}$) наблюдаются после плавления чугуна в интервале температур $1150 - 1400^{\circ}\text{C}$. При дальнейшем росте температуры в результате разделения по плотности составляющих синтикома скорость окисления углерода падает. Усиление обезуглероживания происходит только после плавления окисленных окатышей с переходом в режим «обычного» взаимодействия жидкого металла со шлаком.

3. Доказана перспективность использования офлюсованных окатышей взамен обычных окисленных окатышей. Особенно эффективным может оказаться комплексное офлюсование окатышей оксидами и фторидами кальция. Это может позволить одновременно получить приемлемое сочетание степени металлизации окатышей синтикома и степени обезуглероживания чугуна со значительными конечными степенями дефосфорации и десульфурации.

4. Кусковая железная руда в случае одинакового фракционного состава и степени чистоты по вредным примесям и пустой породе является полноценным заменителем окисленных окатышей в составе синтикома. Выбор оптимального решения зависит от чистоты по вредным примесям исходных компонентов синтикома, марки выплавляемой стали и других производственных условий.

5. Разработаны основы технологии изготовления и изучены свойства новых типов синтетического композиционного шихтового материала “синтиком” с углеродсодержащими наполнителями. Изучены новые виды синтикома: синтиком с наполнителем из окисленных окатышей Михайловского ГОКа и коксика, с наполнителем из железорудных окатышей с ядром из кокса и рудококсовым наполнителем.

6. Все изученные новые виды синтикома обеспечивают значительно более раннее и полное восстановление оксидов железа по сравнению с “классическим” синтикомом. Особенно быстро этот процесс происходит в случае синтикома с рудококсовым наполнителем, где процессы восстановления завершаются еще до плавления чугуновой основы синтикома.

7. Варьирование вида и химического состава компонентов синтикома позволяет значительно менять кинетику обезуглероживания этого материала и добиваться наилучшего соответствия шихты конкретным технологическим задачам выплавки стали. Увеличивая скорость окисления углерода, можно получить различную степень обезуглероживания вплоть до практически полного удаления углерода из шихты к моменту окончания периода плавления. Торможение процесса обезуглероживания синтикома дает возможность длительное время поддерживать шлаковый расплав в пенистом состоянии для уменьшения теплотеря во время плавки.

8. Выбор того или иного вида синтикома определяется конкретными требованиями сталеплавильной технологии, но совершенно очевидно, что располагая такими новыми видами синтикома можно весьма гибко реагировать на самые разнообразные требования современной плавки стали.

Литература

1. Филиппов С.И. Теория процесса обезуглероживания стали. М.: Металлургиздат, 1956. 279 с.
2. Филиппов С.И., Бородин А.И., Крашенинников М.Г. Кинетические параметры поверхностного и объемного обезуглероживания. Изв. Вузов. Черная металлургия. 1978, № 5, с. 17 – 21.
3. Якубов Ш.А. Плавление металлизированных окатышей и поведение примесей при выплавке стали. Дисс. канд. техн. наук. М., 1987, с. 197.
4. Братчиков С.Г., Адмур А.М. Кинетика взаимодействия углерода с оксидами железа металлизированных материалов в твердой фазе. Изв. Вузов. Черная металлургия, 1984, № 5, с. 148 – 149.
5. Родмушкин В.А., Тютюков С.А., Арзамасцев Е.И. и др. Поведение углерода металлизированного продукта при нагреве и плавлении. Там же. 1982, № 8, с. 42 – 45.
6. Михайлов А.С., Армур А.М., Братчиков С.Г. и др. Исследование процессов нагрева и плавления металлизированных окатышей в системе металл-шлак. Там же. 1984, № 12, с. 44 – 47.
7. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Часть I. Свердловск-Москва. Гос. науч.-техн. изд. литературы по черной и цветной металлургии. 1950, 510 с.
8. Елютин В.П., Павлов Ю.А., Полякова В.П. и др. Взаимодействие окислов металлов с углеродом. М.: Металлургия, 1987, 231 с.
9. Рыжонков Д.И., Падерин С.Н., Серов Г.В. и др. Расчеты металлургических процессов на ЭВМ. М.: Металлургия, 1987, 231 с.
10. Рыжонков Д.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В. и др. Теория металлургических процессов. М.: Металлургия, 1989, 392 с.
11. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов. М.: Металлургия, 1988, 288 с.
12. Арсентьев П.П., Падерин С.Н., Серов Г.В. и др. Экспериментальные работы по теории металлургических процессов. М.: Металлургия, 1989, 288 с.
13. Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г. и др. Физико-химические методы исследования металлургических процессов. М.: Металлургия, 1988, 511 с.
14. Линчевский Б.В. Техника металлургического эксперимента. М.: Металлургия, 1979. 256 с.
15. Топор А.Д., Огородова Л.П., Мельчакова Л.В. Термический анализ минералов и неорганических соединений. М.: Изд-во МГУ, 1987, 190 с.
16. Сулименко Е.И. Производство окатышей. М.: Металлургия, 1988. 128 с.
17. Бигеев А.М. Металлургия стали. М.: Металлургия, 1977. 440 с.
18. Падерин С.Н., Серов Г.В., Пак В.М. Физикохимия металлов и сплавов. М.: МИСиС, 1987. 119 с.
19. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции. М.: Химия, 1978, 310 с.
20. Браун М. и др. Реакции твердых тел. М.: Мир, 1981, 550 с.
21. Уэндланд У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978, 526 с.

Выход жидкого железа из синтикома

4.1. Исходные данные

Синтиком является композиционной шихтой и обладает ярко выраженной двойственной металлургической природой, соединяя в себе одновременно железоуглеродистый сплав с повышенным содержанием углерода, который необходимо окислить, и значительное количество твердого окислителя, основным компонентом которого является оксиды железа, которые восстанавливаются при расплавлении синтикома [1 – 3]. Совмещение процессов окисления углерода и восстановления железа оказывают существенное влияние на выход железа из синтикома.

В качестве объекта анализа использовали синтиком различного марочного сортамента, основные характеристики которого приведены в табл.4.1. Выход железа для различных марок синтикома оценивали согласно общепринятой методике [4, 5] по формуле:

$$B_{\text{Fe}} = \frac{m_{\text{чуг}} - \sum m_{\text{ок.эл}} + m_{\text{восст. Fe}}}{m_{\text{чуг}} + m_{\text{Feок}}} \cdot 100, \quad (4.1)$$

где B_{Fe} — выход железа из синтикома, %; $m_{\text{чуг}}$ — масса чугуна, кг; $\sum m_{\text{ок.эл}}$ — суммарная масса окисленных элементов [C + Si + Mn + Fe] в чугуне, кг; $m_{\text{восст. Fe}}$ — масса железа восстановленного из оксидов синтикома, кг; $m_{\text{Feок}}$ — масса железа в твердом окислителе синтикома, кг.

Результаты расчетов представлены в табл.4.2.

Общая степень окисления железа (угар) при окислительном рафинировании чугуна газообразным кислородом по аналогии с конвертертной плавкой обычно составляет 5 – 5,7 % [6]. Окисление примесей чугуна, входящего в состав синтикома, частично или полностью осуществляется собственным кислородом, поступающим из оксидов железа. Это уменьшает или исключает полностью угар железа. Поэтому степень окисления железа чугуна при окислении его примесей кислородом, поступающим из оксидов железа, меньше, чем в случае использования газообразного окислителя и принята в данном случае равной 3,8 %. Для состава чугуна, приведенного в табл.4.1, выход железа из 1 т чугуна с учетом массы примесей C + Mn + Si,

Таблица 4.1

Исходный химический состав синтикома и его характеристики

Марка синтикома	Содержание элементов и примесей, масс. %								Исходная степень металлизации, $\frac{Fe_{мет}}{Fe_{мет}+Fe_{ок}} \cdot 100$,	Степень окисления углерода во время-расплавления синтикома, %	Количество дополнительно введенного углерода	
	C	O ₂	Si	Mn	Пустая порода	Fe _{мет}	Fe _{ок}	Fe _{общ}			%	кг/т
СК5	3,99	1,40	0,57	0,38	0,333	90,066	3,267	93,327	96,53	13,4	—	—
СК10	3,78	2,80	0,54	0,36	0,667	85,310	6,533	89,843	92,89	24,17	—	—
СК15	3,57	4,20	0,51	0,34	1,000	80,580	9,800	90,380	89,16	74,15	—	—
СК20	3,36	5,60	0,48	0,32	1,333	75,840	13,067	88,907	85,30	100	0,85	8,5
СК25	3,15	7,00	0,45	0,30	1,667	71,100	16,333	81,433	81,32	100	2,10	21,0
СК30	2,94	8,40	0,42	0,28	2,000	66,300	19,600	85,900	77,18	100	3,36	33,6

Таблица 4.2

Выход железа из 1 т синтикома в зависимости от его состава

	Марка композита					
	СК5	СК10	СК15	СК20	СК25	СК30
Содержание компонентов в 1 т синтикома, кг						
чугун						
Всего	950	900	850	800	750	700
Fe	900,6	853,2	805,8	758,4	711,0	663,0
C	39,9	37,8	35,7	33,6	31,5	29,4
Si	5,7	5,4	5,1	4,8	4,5	4,2
Mn	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8
наполнитель						
Всего	50	100	150	200	250	300
Fe ₂ O ₃	46,67	93,33	140,0	186,67	233,33	280,0
Пустая порода	3,33	6,67	10,0	13,33	16,67	20,0
Количество окисленных элементов чугуна, кг						
C	4,81	15,64	26,47	33,6	31,5	29,4
Si	5,7	5,4	5,1	4,8	4,5	4,2
Mn	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8
Fe	31,8	20,1	8,4	—	—	—
Количество железа, поступившее в расплав из оксидов наполнителя, кг						
восстановленное собственными восстановителями	32,67	65,33	98,0	119,21	111,75	104,3
восстановленное дополнительными восстановителями (углеродом)	—	—	—	11,46	51,58	91,70
Всего	32,67	65,33	98,0	130,67	163,33	196,0
Выход железа из синтикома						
При восстановлении оксидов железа собственными восстановителями, кг/%	901,5	898,5	895,5	877,6	822,8	767,9
При полном восстановлении оксидов железа, кг/%	91,7	93,1	94,5	94,3	90,1	85,7
При полном восстановлении оксидов железа, кг/%	901,5	898,5	895,5	889,1	874,3	859,6
	91,7	93,1	94,5	95,5	95,7	95,9

равного 5, 2% и утара железа 3,8 %, равен 910 кг или 91 %. Фактический выход железа в конвертерах на пихте из 80 % жидкого чугуна и 20 % металлолома не превышает 880 – 890 кг/т или 88 – 89 % [6, 7].

4.2. Анализ выхода железа из синтикома различного состава

На рис. 4.1 представлена построенная на основе данных табл.4.2 зависимость относительного выхода жидкого железа из 1 т синтикома от содержания в нем оксидов железа, определяющих марку этого материала. Рис.4.2 показывает, что при полном восстановлении оксидов железа относительный выход железа из композита характеризуется значениями 91,7 – 95,9 %, повышаясь с увеличением доли оксидов железа от 5 до 30 %. При этом показатель относительного выхода железа из синтикома для всех марок превышает извлечение железа из чугуна, принятого для данных условий равным 91 %.

Синтиком марок СК5, СК10 и СК15 в данном случае имеет соотношение $[C]/(O)$ выше стехиометрической величины 0,75, отвечающей реакции между углеродом и кислородом при окислении углерода до CO. Эти марки в исходном состоянии содержат избыточное количество собственного углерода, что обеспечивает полное восстановление железа из его оксидов. При этом часть исходного углерода остается неизрасходованной и поэтому образующий из синтикома расплав содержит определенное количество углерода. Удаление этого избыточного углерода производится после расплавления шихты газообразным кислородом, вдуваемым в печь, и частично за счет оксидов шлака. Соотношение $[C]/(O)$ в синтикоме может регулироваться в широких пределах путем изменения массовой доли оксидов железа в композите. В свою очередь это позволяет управлять концентрацией углерода в металле, образующемся в результате расплавления композита.

В отличие от марок СК5, СК10 и СК15 синтиком марок СК20, СК25 и СК30 содержит в металлической основе недостаточное количество собственного углерода, требуемое для полного восстановления оксидов железа. Для этих марок исходное соотношение $[C]/(O)$ в синтикоме составляет соответственно 0,6; 0,45 и 0,35, что меньше стехиометрического значения 0,75. Вследствие этого степень восстановления оксидов железа в этих марках будет ниже 100 % и составит 91,23 % для СК20 и 53,1 % для СК30. Поэтому в этих марках к углероду чугуна во избежание недо-

восстановления оксидов может быть добавлен дополнительный углерод в количестве, обеспечивающем повышение отношения $\frac{[C] + C_{\text{св}}}{(O)}$ до значений, равных либо больших стехиометрической величины 0,75.

Этот углерод может вводиться непосредственно в состав синтикома в виде отдельной самостоятельной фазы, например, брикетов либо в смеси с оксидами железа в форме рудугольных окатышей. Другим возможным способом является ввод углерода в печь совместно с синтикомом при его загрузке и по ходу плавления. Возможна также комбинация указанных способов.

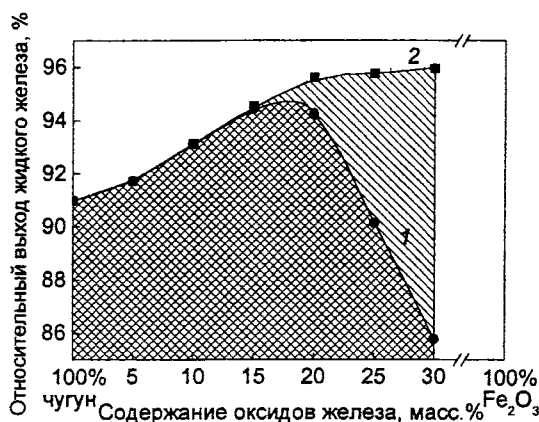


Рис. 4.1. Выход жидкого железа из синтикома в зависимости от содержания в нем оксидов железа: 1 — выход железа при восстановлении оксидов железа собственными восстановителями (полное восстановление при содержании оксидов менее 15%, частичное — при содержании оксидов более 15%); 2 — выход железа при восстановлении оксидов железа собственными восстановителями и дополнительно внесенным углеродом (полное восстановление в диапазоне содержаний оксидов от 5 до 30%).

Данные табл.4.2 и рис.4.1 показывают, что отклонение соотношения между углеродом и кислородом в синтикоме от стехиометрической величины 0,75 в меньшую сторону сопровождается неполным восстановлением оксидов железа и их последующим переходом в шлак. Вследствие потери части оксидов относительный выход жидкого железа из синтикома начинает падать. Это снижение проявляется тем сильнее, чем выше содержание оксидов железа в композите и меньше соотношение углерод-кислород. Подчеркнем, что это явление наблюдается лишь в тех случаях, когда в исходный материал не введены дополнительные добавки углерода. Эффект снижения выхода железа начинает проявляться при содержании оксидов железа в синтикоме более 15 %.

Кривая зависимости относительного выхода железа от содержания оксидов железа и марки синтикома в точке, отвечающей массовой доле оксидов 15 % и марке СК15, раздваивается на две ветви. Верхняя ветвь

соответствует случаю, когда соотношение $\frac{[C] + C_{св}}{(O)}$ равно 0,75 либо выше

этого значения. При этом обеспечивается полное восстановление оксидов железа во всем диапазоне содержаний оксидов железа от 5 до 30 %.

Нижняя ветвь этой кривой отвечает случаю, когда количество собственного углерода в синтикоме существенно ниже требуемого для полного восстановления оксидов железа, а добавки дополнительного углерода в синтиком или во время его плавления в печи отсутствуют. При этом соотношение $\frac{[C] + C_{св}}{(O)}$ получается ниже 0,75. По этой причине одновременно

с уменьшением степени восстановления падает относительный выход железа с 94,3 % для СК20 до 85,7 % для СК30.

Из изложенного следует, что для достижения повышенного выхода железа из синтикома необходимо обеспечить полное восстановление оксидов железа. Это условие при использовании в качестве восстановителя только углерода (без учета кремния и марганца и др. элементов) и окислении его до

СО выражается простым соотношением $\frac{[C] + C_{св}}{(O)} = 0,75$.

Синтиком марок СК5, СК10 и СК15 отличается относительно малое содержание оксидов железа и соответственно повышенная доля чугуна и углерода, для которых $[C]/(O) \geq 0,75$. Для полного восстановления оксидов железа в этих марках оказывается достаточно собственных восстановителей, в то время как материалы СК20, СК25 и СК30 не содержат требуемого количества углерода. С этих позиций состав синтикома со стехиометрическим отношением углерода и кислорода является наиболее предпочтительным, гарантируя при этом полное восстановление железа.

Однако задача максимального извлечения железа из синтикома не всегда является единственной. В ряде случаев, например, при наличии проблемы со шлакообразованием целесообразно сохранить некоторое количество оксидов железа в невосстановленном состоянии. Это позволяет совместить расплавление синтикома и другой металлошихты с поступлением оксидов в шлак и обеспечивает раннее и ускоренное шлакообразование, синхронное со скоростью расплавления шихты. Для этих целей рекомендуются марки

синтикома СК20, СК25 и СК30 с соотношением $\frac{[C] + C_{св}}{(O)} < 0,75$.

Представляет интерес сравнение относительного выхода железа из синтикома и передельного чугуна одинакового с металлической основой синтикома состава.

Согласно рис.4.2 этот показатель для синтикома, равный 91,7 – 95,9 %, существенно превышает относительный выход железа из чугуна, составляющий в данном случае 91 %, во всем диапазоне содержания оксидов железа в композите или, что одно и то же, для всех марок синтикома от СК5 до СК30. Фактическая разница этих показателей больше, так как относительный выход железа по данным практики современного кислородно-конвертерного процесса обычно ниже 91 %. Кроме того, этот показатель относится к конвертерной плавке с традиционной долей жидкого чугуна 80 %. При

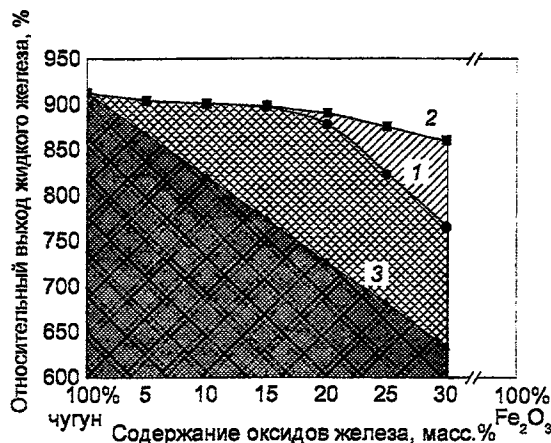


Рис. 4.2. Абсолютный выход жидкого железа из 1 т синтикома в зависимости от содержания в нем оксидов железа: 1 — абсолютный выход железа при восстановлении оксидов железа собственными восстановителями (полное восстановление при содержании оксидов железа менее 15%, частичное — при содержании более 15%); 2 — абсолютный выход железа при восстановлении оксидов железа собственными восстановителями и дополнительно внесенным углеродом (полное восстановление в диапазоне содержаний оксидов железа от 5 до 30%); 3 — абсолютный выход железа из чугуна — основы композита.

пересчете на 100 % жидкого чугуна этот показатель еще более снизится, поскольку содержание примесей и их угар, а также окисление железа при рафинировании чугуна выше, чем из скрапа. Таким образом, сравнение относительного выхода жидкого железа из синтикома и чугуна свидетельствует о преимуществе этого композита перед чугуном по данному показателю.

Наряду с относительным выходом железа представляет интерес показатель абсолютного извлечения железа из синтикома. Зависимость абсолютного выхода железа из синтикома от содержания в нем оксидов железа или марки синтикома, полученная на основе данных табл. 4.2, приведена на рис. 4.2. Из рис. 4.2 вытекает, что по мере увеличения доли оксидов в случаях полного восстановления абсолютный выход железа из синтикома снижается с 901,5 кг для СК5 и до 859,6 кг для СК30. При этом в области содержаний оксидов, равных 5 – 15 %, это снижение невелико и составляет всего $901,5 - 895,5 = 6,0$ кг/т синтикома. При превышении доли оксидов свыше 15 % абсолютный выход железа снижается более быстрыми темпами — с 895,5 до 859,6 кг или на 35,9 кг. Если сравнить между собой

синтиком и чугуном при одинаковой их массе, то абсолютный выход железа из 1 т синтикама несколько меньше, чем из 1 т передельного чугуна, для которого эта цифра равна 910 кг/т, на величину 8,5 – 50,4 кг/т в зависимости от марки композита.

Причиной этого является меньшая относительная доля чугуна и более высокая доля оксидов железа в синтикоме, содержащих значительно меньше железа по сравнению с чугуном 60 – 70 вместо 95 %. Поэтому общее содержание железа в исходном составе композита всегда меньше, чем у чугуна, причем эта разница усиливается по мере роста содержания оксидов железа в синтикоме. Кроме того, при снижении доли чугуна уменьшается его абсолютное содержание в материале, соответственно при этом падает приход железа, поступающего из его оксидов в результате восстановления. Вместе взятые, эти факторы уменьшают общий выход железа из синтикама в абсолютном выражении по сравнению с чугуном.

Зависимость абсолютного выхода железа из синтикама от содержания оксидов на рис. 4.2 при доле оксидов железа выше 15 % распадается на две ветви аналогично рис. 4.1.

Верхняя ветвь кривой на рис. 4.2 относится к случаю полного восстановления оксидов железа для всех марок синтикама. Отличие заключается лишь в том, что в марках СК5, СК10, СК15 железо восстанавливается собственными восстановителями, присутствующими в чугуне при соотношении $[C]/(O) > 0,75$. В марках СК20, СК25 и СК30 восстановление оксидов осуществляется как собственными восстановителями, так и дополнительно внесенным углеродом. Количество дополнительно введенного

углерода обеспечивает возрастание отношения $\frac{[C] + C_{св}}{(O)}$ до уровня 0,75,

отвечающего стехиометрии реакции между углеродом и кислородом, и полное восстановление железа.

Если не ввести в композит дополнительный углерод, то при содержании оксидов железа выше 15 %, что соответствует маркам СК20 и СК30, количество имеющегося в металлической основе синтикама собственного углерода не хватит для полного восстановления оксидов железа. Невосстановившаяся часть оксидов при этом переходит в шлак, уменьшая тем самым абсолютный выход железа. Этому случаю отвечает на рис. 4.2 нижняя ветвь кривой зависимости абсолютного выхода железа от состава композита, аналогичная такой же ветви на рис. 4.1. Поэтому во избежание снижения выхода железа отношение имеющегося в синтикоме и дополнительно внесенного в него углерода к кислороду необходимо поддерживать на

уровне $\frac{[C] + C_{св}}{(O)} \geq 0,75$.

Меньший выход железа из композита по сравнению с чугуном в абсолютных цифрах дает повод говорить о преимуществе чугуна или

Таблица 4.3

Выход синтикома из 1 т чугуна в зависимости от его марочного состава

	Марки синтикома					
	СК5	СК10	СК15	СК20	СК5	СК30
Выход синтикома на 1 т чугуна, т/т	1,053	1,111	1,176	1,256	1,333	1,429
Приход железа на 1 т чугуна за счет восстановления его из оксидов, кг/т	34,63	72,52	114,98	163,33	217,55	280,27

полупродукта перед синтикомом в отношении величины абсолютного выхода железа. Однако при этом не учитывается существенное увеличение выхода синтикома на 1 т чугуна, наблюдаемое при преобразовании чугуна в композиционный материал. Повышение выхода композита и приход железа связаны с вводом в исходный чугун или его полупродукт дополнительного количества твердого окислителя, состоящего преимущественно из оксидов железа. В табл. 4.3 приведены данные, иллюстрирующие это положение.

Из табл. 4.3 следует, что при переводе чугуна или его полупродукта в синтиком выход шихты на 1 т чугуна существенно возрастает и составляет 1,053 – 1,429 т/т чугуна. Оксиды железа, содержащиеся в композите, дают дополнительный приход железа, равный 34,63 – 280,27 кг/т чугуна. Эти значения перекрывают снижение абсолютного выхода железа, отнесенные к 1 т композита.

Поясним это на следующем примере. Пусть на электроплавку расходуется 17 т чугуна. При замене его на синтиком марки СК15 в печь будет введено 20 т композита. Увеличение физической массы шихты составляет 3 т. Этот прирост массы основан на вводе в чугун 3 т твердого окислителя. При доле пустой породы 6,67 % в окислителе масса оксидов железа будет равна 93,3 %, что составит 2,8 т. Это количество оксидов внесет 1,96 т железа и 0,84 т кислорода. Исходя из этих цифр, можно либо сократить расход чугуна на плавку на 1,96 т с 17 до 15,04 т, либо уменьшить на эту величину расход другой металлошихты, либо увеличить массу загрузки.

Далее сравним синтиком и чугун, исходя из принципа равенства массы исходного чугуна и чугуна, вошедшего в состав композита и трансформированного в синтиком. Масса железа, вносимого чугуном и композитом марки СК15, составляет соответственно 16,166 т (при содержании железа в чугуне 94,8 %) и 18,966 т, что дает разницу 2,8 т в пользу композита. В расчете на 1 т чугуна перевод чугуна в синтиком обеспечивает повышение выхода железа на $2,800/17 = 164,70$ кг/т чугуна или $2800/20 = 140,00$ кг/т композита. Следовательно, при трансформации чугуна в синтиком увеличивается первоначальная масса железа, содержащаяся в чугуне, на 164,7 кг, если ее относить к 1 т чугуна, или на 140,0 кг, если ее отнести к 1 т композита.

Сделаем перерасчет приведенных выше величин с учетом угара железа при окислительном рафинировании чугуна и чугуна, входящего в состав синтикома марки СК15. Согласно рис. 4.2 абсолютный выход железа из 1 т композита марки СК15 равен 895 кг/т, из чугуна — 910 кг/т. Из 20 т исходного композита получится $895 \cdot 20 = 17,900$ т, а из 17 т чугуна $910 \cdot 17 = 15,470$ т железа. Дополнительный приход железа в результате превращения чугуна в синтиком марки СК15 будет равен $17,900 - 15,470 = 2,43$ т.

Следовательно, при условии соблюдения принципа равенства массы исходного чугуна и массы чугуна, превращенного в синтиком, дополнительный приход железа из этого материала больше, чем из чугуна, на 2430 кг. В расчете на 1 т композита это дает 121,5 кг железа, в расчете на 1 т чугуна — 142,94 кг.

Этот расчет наглядно свидетельствует о том, что при сопоставлении между собой свойств композиционных материалов типа синтиком, состоящих из нескольких компонентов, и обычной однокомпонентной металлопихты (чугуна, полупродукта) необходимо исходить из принципа равенства массы исходного металла, выполняющего роль металлической основы обоих материалов, и учитывать увеличение выхода композиционной пихты по сравнению с исходным чугуном или полупродуктом. Обычное сравнение 1 т композита типа синтиком и 1 т чугуна или полупродукта, которое имеет место, является необходимым, но недостаточным, поскольку не учитывает увеличения выхода пихты и того, что это абсолютно разные материалы с резко отличающимися физико-химическими характеристиками.

Наряду с дополнительным выходом железа перевод чугуна в синтиком дает значительное количество кислорода, источником которого являются оксиды железа (табл. 4.1 и 4.2). Наличие в составе композита кислорода, который частично занимает место металлической основы, уменьшая ее долю в исходном композиционном материале, нельзя рассматривать как недостаток этого материала. Это объясняется тем, что кислород в той или иной форме обязательно нужен для окисления примесей чугуна и перевода последнего в сталь. Кроме того, кислород, присутствующий в синтикоме в форме оксидов железа при содержании его в определенных пределах обладает рядом преимуществ по сравнению с окислителем, подаваемым на ванну извне.

Основными из них являются отсутствие угара железа, минимальный близкий к стехиометрии расход его на окисление примесей, чрезвычайно высокие скорости взаимодействия углерода и кислорода, отвечающие уровню кислородно-конвертерного процесса, совмещение расплавления материала с процессом окисления углерода — восстановления железа, шлакообразования, нагрева ванны, перемешивания монооксидом углерода.

Окисление части или всего углерода чугуна и других примесей в синтикоме в отличие от чугуна происходит за счет собственного внутреннего кислорода, поставляемого оксидами железа, что уменьшает или даже исключает влияние скорости подвода окислителя на кинетику окисления углерода. Вследствие этого скорость окисления углерода в синтикоме достигает весьма высоких

значений, равных или превосходящих скорость этой реакции в конвертерной плавке (0,2 – 0,4 % С/мин). Благодаря этому ввод в чугуны оксидов железа ускоряет превращение чугуна в низкоуглеродистый расплав, уменьшая влияние реакции окисления углерода – восстановления железа на длительность плавки [8 – 10]. При этом окисление углерода не сопровождается дополнительным окислением железа, испарением его, выносом с газами, образованием корочек в шлаке, выбросами, суммарная величина которых может достигать 5 – 5,7 % [6]. Это способствует более полному извлечению железа.

Таким образом, введение в состав чугуна или его полупродукта оксидов железа и преобразование чугуна в синтеник, сопровождающееся замещением части чугуна оксидами железа, создает ряд преимуществ. Прежде всего, увеличивается общий выход металлошихты в расчете на 1 т чугуна или полупродукта на величину, равную количеству дополнительно введенного материала. Помимо этого, замещение части чугуна оксидами железа позволяет производить окисление углерода и других примесей чугуна и превращение последнего в сталь за счет “внутреннего” кислорода без дополнительного окисления железа. Одновременно это сопровождается восстановлением железа из оксидов железорудного наполнителя.

Изложенное выше относится к выходу железа непосредственно из синтеника. Однако синтеник оказывает определенное влияние и на выход железа из остальной металлошихты, вместе с которой он применяется (лом, чугун, железо прямого восстановления).

В дуговых электропечах окисление углерода кислородом оксидов железа и одновременное восстановление последних начинается в отличие от лома и чугуна с момента плавления первых порций синтеника, когда большая часть электропечи заполнена холодной твердой металлошихтой. Обезуглероживание при этом происходит при пониженных температурах, отвечающих температуре плавления металлической основы синтеника (1150 – 1250°C), при отсутствии шлака и жидкой металлической ванны. Образующийся при этом монооксид углерода СО, частично дожигаясь до оксида углерода СО₂, уменьшает окислительный потенциал печи, снижая тем самым степень окисления поверхности скрапа и содержание оксидов железа в шлаке и его массу. Одновременно дожигание СО до СО₂ и появление при этом дополнительного количества энергии увеличивает скорость нагрева поверхности твердой шихты, ускоряя переход поверхности скрапа через температурный интервал 700 – 800°C, характеризующийся наиболее интенсивным окислением железа твердой шихты. Это уменьшает поступление кислорода с воздухом в печь, дополнительно сокращает окислительный потенциал газов и уменьшает степень окисления железа.

Вместе взятые, эти факторы снижают угар железа шихты и, как следствие, увеличивают выход железа.

Интенсивное кипение металла в локальных зонах печи и жидкой ванне под электродами, а также дополнительное ускорение нагрева за счет тепла

дожигания СО до CO_2 уменьшает степень перегрева металла и снижает испарение железа. Это также благоприятно влияет на сокращение потерь железа. В результате воздействия этих факторов синтиком сокращает потери железа в электропечах при плавлении твердой шихты и повышает выход железа из нее. Подтверждением этого служат данные плавов на 60 т электропечи завода "Киа Стил" (Южная Корея). Выход жидкого железа из твердой шихты, состоящий из 20 % синтикома и 80 % скрапа, оказался на 2 % выше, чем при работе этой же электропечи на 100 % скрапа. Как показано в работе [11], аналогичное влияние оказывает синтиком и на выход железа в конвертерной плавке при условии рационального формирования металлозавалки. Подробнее этот вопрос освещен в разделе 4.3.

4.3. Оценка стоимости железа, полученного из синтикома

Располагая данными о выходе железа из различных сортов синтикома, представляется возможным оценить стоимость 1 т железа, полученного из композита различного состава в сравнении с чугуном.

Введем следующие обозначения:

$\Pi_{\text{чуг}}$ —	относительная стоимость 1 т чугуна. Принимаемая за базовую, равную 1;
Π_{Fe} —	относительная стоимость 1 т железа, выраженная через стоимость 1 т чугуна;
$\Pi_{\text{Feчуг}}$ и $\Pi_{\text{FeСК}}$ —	относительная стоимость 1 т железа, получаемого соответственно из чугуна и синтикома;
$C_{\text{Feчуг}}$ и $C_{\text{FeСК}}$ —	количество соответственно чугуна и синтикома, необходимого для получения 1 т железа;
$K_{\text{Feчуг}}$, $K_{\text{FeСК}}$ —	коэффициент выхода (извлечения) железа соответственно из чугуна и оксидов железа;
α_{Fe} —	угар железа при окислительном рафинировании чугуна, принятый равным 3,8 %.

Для состава чугуна, приведенного в табл. 4.1, выход железа из 1 т чугуна с учетом окисления примесей $[\text{C} - \text{Si} - \text{Mn}] = 5,2\%$ в чугуне и угара железа $\alpha_{\text{Fe}} = 3,8\%$ равен 910 кг. Откуда коэффициент выхода железа из чугуна $K_{\text{Fe чуг}}$ составит $910/1000 = 0,91$.

Для получения 1 т железа из чугуна необходимо чугуна в количестве

$$C_{\text{Fe чуг}} = C_{\text{чуг}} / K_{\text{Fe чуг}} = 1/0,91 = 1,099 \text{ т.}$$

При стоимости 1 т чугуна, принятой за 1, относительная стоимость этого чугуна, необходимая для получения 1 т железа, будет равна:

$$\Pi_{\text{Fe чуг}} = \Pi_{\text{Fe чуг}} \cdot \Pi_{\text{чуг}} = 1,099 \cdot \Pi_{\text{чуг}}.$$

Для получения 1 т железа из синтикома его потребуется

$$C_{\text{Feчуг}} = 1/K_{\text{FeСК}}.$$

Выход железа из 1 т синтикома разного состава приведен в табл. 4.2 и изменяется в пределах 767,9 – 901,25 кг. Этим значениям отвечает $K_{Fe\text{СК}} = 0,768 - 0,901$. Откуда количество синтикома, затрачиваемого на извлечение из него 1 т железа, будет изменяться в пределах

$$C_{Fe\text{СК}} = \frac{1}{0,769 - 0,901} = 1,302 - 1,110.$$

Относительная стоимость 1 т синтикома может быть выражена через стоимость его компонентов — чугуна $\Pi_{\text{чуг}}$, принятую за 1, и твердого окислителя, относительная стоимость которого принята 0,2 от цены чугуна, то есть $0,2 \Pi_{\text{чуг}}$. При этом должна быть учтена массовая доля этих компонентов в синтикоме. Исходя из этого, относительная стоимость 1 т синтикома различных марок составит:

$$\Pi_{\text{СК}} = \Pi_{\text{чуг}} \cdot m_{\text{чуг}} + \Pi_{\text{ок}} \cdot m_{\text{ок}} + \Pi_{\text{доп}} \quad (4.2)$$

где $\Pi_{\text{чуг}}$ и $\Pi_{\text{ок}}$ — соответственно стоимость 1 т чугуна и 1 т твердого окислителя; $m_{\text{чуг}}$ и $m_{\text{ок}}$ — соответственно массовая доля чугуна и твердого окислителя в синтикоме; $\Pi_{\text{доп}}$ — дополнительные расходы на получение 1 т синтикома по сравнению с разливкой чугуна, равные $\Pi_{\text{доп}} = 0,001 \Pi_{\text{чуг}}$.

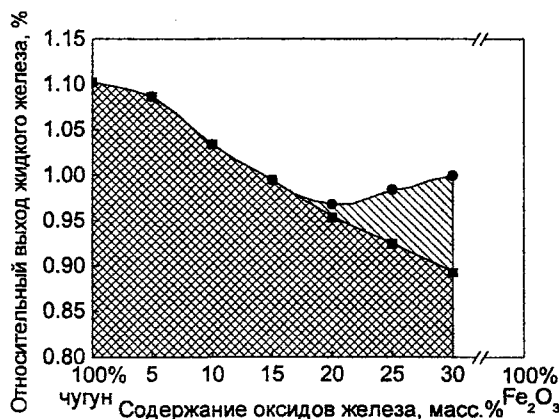


Рис. 4.3. Относительная стоимость 1 т железа, полученного из синтикома, в зависимости от содержания в нем оксидов железа: 1 — относительная стоимость тонны железа при восстановлении оксидов железа собственными восстановителями (полное восстановление при содержании оксидов железа менее 15%, частичное — при содержании более 15%); 2 — относительная стоимость тонны железа при полном восстановлении оксидов железа собственными восстановителями и дополнительно внесенным углеродом (полное восстановление в диапазоне содержаний оксидов железа от 5 до 30%).

Таблица 4.4

Показатели относительной стоимости синтикома и железа, полученного из него, в сравнении с 1 т передельного чугуна при одинаковом составе основы синтикома и чугуна

Показатели	Сорт синтикома					
	СК5	СК10	СК15	СК20	СК25	СК30
Соотношение углерода и кислорода в синтикоме	2,85	1,35	0,85	0,60	0,45	0,35
Относительная стоимость синтикома по отношению к чугуну	0,98	0,93	0,89	6,85	0,81	0,77
Показатели при условии восстановления оксидов железа собственными восстановителями						
Степень восстановления оксидов железа, %	100	100	100	91,23	68,42	53,21
Выход железа из 1 т синтикома, т	0,901	0,898	0,895	0,877	0,822	0,769
Стоимость 1 т железа в синтикоме, отнесенная к 1 т чугуна	1,087	1,035	0,994	0,9685	0,9845	1,001
Разница в стоимости 1 т железа, полученного из синтикома и чугуна, отнесенная к стоимости 1 т чугуна	+0,012	+0,064	+0,105	+0,1305	+0,1105	+0,0980
Показатели при полном восстановлении оксидов железа						
Степень восстановления оксидов железа, %	100	100	100	100	100	100
Выход железа из 1 т синтикома, т	0,901	0,898	0,895	0,889	0,874	0,861
Стоимость 1 т железа в синтикоме, отнесенная к стоимости 1 т чугуна при 100% восстановлении	1,087	1,035	0,994	0,956	0,926	0,894
Разница в стоимости 1 т железа, полученного из синтикома и чугуна, отнесенная к стоимости 1 т чугуна	+0,012	+0,064	+0,105	+0,143	+0,173	+0,205

Для примера относительная стоимость 1 т материала синтиком марки СК15, полученная по формуле (4.2), получается равной:

$$\Pi_{СК} = \Pi_{чуг} \cdot 0,85 + \Pi_{чуг} \cdot 0,2 \cdot 0,15 + 0,01 \Pi_{чуг} = 0,89 \Pi_{чуг}.$$

Для определения стоимости 1 т железа, извлеченного из синтикома, необходимо стоимость этого материала, определяемую по формуле (4.2), разделить на величину выхода железа из синтиком

$$\Pi_{DeCK} = \frac{\Pi_{СК}}{K_{FeCK}}.$$

Результаты расчетов относительной стоимости 1 т железа, полученного из синтикома различного состава и чугуна, представлены в табл.4.4 и рис.4.3. Здесь же приведена разница между относительной стоимостью 1 т железа, полученного из этих материалов. Из табл.4.4 и рис.4.3 вытекает, что стоимость 1 т железа из синтикома, выраженная через цену 1 т чугуна. Составляет $\Pi_{FeCK} = (0,894 - 1,087)\Pi_{чуг}$. Для 1 т железа, полученного из чугуна, стоимость выше и равна $\Pi_{Feчуг} = 1,099\Pi_{чуг}$.

Из сопоставления $\Pi_{Feчуг}$ и Π_{FeCK} следует, что стоимость 1 т железа в синтикоме ниже стоимости того же количества железа, полученного из чугуна, на 1,2 – 20,5 % стоимости чугуна.

Эти результаты относятся к случаю, когда оксиды железа в синтикоме полностью восстановлены. Если же часть оксидов из-за недостатка углерода осталась невосстановленной, как, например, в синтикоме марок СК20, СК25 и СК30 (табл.4.2), то это уменьшает выход железа и увеличивает его стоимость. При этом разница между стоимостью 1 т железа, извлеченного из композита и чугуна, уменьшается до 1,2 – 13 %. Однако и в этом случае, для всех марок синтикома стоимость 1 т железа из синтикома остается ниже стоимости 1 т железа, получаемого из чугуна.

Анализ стоимости показывает, что использование синтикома вместо твердого чугуна обеспечивает снижение стоимости извлеченного железа.

Выводы

1. Предложен новый подход к сравнительной оценке различных марок композиционных материалов типа синтиком и других аналогичных материалов по показателю относительного и абсолютного выхода жидкого железа в сравнении с перепельным чугуном или полупродуктом его внедомненной обработки.

2. В основе этого подхода лежит соблюдение принципа равенства массы исходного чугуна, предназначенного для преобразования в синтиком, и массы чугуна, вошедшего в состав этого композита, а также учет возрастания массы выхода композиционной пихты на 1 т исходного чугуна или полупродукта за счет ввода в состав последних дополнительного количества оксидных материалов.

3. При переводе чугуна в синтиком выход шихты на 1 т чугуна существенно возрастает и составляет для разных марок 1,05 – 1,43 т/т чугуна. При этом на 1 т чугуна дополнительно поступает железо, восстановленное из его оксидов, в количестве 34,6 – 280,3 кг. За счет этого относительный выход жидкого железа из композита возрастает и превышает эти показатели для чугуна.

4. Оценка этих показателей с использованием в качестве исходных величин для сравнения 1 т композита и 1 т чугуна является необходимой, но недостаточной, поскольку не учитывает дополнительного выхода композита на единицу массы чугуна за счет ввода в него оксидного материала и дополнительного прихода железа из оксидов при их восстановлении, а также сокращения угара железа в композите, благодаря наличию в нем собственного кислорода.

5. Относительный выход железа из 1 т синтикома получается выше, а абсолютный ниже, чем из 1 т чугуна. Последний факт является очевидным, поскольку сравнивается композит, состоящий из двух компонентов — чугуна и твердого окислителя, заведомо имеющий меньшее исходное содержание железа, с чугуном, не содержащим оксидов железа и имеющим в своем составе 95 % железа вместо 60 – 70 % его в оксидах железа, входящих в синтиком. Поэтому нельзя ограничиться только сопоставлением выхода железа из 1 т чугуна и 1 т синтикома, содержащего по определению меньшую долю чугуна.

6. Материалы типа синтиком в отличие от чугуна содержат оксиды железа, которые восстанавливаются углеродом и другими элементами чугуна — металлической основы. Поэтому степень восстановления железа из его оксидов может изменяться в широких пределах в зависимости от состава синтикома и компонентов, образующих синтиком, то есть от соотношения кислород-восстановители в синтикоме. Дополнительным источником поступления восстановителя являются углеродсодержащие материалы, вводимые в электроплавку и примеси жидкого чугуна в конвертерном процессе.

7. Выполнена сравнительная экономическая оценка синтикома и чугуна, основанная на использовании в качестве единицы цены стоимости 1 т передельного чугуна, принимаемой за базовую, равную 1. Анализ показал, что стоимость 1 т железа, полученная из композита, всегда ниже стоимости 1 т железа, извлеченной из чугуна. Эта разница в зависимости от марки композита изменяется в пределах 1,5 – 20,5 % в пользу синтикома.

Литература

1. Dorofeev G.A., Afonin S.Z. Synticom – a new metallic charge for steelmaking. *Steel Times International*. November. 1997. p. 32 – 34.
2. Дорофеев Г.А., Матвеев Л.З., Афонин С.З., Чумаков С.М. Опыт использования синтикома при выплавке стали. *Сталь*, 2001, № 3, с. 28 – 32.
3. Дорофеев Г.А. Синтиком на пути к международному признанию. *Металлург*, 1999, № 4, с. 27 – 29.
5. Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов. М.: *Металлургия*, 1982, с.160.
5. Ойкс Г.Н. Иоффе Х.М. Производство стали. (Расчеты). М.: Гос.научно-техн.изд. литературы по черной и цветной металлургии, 1960, с. 319.
6. Степанов А.А., Коротких В.Ф., Николаев А.З., Чичасов Д.Н. Новая методика изучения динамики шлакообразования при продувке конвертерной плавки. *Сталь*, 2002, № 1, с. 15 – 18.
7. Зинченко С.Д. Ефимов С.В., Краснов А.В., Смирнов Д.Е., Ордин В.Г., Моисеев А.А. Технология стали в кислородном конвертере в условиях нестабильного обеспечения шихтовыми материалами. *Труды девятого конгресса сталеплавильщиков*. М.: Черметинформация, 2007, с. 171 – 178.
8. Дорофеев Г.А., Матвеев Л.З., Афонин С.З., Чумаков С.М. Роль и место синтикома в металлошихте для выплавки стали. *Труды шестого конгресса сталеплавильщиков*. М.: Черметинформация, 2001, с. 220 – 229.
9. Дорофеев Г.А., Воробьев А.Г. Перспективы развития производства и использования композиционного шихтового материала Синтиком® в сталеплавильном производстве. *Черные металлы*. Декабрь 2002. Перевод с немецкого "Stahl und Eisen", № 7, с. 12 – 16.
10. Капустин Е.А. Перспективы альтернативных металлургических процессов. *Сталь*, 1998, № 8, с.78.
11. Шелягович А.В. Диссертация на соискание ученой степени канд.техн.наук. Разработка режимов формирования металлозавалки в кислородном конвертере с применением композиционных материалов и исследование их влияния на технологические показатели выплавки стали. М. ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П.Бардина", 2005.

Энерготехнологические характеристики синтикома

5.1. Основные реакции при нагреве и плавлении синтикома

Синтиком является новым видом первородной металлошихты и представляет собой композиционный материал, состоящий в простейшем варианте из железоуглеродистого сплава (как правило, передельного чугуна) и «законсервированных» в нем оксидов железа (окатышей, агломерата, окалины или руды). В общем случае в качестве наполнителя синтикома могут вводиться и другие виды материалов (углерод, оксид кальция, легирующие элементы, шлакообразующие) и, соответственно, состав синтикома может изменяться в достаточно широких пределах, обеспечивая для каждого конкретного плавильного агрегата оптимальные условия применения материала в процессе плавки. Технология производства, составы синтикома защищены рядом патентов РФ, США и европейских стран [1 – 4].

Слитки синтикома имеют форму чушек чугуна с массой 3 – 12 кг с весовым отношением основы и наполнителя (75 – 95) : (25 – 15). Для применения в кислородных конвертерах на ОАО «Северсталь» изготавливали синтиком с массовым соотношением между основой (чугуном), и наполнителем (агломератом) 70:30 – 75:25 [5]. В качестве товарной продукции синтиком с содержанием окислителя выше 25 % не поставляется, поскольку из-за большой доли наполнителя (более 50 % объема чушек) отливки материала имеют низкую механическую прочность и не выдерживают перегрузок при транспортировке.

Принципиальное отличие синтикома от других видов шихты заключается в одновременном присутствии в слитках материала легко окисляемых в сталеплавильных агрегатах примесей чугуна и оксидов железа, являющихся донорами кислорода. Вследствие этого при нагреве и плавлении в кусках материала начинают одновременно и параллельно идти процессы окисления кремния, марганца, фосфора и углерода, находящихся в чугуне, и восстановления Fe_2O_3 и FeO из наполнителя (железородного компонента). Если же в состав наполнителя введены частицы углерода (в виде графита, коксика или аналогичных материалов), то в компактированном наполнителе достаточно полное восстановление оксидов железа произойдет уже к моменту

завершения плавления чугуна. Одновременно с расплавлением кусков синтикома формируется "первичный" шлак, вспениваемый пузырями выделяющейся окиси углерода.

Лабораторные исследования процессов плавления образцов синтикома, в которых в качестве наполнителя использовались обожженные окисленные железорудные окатыши ГОКов КМА и индийская кусковая железная руда, показали, что твердофазное окисление углерода начинается при температурах выше 800°C , и скорость окисления углерода за счет оксидов из наполнителя резко возрастает после плавления основы (чугуна), то есть при температурах выше 1200°C . При весовой доле наполнителя 25 % максимальная скорость окисления углерода достигает при скоростях нагрева 17,1 град/мин 0,25 % С/мин, а при скоростях нагрева 23,5 град/мин — 0,4 % С/мин. В процессе плавления и нагрева образцов до 1500°C кремний и марганец чугуна окисляются практически полностью и переходят в шлак; в результате формирования "первичного" высокожелезистого шлака происходит активная дефосфорация металла (содержание фосфора с 0,049 % в исходном чугуне снижается до 0,034 % в металле с температурой 1400°C), однако из-за отсутствия в материале достаточных количеств СаО к моменту начала плавления стального лома ($1500 - 1530^{\circ}\text{C}$) и вследствие падения в шлаке доли монооксида железа, расходуемого на окисление углерода, идет частичная рефосфорация расплава.

Полученные в лабораторных условиях результаты подтверждены фактическими данными при использовании синтикома в шихте промышленных агрегатах.

Из-за активного окисления углерода во время плавления материала происходит непрерывное формирование и выделение пузырей СО из расплава, приводящее к вспениванию первичного шлака. В лабораторных экспериментах это в ряде случаев приводило к выбросам шлака из тигля; в электропечах вспененный шлак начинает "закрывать" при температурах выше 1200°C электрическую дугу, что обеспечивает повышение КПД использования электроэнергии на плавках. Результаты промышленных экспериментов на всех заводах, применявших синтиком, показывают, что для раннего формирования закрывающего дуги вспененного шлака достаточно в шихту печи присадить более 5 % от массы завалки синтиком марок СК15 или > СК20, разместив его в слое стального лома под электродами.

Реакции окисления примесей чугуна в синтикоме идут с выделением тепла, реакции диссоциации оксидов железа и восстановления Fe из FeO и Fe₂O₃ требуют расхода тепловой энергии. Поэтому, в зависимости от соотношения между количеством наполнителя и массой железоуглеродистого сплава, а также от состава компонентов синтикома будет изменяться "термичность" материала, под которой понимается количество тепловой энергии, необходимой на получение тонны жидкого полупродукта или первичной стали по американской терминологии.

5.2. Расчет термохимических параметров синтикома

Для определения “термичности” разных марок синтикома и сравнения его термохимических свойств с другими видами металлошхты выполнены расчеты по методике, используемой А.Н.Морозовым [6]. При расчетах энтальпии жидкого расплава заданной температуры в расчетах применяли формулы, приведенные в монографии [7], а для определения необходимого тепла на нагрев вдуваемого в печь кислорода применяли данные, приводимые Г.Н.Ойксом [8].

Термохимические расчеты позволяют оценить термичность шихтового материала вне зависимости от стадийности промежуточных процессов. Однако для получения представительных сопоставительных результатов следует учитывать, что в реальных условиях для полного окисления примесей требуется обеспечить подачу необходимых количеств дополнительного кислорода в процессе плавки, а для ошлакования в печах с основной футеровкой образующейся и вводимой с “пустой” породой SiO_2 — ввод минимально необходимого расчетного количества извести с получением в шлаке соотношения $\text{CaO}:\text{SiO}_2 \geq 2:1$.

В расчетах в качестве сталеплавильного агрегата принята дуговая электроречь После нагрева и плавления шихты предположили, что при температуре 1550°C образуется жидкий полупродукт (первичная сталь) состава (%): $\text{C} = 0,10$; $\text{Si} = 0,01$; $\text{Mn} = 0,03$; $\text{Fe}_{\text{мет}} = 99,80$ (остальные компоненты не принимали в расчет). Согласно [6] для всех видов шихты принято, что 50 % окислившегося углерода образует CO , а 50 % CO_2 . С учетом особенностей современных электропечей, активно использующих кислород в ходе нагрева и плавления шихты, задано, что 1,2 % всего поступившего в ванну железа окислится до FeO и перейдет в шлак, а 0,5 % железа окисляется до Fe_2O_3 и выносится из печи в виде “пыли”. Для всех видов шихты расход электродов на получение “первичной” стали принят равным 2,0 кг/т. Состав свежееобожженной металлургической извести в расчетах принят следующим: 88,0 % CaO ; 2,5 % SiO_2 ; остальные примеси извести (MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 и т.п.) не учитывали.

Для сопоставления использовали синтиком ОАО “Тулачермет”, ОАО “Северсталь”, ОАО “Чусовской металлургический завод”, причем на “Северстали” и в “Тулачермете” основой синтикома служил передельный чугун одного и того же состава, а на “ЧусМЗ” — полупродукт, получаемый в конвертерах из ванадиевого чугуна. Соответственно, синтикомы ОАО “Тулачермет” и ОАР “Северстали” содержали в качестве наполнителя окисленные железорудные окатыши ЛебГОКа и агломерат “Северстали”, а синтикомы “ЧусМЗ” — бессемеровский агломерат и окатыши КачГОКа.

Химический состав исходных видов материалов, разных видов шихты и синтикома разных марок приведен в таблице 5.1.

Расчет составляющих материального и теплового баланса плавки, показывающий “термичность” шихтового материала, проводился аналогично [6].

Таблица 5.1

Химический состав исходных шихтовых материалов и синтикома разных марок, масс. %

Компонент/материал	Fe _{общ}	Fe _{мет}	Fe ₂ O ₃	FeO	C	Si _{мет}	Mn _{мет}	SiO ₂	CaO	Пр. прим.
Стальной лом	98,40	98,05	0,50	—	0,20	0,20	0,50	0,50	—	—
Металлизированные окатыши	91,25	84,44	1,28	7,62	1,68	—	—	3,95	0,20	0,83
Передельный твердый чугун	94,60	94,60	—	—	4,40	0,70	0,10	—	—	0,20
Твердый полупродукт ЧусМЗ	95,90	95,90	—	—	4,00	0,03	0,03	—	—	0,04
Окатыши ЛебГОК	65,48	—	92,04	1,35	0,12	—	—	4,88	0,55	1,06
Агломерат "Северстали"	58,27	—	67,80	13,0	0,10	—	—	5,36	8,07	4,77
Окатыши КачГОКа	60,38	—	81,73	4,07	—	—	—	4,61	1,28	8,31
Агломерат бессемер. ЧусМЗ	61,25	—	39,47	43,23	0,82	—	—	5,68	1,14	9,66
Синтиком СК15 из чугуна с окатышами ЛебГОКа	90,23	80,41	13,81	0,20	3,76	0,60	0,09	0,73	0,08	0,32
Синтиком СК15 из чугуна с агломератом "Северстали"	89,15	80,41	10,17	2,09	3,84	0,60	0,09	0,80	1,21	0,79
Синтиком СК15 из полупродукта с окатышами КачГОКа	90,57	81,52	12,265	0,61	3,40	0,03	0,03	0,69	0,19	1,27
Синтиком СК15 из полупродукта с окатышами КачГОКа	90,70	81,52	5,92	6,48	3,52	0,03	0,03	0,85	0,17	1,48
Синтиком СК20- из чугуна с окатышами ЛебГОКа	88,78	75,68	18,41	0,27	3,54	0,56	0,08	0,98	0,11	0,37
Синтиком СК20 из чугуна с агломератом "Северстали"	87,33	75,68	13,56	2,78	3,54	0,56	0,08	1,07	1,61	1,12
Синтиком СК15С2 из чугуна с рудугольными окатышами (наполнитель 15% концентрата ЛГОКа + 2% коксика)	88,34	75,52	13,82	0,20	5,35	0,58	0,08	0,93	0,08	3,44

В качестве примера приводится порядок выполненного расчета на шихте, состоящей из 100 % стального лома (на 1 т лома).

Из поступивших 984 кг железа до Fe_2O_3 окислится и улетучится в виде пыли 4,92 кг Fe, окислится до FeO и перейдет в шлак 11,81 кг Fe, образуя 15,18 кг FeO. Для окисления железа потребуется 5,48 кг кислорода. Из железной окалины (Fe_2O_3) после восстановления образуется 3,5 кг Fe и выделится 1,5 кг кислорода.

В жидком металле останется 967,27 кг железа, 0,97 кг C, 0,10 кг Si и 0,29 кг Mn (в соответствии с принятым составом первичной стали). Всего в печи окислится на 1 т лома 3,03 кг углерода (в том числе 2,0 кг из электродов), 1,9 кг Si и 4,71 кг Mn. Для окисления этих элементов и дожигания 50 % образующейся CO до CO_2 необходимо 9,6 кг кислорода. В результате образования SiO_2 в шлаке для оплакования SiO_2 (с учетом поступившего кремнезема из примесей лома и металлургической извести) потребуется 21,86 кг извести.

Общая масса необходимого (вдуваемого) кислорода для окисления примесей (учтен кислород, выделившийся при диссоциации Fe_2O_3) составляет 13,58 кг (9,5 м); на нагрев этого количества кислорода до 1550 °C (конечной температуры расплава) требуется теоретически 20,6 МДж тепловой энергии [8].

Расчетная масса образовавшегося жидкого металла — 968,7 кг, масса шлака — 52,2 кг (в шлаке примерно 29,1 % FeO).

Расчет энтальпии при 1550°C образовавшихся количеств жидкого металла и шлака выполняем по формулам из [7]:

$$\Delta H_t^{\text{ж.м}} = 1307 + 0,799(t - 1500), \text{МДж/т},$$

$$\Delta H_t^{\text{шл}} = 1904 + 1,2(t - 1500), \text{МДж/т}.$$

Тогда суммарная потребность в тепловой энергии на нагрев полученных металла и шлака составит 1407,4 МДж.

Для расчета термичности материала сопоставим расходы тепла на восстановление Fe_2O_3 , нагрев кислорода, металла и шлака и приходы тепла от реакций окисления примесей и шлакообразования (по данным [6]).

Расход тепла		Приход тепла	
На восстановление 5 кг Fe_2O_3 до Fe	25,8 МДж	Окисление 11,81 кг Fe до FeO	56,2 МДж
На нагрев 9,5 м ³ O_2 до 1550°C	20,6 МДж	Окисление 4,92 кг Fe до Fe_2O_3	30,9 МДж
На нагрев металла и шлака до 1550°C	1407,4 МДж	Окисление 1,9 Si до SiO_2	54,0 МДж
		Окисление 4,71 кг Mn до MnO	32,9 МДж
		Окисление 3,03 кг C до CO/ CO_2	54,2 МДж
		Оплакование 9,62 кг SiO_2	20,3 МДж
Итого расход тепла =	1453,8 МДж	Итого приход тепла =	248,5 МДж

Термичность — 1 т стального лома указанного состава равна $1453,8 - 248,5 = 1205,3$ МДж.

В пересчете на 1 т первичной стали теоретически требуется 1032 кг стального лома, 22,6 кг металлургической извести, $9,8 \text{ м}^3$ кислорода и 1244,2 МДж (345,6 кВтч) тепловой энергии.

Результаты аналогичных расчетов для других видов шихтовых материалов представлены в таблице 5.2. Следует специально отметить, что выполненные формализованные расчеты приняты для условий использования 100 % одного вида материала в шихте электроплавки, что, за исключением стального лома, обычно не соблюдается. Кроме того, в расчетах приняты допущения (например, нагрев всей массы кислорода до 1550°C , одинаковая доля окислившегося железа в ходе плавки для всех материалов и т.д.), не соблюдающие обычно в практике. Поэтому полученные в табл. 5.2 данные позволяют лишь оценить термохимические свойства шихтовых материалов и сопоставить отдельные марки синтикома с другими видами шихты. В то же время термохимические расчеты достаточно наглядно подтверждаются практическими результатами, достигаемыми при выплавке стали из лома. Дополнительно следует отметить, что при использовании синтикома имеет место интенсивное выделение оксида углерода с момента начала плавления материала, а это снижает окислительный потенциал газовой фазы и позволяет уменьшить степень окисления лома вдуваемым кислородом, повышая соответственно выход годного.

Для оценки минимально необходимых затрат энергии в дуговых электропечах на получение 1 т жидкого металла необходимо учитывать тепловые потери печи и коэффициент использования электрической энергии в печной установке. А.Н.Морозов в расчетах [6] принимает электрический КПД установки не зависящим от периода плавки и во всех случаях равным 0,94. В литературе [7, 9] показано, что коэффициент использования электроэнергии зависит от емкости печи, количества подвалок, длительности периода работы с “закрытой” дугой и т.д., причем авторы работы [7] на основе экспериментальных данных подтверждают, что для электропечей емкостью более 140 т коэффициент использования электроэнергии при шихте из 100 % стального лома находится в пределах 0,80 – 0,90, для шихты с добавкой металлизированных окатышей — 0,78 – 0,84.

Поскольку при вводе в шихту синтикома наблюдается раннее формирование вспененного шлака, закрывающего дугу и повышающего тем самым коэффициент использования электроэнергии, то для расчета минимально необходимых энергозатрат на плавление и получение 1 т первичного расплава с температурой 1550°C (без учета тепловых потерь печи) принимаем для электродуговых печей следующие коэффициенты использования электроэнергии:

- для шихты из 100 % стального лома — 0,88;
- для шихты из смеси стального лома и чутуна — 0,86;
- для скрапа из стального лома и металлизированных окатышей — 0,84;
- для шихты из смеси стального лома и синтикома — 0,92

Таблица 5.2

Расчетные термохимические характеристики разных видов шихтовых материалов и потребности в металлургической извести и кислороде при электроплавке стали на шихте из 100 % материала (на 1 т жидкого металла с температурой 1550 °С)

Материал	Показатель			Потребность в тепловой энергии, кВтч
	Расход материала, кг	Расход извести, кг	Расход кислорода, м ³	
Стальной лом	1032	22,6	9,8	345,6
Метализованные окатыши	1114	103,3	15,7	435,1
Передельный твердый чугун	1074	38,3	77,8	118,6
Твердый полупродукт ЧусМЗ	1059	1,5	65,0	179,6
Синтиком марки				
СК15 из чугуна с окатышами ЛебГОКа	1126	54,2	37,5	361,2
СК15 из чугуна с агломератом "Север-стали"	1139	39,9	46,3	329,8
СК15 из полупродукта с окатышами КачГОКа	1122	17,2	29,4	401,3
СК15 из полупродукта с бессемер. Агломератом	1120	21,9	36,0	366,2
СК20 из чугуна с окатышами ЛебГОКа	1144	58,0	23,0	459,5
СК20 из чугуна с агломератом "Север-стали"	1163	40,6	30,6	410,4
СК15С2 из чугуна с рудопольными окатышами	1150	58,5	63,6	317,7

(полагая, что загрузка синтикома выполняется по оптимальной технологии, то есть в первой корзине шихты в зону под электродами с вводом минимально необходимого по расчету количества извести).

В электропечах обычно доля разной шихты (кроме стального лома) не превышает 20 %. Расчетные теоретические расходы материалов и энергоносителей для возможных различных наборов шихты с учетом принятых коэффициентов использования электроэнергии (без учета тепловых потерь печи, энергозатрат на нагрев расплава до температуры выпуска 1640 – 1670 °С представлены в таблице 5.3.

Расчетные минимально необходимые расходы материалов и электроэнергии на выплавку 1 т жидкой первичной стали (температура расплава 1550°C) в электропечах большой емкости из разных наборов шихты

Состав металлошихты	Расчетный максимальный выход “жидкого”, %	Расход материала, кг	Оптимал- ьный расход кислорода, нм ³ /т	Минимально необходимый расход свеже- обожженной извести, кг/тк	Минимально необходимый расход электроэнергии, Втч/т (без учета тепло- вых потерь печи)	Расход*электро- энергии на 1 т жидкой стали в сравнении с шихтой из 100 % сталь- ного лома, %
100 % стального лома	96,9	1032	9,8	22,6	392,7	—
80 % стал.лома +20% металл. окатышей	95,4	1048	11,0	38,7	432,7	+10,2
80 % стал.лома+20% твердого перед.чугуна	96,1	1040	23,4	25,7	349,1	-11,1
80 % стал.лома +20% синтикома СК15 из чугуна с окатыш.ЛГОКа	95,2	1051	15,3	28,9	379,0	-3,5
80 % стал.лома +20% синтикома СК15 из полупро- дукта с окатышами КачГОКа	95,2	1050	13,7	21,5	387,8	-1,2
80 % стал.лома +20% синтикома СК20 из чугуна с окатыш.ЛГОКа	94,8	1054	12,4	29,7	400,4	+2,0
80 % стал.лома +20% синтикома СК20 из чугуна с агломератом “Северстали”	94,5	1058	14,0	26,2	389,7	-0,8
80 % стал.лома +20% синтикома СК15С2 из чугуна с рудоугольными окатышами	94,7	1056	20,6	29,8	369,6	-5,9

* (+) — увеличение, (-) уменьшение.

5.3. Анализ расчетных и экспериментальных данных

Подтверждением правильности оценки энергозатрат на выплавку стали с применением в шихте синтикома служат результаты крупномасштабных промышленных испытаний материала, проведенных в современных высокоинтенсивных электропечах Молдавского металлургического завода, завода "Steel Dynamics Inc." (SDI, г. Батлер, штат Индиана, США) и других предприятий в 1997 – 1998 гг.

В условиях ММЗ синтиком, изготовленный на ОАО "Тулачермет" и содержащий в среднем около 15 – 17,5 % окисленных окатышей МихГОКа, применялся в качестве компонента шихты в 120-т электродуговой печи переменного тока, работающей по технологии "Данарк". В процессе испытаний было проведено более 40 плавов с долей синтикома в металлозавалке печи в среднем 20 %. Результаты плавов с синтикомом сопоставлялись с традиционной технологией работы печи на шихте из 100 % стального лома. Средний расход электроэнергии на тонну жидкой стали, выпускаемой в "печь-ковш", при использовании традиционной шихты составил 431,6 кВтч, при использовании скрапа с синтикомом — 420,2 кВтч. При анализе результатов плавов в электропечи ММЗ следует учитывать наличие дополнительных источников энергии, вводимых в печь во время плавки: по принятой технологии загружается в завалку и вдувается в шлак (для вспенивания) примерно 8,3 кг углерода на тонну жидкой стали (в виде коксика и угольного порошка), а на горелки печи за время плавки расходуется около 7 нм природного газа на 1 т стали. Теплота сгорания природного газа принимается равной 35 МДж/м³. Считаем, что вводимый в завалку и вдуваемый углерод окисляется до СО, а 50 % СО дожигается до СО₂, и в этом случае на 1 кг углерода дополнительно выделяется 17,9 МДж тепловой энергии [6]. Примем условно, что 50 % тепловой энергии, поступившей от окисления введенного кускового и порошкообразного углерода, а также от сгорания природного газа поглотится расплавом. Для нагрева расплава от расчетной температуры (1550 °С) до температуры выпуска (1640 – 1660 °С) необходимо примерно 30 кВтч электроэнергии на 1 т жидкой стали. Общие тепловые потери печи примем равными 15 % от фактического расхода электроэнергии на 1 т жидкой стали.

В соответствии с данными табл. 5.2 для плавления и нагрева до 1550 °С с получением 1 т первичной жидкой стали из 100 % стального лома теоретическая потребность в тепловой энергии составляет 345,6 кВтч. Фактически в печи ММЗ расход энергии на получение из 100 % лома 1 т первичной жидкой стали с температурой 1550 °С составил:

$$431,6 + 54 - 30 - 0,15 \cdot 431,6 = 390,9 \text{ кВтч},$$

где 431,6 — расход электроэнергии на 1 т жидкой стали с температурой выпуска 1650 °С, кВтч; 54 — дополнительный приход тепла от сжигания природного газа и окисления вводимого углерода (50 % расчетного количества

теплоты), кВтч/т стали; 30 — расчетное количество электроэнергии на нагрев 1 т расплава от 1550 °С до температуры выпуска, кВтч; 0,15·431,6 — расчетная величина тепловых потерь печи, кВтч/т стали.

Коэффициент использования энергии электрической дуги в этом случае составил:

$$\eta_{ад} = \frac{345,6}{390,9} = 0,884, \text{ то есть } \approx 88 - 89 \, \%.$$

Для получения 1 т первичной жидкой стали с температурой 1550 °С из шихты, состоящей из 80 % стального лома и 20 % синтикома типа СК15 (15–17,5 % наполнителя из окатышей ГОКов КМА) расчетная минимальная потребность в тепловой энергии в соответствии с данными табл. 5.2 составит:

$$0,8 \cdot 345,6 + 0,2 \cdot 361,2 = 348,7 \text{ кВтч.}$$

Фактически в печи ММЗ расход энергии на получение 1 т “первичной” жидкой стали с температурой 1550 °С из этой шихты составил:

$$420,2 + 54 - 30 - 0,15 \cdot 420,2 = 381,2 \text{ кВтч,}$$

где 420,2 — расход электроэнергии на 1 т жидкой стали с температурой выпуска 1650 °С, кВтч; 54 — дополнительный приход тепла от сжигания природного газа и окисления вводимого углерода (50 % расчетного количества теплоты), кВтч/т стали; 30 — расчетное количество электроэнергии на нагрев 1 т расплава от 1550 до 1650 °С, кВтч; 0,15·420,2 — расчетная величина тепловых потерь печи, кВтч/т стали.

Коэффициент использования энергии электрической дуги при выплавке стали из шихты 80 % стального лома + 20 % синтикома СК15 получается равным

$$\eta_{ад} = \frac{348,7}{381,2} = 0,915, \text{ то есть } \approx 91 - 92 \, \%.$$

В условиях завода SDI (СИПА) после проведенного в сентябре 1998 г. комплекса работ по выбору оптимальной технологии использования синтикома в шихте 150-т дуговой электропечи в качестве наиболее приемлемого варианта принята следующая шихтовка плавов: 81,8 % стального лома, 9,7 % синтикома СК20 (1-я корзина) и 8,5 % твердого передельного чугуна (2-я корзина шихты). Для сопоставления в качестве базовой технологии принимали следующую: 86 % стального лома + 14 % твердого передельного чугуна.

На печах SDI расход природного газа $\approx 2 \text{ нм}^3/\text{т}$ стали, дополнительным источником энергии (и науглероживателем расплава) служит углерод, загружаемый в шихту, (нефтекокс) в количестве $\approx 10 \text{ кг}$ на 1 т жидкой стали на плавках по “базовой” технологии и $\approx 14 \text{ кг}$ на 1 жидкой стали на плавках

с использованием синтикома, кроме того, на всех плавках используется “инжектируемый” углерод (угольный порошок, вдуваемый для вспенивания плака) в количестве $\approx 7,7$ кг/т стали независимо от вида шихты.

Расход электроэнергии на плавках по “базовой” технологии (14 % твердого чугуна в металлошихте) составляет по 443 плавкам усредненно 458,5 кВтч/т жидкой стали; на серии из 10 опытных плавов с синтикомом (9,7 % СК20 + 8,5 % чугуна) — 456,5 кВтч/т жидкой стали.

Теоретическая потребность в тепловой энергии для получения 1 т “первичной” жидкой стали с температурой 1550 °С из шихты 86 % стального лома + 14 % твердого чугуна составляет (см. табл. 5.2):

$$345,6 \cdot 0,86 + 118,6 \cdot 0,14 = 313,8 \text{ кВтч.}$$

Теоретическая потребность в тепловой энергии для получения 1 т первичной жидкой стали с температурой 1550 °С из шихты 81,8 % стального лома + 8,5 % твердого чугуна + 9,7 % синтикома СК20 (с окатышами ЛГОКа) составляет по данным табл. 5.2:

$$345,6 \cdot 0,818 + 118,6 \cdot 0,085 + 459,5 \cdot 0,097 = 337,4 \text{ кВтч.}$$

Фактически в печи SDI расход энергии на получение 1 т жидкой первичной стали с температурой 1550 °С для шихты из 86 % стального лома + 14 % чугуна составил:

$$458,5 + 53 - 30 - 0,15 \cdot 458,5 = 412,7 \text{ кВтч,}$$

где 458,5 — расход электроэнергии на получение 1 т жидкой стали с температурой 1650 °С, кВтч; 53 — дополнительный приход тепла от окисления 16,4 кг углерода, вводимого на 1 т стали в шихту и “инжектируемого” в печь на плавках “базовой” технологии сгорания 2 м³ природного газа (50 % расчетного количества теплоты), кВтч/т стали; 30 — расчетное количество электроэнергии на нагрев 1 т расплава от 1550 °С до температуры выпуска, кВтч; 0,15 · 458,5 — расчетная величина тепловых потерь печи, кВтч/т стали.

Коэффициент использования энергии электрической дуги в этом случае равен:

$$\eta_{\text{ад}} = \frac{313,8}{412,7} = 0,76, \text{ то есть } \approx 76 \, \%.$$

Фактически на SDI расход энергии на получение 1 т жидкой стали с температурой 1550 °С из шихты 81,8 % стального лома + 8,5 % чугуна + 9,7 % синтикома СК20 оказался равным:

$$456,5 + 65 - 30 - 0,15 \cdot 456,5 = 423,0 \text{ кВтч,}$$

где 456,5 — затраты электроэнергии на получение 1 т жидкой стали с температурой 1650 °С, кВтч; 65 — дополнительный приход тепла от

окисления 22,1 кг углерода, вводимого на 1 т стали в шихту и “инжектируемого” в печь на плавках с использованием синтикома и сжигания 2 нм природного газа (50 % расчетного количества теплоты), кВтч/т стали; 30 — расчетное количество электроэнергии на нагрев 1 т расплава от 1550 °С до температуры выпуска, кВтч; 0,15·456,5 — расчетная величина тепловых потерь печи, кВтч/т стали. Коэффициент использования энергии электрической дуги на плавках с синтикомом составил:

$$\eta_{ад} = \frac{337,4}{423,0} = 0,798, \text{ то есть } \approx 80 \, \%.$$

Таким образом, фактические полученные экспериментальные данные по энергозатратам на выплавку стали из разных видов шихты, в том числе с применением синтикома, в высокомоощных современных электропечах, использующих большие количества кислорода (свыше 22 нм³/т стали на заводе SDI и более 30 нм³/т стали на ММЗ), подтверждают, что КПД использования электроэнергии при вводе в шихту синтикома за счет раннего формирования вспененного шлака, закрывающего дугу, примерно на 4 % выше, чем на плавках с традиционной шихтой (стальной лом, твердый чугун).

Даже при использовании синтикома не оптимальным образом (применение в подвалках вместо загрузки под электроды в 1-й корзине перед включением печи), а также при загрузках синтикома неудовлетворительного качества (большое количество боя чушек с отделением железорудного наполнителя, повышенное содержание оксидной фазы по сравнению с предусмотренными техусловиями на заказанную марку) наблюдается повышение КПД использования электрической энергии, хотя, естественно, в этих случаях величина КПД будет меньшей. Это подтвердили результаты применения синтикома в 60-ти дуговой печи переменного тока системы “Данарк” на заводе фирмы “Де Асери” Монтеррей, Мексика).

На этот завод поступила партия синтикома производствам ОАО “Тулачермет”, прошедшая большое количество перегрузок в ходе транспортировки, причем доля окатышей в этой партии синтикома в среднем составляла около 22 % (по ТУ синтиком соответствовал марке СК20). Из-за высокого содержания оксидной составляющей большая часть слитков синтикома в ходе перевалок при транспортировке по маршруту Тула — Таллинн — Нью-Йорк — Монтеррей — завод “Де Асери” была расколота и значительная часть материала представляла собой механическую смесь боя чугуна и выкрошившейся железной руды. На заводе синтиком использовали при выплавке сталей для метизов взамен чугуна, загружая частично в завалку, частично — в подвалку. Результаты использования синтикома, расход которого в среднем составлял 14,78 % от массы металлозавалки, на 16 проведенных плавках показали, что средний расход электроэнергии на 1 т непрерывнолитой заготовки составил 431 кВтч (примерно 413 кВтч на 1 т жидкой стали, выпущенной из печи). Расход углерода в загрузку на

плавках с синтикомом составил в среднем 16,5 кг/т стали; расход инжектируемого углерода (угольного порошка) — 8,0 кг/т стали, расход метана на горелки и инъекцию — 4,0 нм /т стали, Принятая технологией завода температура выпуска стали из печи — 1640 °С, расход кислорода на 1 т жидкой стали — около 50 нм³.

Расчет коэффициента использования энергии электрической дуги выполняем аналогично расчетам для заводов SDI и ММЗ.

Теоретическая потребность в тепловой энергии для получения 1 т “первичной” жидкой стали с температурой 1550 °С из шихты 85 % стального лома + 15 % синтикома СК20 (согласно данным табл.5.2):

$$345,6 \cdot 0,85 + 459,5 \cdot 0,15 = 362,7 \text{ кВтч.}$$

Фактически на заводе “Де Асери” расход энергии на получение 1 т жидкой стали из шихты с синтикомом составил:

$$413 + 80,3 - 27 - 0,15 \cdot 413 = 404,3 \text{ кВтч,}$$

где 413 — затраты электроэнергии на получение 1 т жидкой стали с температурой 1640 °С, кВтч; 80,3 — дополнительный приход тепла от сгорания 4 нм /т стали метана и окисления 24,5 кг/т стали загружаемого в шихте и “инжектируемого” углерода (50 % расчетного количества теплоты), кВтч/т стали; 27 — расчетное количество электроэнергии на нагрев 1 т расплава от 1550 °С до 1640 °С, кВтч; 0,15·413 — расчетная величина тепловых потерь печи, кВтч/т стали.

Коэффициент использования энергии электрической дуги на плавках с синтикомом составил:

$$\eta_{\text{эд}} = \frac{362,7}{404,3} = 0,897, \text{ то есть } \approx 89 - 90 \, \%.$$

В качестве сопоставления приняты усредненные результаты 25 плавки стали в этой же печи по “базовой” технологии шихты (100 % стального лома), проведенных через сутки после испытаний опытной партии синтикома. На плавках “базовой” технологии расход электроэнергии на 1 т непрерывнолитой заготовки составил 418 кВтч (400 кВтч на 1 т выпущенной из печи жидкой стали), расход углерода в загрузку — в среднем 13,3 кг/т стали, расход инжектируемого угольного порошка — 8,0 кг/т стали, суммарный расход металла — 5,0 нм/т стали, расход кислорода — около 50 нм/т стали, температура выпуска — 1640 °С.

Теоретическая потребность в тепловой энергии на получение 1 т первичной жидкой стали с температурой 1550 °С из 100 % стального лома в шихте — 345,6 кВтч (табл.5.2).

Фактически на заводе “Де Асери” расход энергии на получение 1 т жидкой стали из 100% стального лома составил:

$$400 + 77,3 - 27 - 0,15 \cdot 400 = 390,3 \text{ кВтч,}$$

где 400 — затраты электроэнергии на получение 1640°C, кВтч; 77,3 — дополнительный приход тепла от сгорания метана (5 нм³/т) и окисления загружаемого и инжектируемого углерода (21,3 кг/т стали) (50 % расчетного количества теплоты), кВтч/т стали; 27 — расчетное количество электроэнергии на нагрев 1 т расплава от 1550°C до 1640°C, кВтч; 0,15·400 — расчетная величина тепловых потерь печи, кВтч/т стали.

Коэффициент использования энергии электрической дуги на плавках из 100 % стального лома составил:

$$\eta_{ад} = \frac{345,6}{390,3} = 0,885, \text{ то есть } \approx 88 - 89 \, \%.$$

Следовательно, даже при использовании синтикома неудовлетворительного качества по неоптимальной технологии (загрузка в подвалку на части плавков) обеспечивается повышение 3 ч, коэффициента использования электрической энергии на плавку стали более чем на 1 %. Если же синтиком применяется по оптимальной технологии, то коэффициент использования энергии электрической дуги в современных печах может возрасти на 4 – 5 % по сравнению с традиционной шихтой.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на повышенную теоретическую эндотермичность в сравнении со стальным ломом и чушковым чугуном, синтиком фактически может обеспечить снижение энергозатрат на выплавку стали, обусловленное специфическими металлургическими преимуществами материала в электродуговых печах, в том числе формированием активного вспененного шлака. Для марок синтикома, содержащих менее 15 % твердого окислителя и имеющих более низкий расход электроэнергии, чем металлолом, снижение энергозатрат на выплавку стали получается более заметным, чем в рассмотренных случаях. Это создает необходимые предпосылки для применения в шихте электропечей синтикома вместо лома, железа прямого восстановления, твердого чугуна либо совместно с ними.

Синтиком производят из первородных материалов (перedefьного чугуна и железной руды). Поэтому он содержит минимальное количество нежелательных примесей цветных металлов. Это позволяет заменять синтикомом в электроплавке другие виды первородной шихты, обеспечивая снижение содержания примесей цветных металлов в высококачественных сталях (автолистовых, кордных, трубных для нефте-, газопроводных труб “северного” исполнения и т.п.).

При этом синтиком позволяет получать достаточно высокие технико-экономические показатели электроплавки даже в электропечах с относительно малыми расходами кислорода (менее 10 нм³/т), например, в печах Волжского трубного завода. Ввод в шихту таких печей чушкового чугуна в количествах более 10 – 15 % массы завалки, как правило, приводит к увеличению времени плавки из-за затягивания периода обезуглероживания,

особенно при выплавке низкоуглеродистых сталей. Из табл. 5.3 следует, что применение шихты из 80 % стального лома и 20 % твердого чугуна требует увеличения расхода кислорода на плавку в 2,4 раза по сравнению с шихтой из 100 % стального лома. Если же в шихту вводится синтиком (особенно с повышенной долей оксидного наполнителя марки СК20 – СК25), то можно практически не увеличивать расход кислорода, однако при этом возрастут затраты электроэнергии.

Это подтвердили плавки, проведенные на $\approx 15 - 17 \%$ от массы завалки синтикома СК20. При практически неизменной длительности плавки расход электроэнергии на 1 т стали возрос в среднем на 2,7 % по сравнению с плавками на шихте из 100 % стального лома. Технические службы ВТЗ отмечают, что ввод каждые 10 т синтикома в шихту 150-т печи обеспечивает уменьшение суммарного остаточного содержания в сталях примесей цветных металлов на 5 % отн. Исследования качества трубных сталей, выплавленных на "ВТЗ" с применением в шихте синтикома, проведенные ГНЦ РФ "ЦНИИ Чермет им. И.П. Бардина", подтвердили, что за счет снижения остаточной доли примесей цветных металлов возрастает величина ударной вязкости металла при отрицательных (-40°C , -60°C) температурах и повышается стабильность вязкостных характеристик металла, особенно в области низких температур, по сравнению со сталями текущего производства, что особо значимо для труб, поставляемых на Север.

Из табл. 13 следует, что ввод синтикома в шихту электродуговой печи должен приводить к снижению выхода жидкой стали. Однако крупномасштабные промышленные испытания синтикома в высокоинтенсивных электропечах показали, что после ввода синтикома в шихту выход жидкой стали, как правило, возрастает. Так, на ММЗ выход годного на плавках из 100 % стального лома за 9 месяцев 1997 г. составил 89,5 %, а на 46 плавках с шихтой 80 % лома + 20 % синтикома в декабре 1987 г. — 91,3 %. На заводе SDI выход годного на плавках "базовой" технологии (86 % лома + 14 % чушкового чугуна) в августе 1998 г. составил 93,1 %, а на серии из 10 плавков с синтикомом (81,8 % лома + 8,5 % чугуна + 9,7 % синтикома) — 94,5 %. На заводе "Де Асери" (Мексика) выход непрерывнолитой заготовки на 25 плавках с шихтой из 100 % стального лома составил 86,9 %, а на 16 плавках с шихтой 85 % лома + 15 % синтикома — 87,5 %. Практически не изменился выход годного (при сокращении времени плавки на 1 – 2 мин) в ходе испытаний синтикома в 60-т электропечи постоянного тока турецкого завода фирмы "Кроман" (Стамбул), работающей с расходом кислорода более 20 нм /т. Причиной увеличения выхода годного при использовании синтикома в шихте электропечей, работающих с большими расходами кислорода, служит то, что до завершения плавления шихты и формирования покровного шлака вдуваемый кислород расходуется главным образом на поверхностное окисление лома и часть железа шихты теряется в виде пыли и в виде избыточных количеств монооксида железа в первичном шлаке, удаляемом из печи. При вводе в завалку синтикома первичный шлак

образуется раньше, чем га шихте, состоящей из 100 % лома или из лома и чугуна. Кроме того, с момента плавления синтикома в печи интенсивно выделяется СО. Вместе взятое, это обеспечивает возможность предохранения части кусков лома от поверхностного окисления вдуваемым чистым кислородом и способствуют тем самым сохранению железа в ванне и повышению выхода годного. Снижение окисленности первичного шлака в результате использования синтикома подтверждено анализом шлаков на ММЗ: в первой пробе шлака по расплавлению на шихте из 100 % лома содержание FeO в среднем 25,0 %, а на шихте из 80 % лома + 20 % синтикома среднее значение содержания FeO в 1-й пробе шлака (по 21 плавке) составило 20,5 %. Это означает, что формирующийся в процессе плавления синтикома шлак обеспечил защиту части скрапа от прямого окисления струей кислорода и снизил потери железа в виде окислов при удалении шлака из печи (во 2-й пробе шлака — при скачивании к содержанию FeO в шлаке на плавках с синтикомом в среднем составляло 18,1 %, а на плавках с шихтой из 100 % лома — 22,6 %).

В электропечах, работающих с "недостатком" кислорода (в частности — 150-т печи Волжского трубного завода) эффект повышения выхода годного после ввода синтикома в шихту не наблюдается. Расход шихты на ВТЗ на плавках традиционной технологии (без синтикома) составлял 1122 кг/т стали, а на плавках с применением синтикома — 1125 кг/т стали. Практически аналогичные результаты (некоторое снижение выхода жидкой стали после ввода синтикома в шихту) подтверждают опытные плавки, проведенные в электропечах малой емкости (0,5 – 10 т) литейных цехов ряда предприятий.

Увеличение выхода жидкой стали в результате использования в шихте плавки синтикома является одним из несомненных достоинств этого материала для современных высокомоощных электродуговых печей, работающих с большими расходами кислорода.

5.4. Определение охлаждающего эффекта синтикома

Исходные данные для расчета:

1. В качестве примера выбираем наиболее употребляемую марку синтикома СК15. Одна тонна этого материала состоит из 850 кг чугуна и 150 кг железорудных окатышей.

2. Химический состав компонентов синтикома, масс. %:

Чугун			
C	Si	Mn	Fe
4,50	0,50	0,20	94,8
Железорудные окатыши			
Fe ₂ O ₃	FeO	пустая порода	
93,53	1,13	5,34	

3. Расчетный состав синтикома марки СК15, масс. %

C	Si	Mn	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe
3,83	0,43	0,17	14,03	0,17	86,30

4. Температура плавления синтикома 1380°C. Принимается по температуре плавления более тугоплавкого компонента (окатышей).

5. Теплоемкость железорудных окатышей 0,86 кДж/(кг·град). Получено как среднеарифметическое от теплоемкости окатышей в диапазоне температур 20 – 1400°C.

6. Начальная температура синтикома 20°C.

Определим количество тепла, необходимое для нагрева 850 кг чугуна до температуры 1380°C по Г.Н.Ойксу [8]:

$$Q_2 = 850 \cdot [0,178 \cdot 1150 + 52 + 0,2 \cdot (1380 - 1150)] = \\ = 257295 \text{ ккал} = 1076,5 \text{ МДж} = 298,95 \text{ кВтч.}$$

В расчете на 1 кг чугуна расход энергии получается равным 0,35 кВтч/кг чугуна. Количество тепла, необходимое на нагрев железорудных окатышей до температуры 1380°C, составит:

$$Q_{\text{ок}} = 0,86 \cdot 150 \cdot (1380 - 20) = 175,4 \text{ МДж} = 48,7 \text{ кВтч}$$

или 0,325 кВтч/кг окатышей.

Далее определяем массу кислорода и окисляемых элементов в синтикоме. Масса кислорода в 1 т композита СК15 равна

$$150 \cdot 93,53 / 100 \cdot 0,3 + 150 \cdot 1,13 / 100 \cdot 0,22 = \\ = 14,30 \cdot 0,3 + 1,7 \cdot 0,22 = 42,46 \text{ кг.}$$

Масса элементов-восстановителей в синтикоме составит:

Углерод — 38,30 кг;

Кремний — 4,30 кг;

Марганец — 1,70 кг.

На окисление кремния и марганца потребуется соответственно $4,30/0,88 = 4,89$ кг и $1,7/3,4 = 0,5$ кг кислорода, всего 5,39 кг. Избыток кислорода на 1 т синтикома СК15 составит $42,46 - 5,39 = 37,07$ кг. Этим количеством кислорода окислится $37,07 \cdot 0,75 = 27,80$ кг углерода. Количество оставшегося неокисленным углерода получится равным $38,30 - 27,80 = 10,5$ кг или 1,05 %.

Определим тепловые эффекты окисления углерода, кремния и марганца, используя данные А.М.Бигева для температуры 1400°C [10]. Количество выделившегося тепла составит:

При окислении углерода до CO $27,86 \cdot 12,91 = 358,9$ МДж;

При окислении кремния $4,30 \cdot 26,65 = 114,60$ МДж;

При окислении марганца $1,7 \cdot 7,39 = 1256$ МДж.

Общий приход тепла от окисления этих примесей будет равен 486,06 МДж или 135,02 кВтч.

Помимо этого, расход энергии на нагрев чугуна и окатышей синтикома, необходимо затратить тепло на разложение Fe_2O_3 и FeO железорудных окатышей до железа. Для данного состава синтикома эти оксиды соответственно вносят 98,21 и 1,33 кг железа. Отсюда затраты тепла на эти цели составят

$$98,21 \cdot 7,15 + 1,33 \cdot 4,19 = 707,77 \text{ МДж,}$$

где 7,15 и 4190 МДж/кг — соответственно тепловые эффекты образования Fe_2O_3 и FeO на 1 кг железа при температуре 1400°C [10].

Общий расход тепла на нагрев компонентов синтикома — чугуна и окатышей и разложение оксидов железа получается равным

$$1076,5 - 175,4 + 707,77 = 1959,67 \text{ МДж или } 544,35 \text{ кВтч.}$$

Баланс прихода и расхода тепла для 1 т синтикома марки СК15 выглядит следующим образом:

$$486,06 - 1959,67 = -1473,61 \text{ МДж или } -409,336 \text{ кВтч.}$$

Следовательно, охлаждающая способность 1 т синтикома марки СК15 без учета тепла дожигания составляет 1473,61 МДж или 409,336 кВтч. Это значение меньше затрат энергии на расплавление 1 т металлолома, равные 410 – 430 кВтч/т [6]. При этом из 1 т синтикома указанной марки выход жидкого расплава получается равным

$$850 + 98,21 + 1,33 - (4,3 + 1,7 + 27,8) = 915,74 \text{ кг.}$$

Содержание углерода в образовавшемся из синтикома расплаве составляет 1,05 кг. Полученные значения не учитывают тепла дожигания CO до CO_2 и, следовательно, дают завышенную величину охлаждающей способности. Выше отмечалось, что окисление углерода в синтикоме происходит в период плавления, когда степень дожигания и степень использования этого тепла возрастают по сравнению с жидкими периодами плавки. Однако в данном случае ограничимся меньшими значениями и примем, что степень дожигания CO до CO_2 равна 50 %, степень полезного использования этого тепла также 50 %. Учитывая эти допущения, оценим вклад тепла дожигания в приход тепла.

От сжигания углерода синтикома до CO_2 выделится следующее количество тепла:

$$27,8 \cdot 36,22 = 1006,92 \text{ МДж,}$$

где 36,22 МДж/кг — тепловой эффект окисления углерода до CO_2 [10].

Тепло окисления углерода до СО равно:

$$27,8 \cdot 12,91 = 358,90 \text{ МДж.}$$

Отсюда приход энергии от дожигания СО до СО₂ составит:

$$1006,93 - 358,90 = 648,02 \text{ МДж.}$$

При степени дожигания 50 % и степени передачи этого тепла ванне 50 % суммарный КПД получается равным $0,5 \cdot 0,5 = 0,25$. Откуда от энергии дожигания в ванну поступит дополнительно следующее количество тепла:

$$648,02 \cdot 0,25 = 162,01 \text{ МДж или } 45 \text{ кВтч.}$$

Соответственно этому охлаждающий эффект 1 т синтикома марки СК15 уменьшится до значения $1473,6 - 162,01 = 1311,59 \text{ МДж}$ или $364,33 \text{ кВтч/т}$.

Однако это еще не все, поскольку не учтено наличие углерода в расплаве, образовавшемся из синтикома при его расплавлении. В нем содержится 1,05 % углерода или 10,5 кг углерода. При полном обезуглероживании расплава и окислении углерода до СО ванна получит дополнительное количество тепла, равное $12,91 \cdot 10,5 = 135,55 \text{ МДж}$ или $37,65 \text{ кВтч}$.

От реакции дожигания СО до СО₂ выделится $(36,22 - 12,91) \cdot 10,5 = 244,75 \text{ МДж}$ или $67,99 \text{ кВтч}$.

При степени дожигания 50 % и степени передачи этого тепла ванне также 50% общий КПД составит 0,25. С учетом этого ванна дополнительно получит

$$244,75 \cdot 0,25 = 61,19 \text{ МДж или } 17 \text{ кВтч.}$$

Откуда охлаждающий эффект 1 т синтикома будет равен

$$1311,59 - 135,55 - 61,19 = 1114,8 \text{ МДж}$$

$$\text{или } 309,68 \text{ кВтч/т синтикома.}$$

Таким образом, расход энергии на получение полностью обезуглероженного расплава из 1 т синтикома марки СК15 составляет $309,68 \text{ кВтч/т}$ композита. При этом масса образующегося из синтикома расплава железа будет равна

$$915,74 - 10,5 = 905,24 \text{ кг.}$$

Для нагрева этого количества металла с температуры 1380 до 1550°C потребуется дополнительно $0,22 \cdot 170 \cdot 905,24 / 1000 = 33,86 \text{ кВтч}$.

Отсюда, общие затраты на расплавление синтикома сопровождающее окислением углерода собственным кислородом оксидов железа и газообразным кислородом, и нагрев образующегося из него расплава до температуры 1550°C составят

$$309,68 + 33,86 = 343,54 \text{ кВтч/т синтикома.}$$

Таким образом, затраты энергии на расплавление 1 т синтикома марки СК15 с учетом окисления части углерода кислородом оксидов железа и кислородом газовой фазы получаются ниже, чем для металлолома, для которого удельный расход на плавление без использования кислорода и дополнительного топлива составят 410 – 430 кВтч/т лома [6]. В пересчете на 1 т полупродукта или первичного железа, получаемого из синтикома данного состава, затраты энергии будут равны: $343,54/0,90524 = 379,50$ кВтч/т металла.

Следует отметить, что представленный выше расчет не учитывает существенного повышения эффективности дожигания, обусловленные тем, что окисление углерода, выделение СО и его дожигание при использовании синтикома совмещено во времени и пространстве и происходит во время плавления в объеме шихты. В результате эффективность использования тепла дожигания существенно возрастает. Показатель степени дожигания при этом достигает 90 – 100 %, а коэффициент использования энергии дожигания 60 – 85 %. Благодаря этому результирующий показатель этого процесса, равный произведению указанных величин, составляет 0,5 – 0,78 вместо 0,25, принятого в данных расчетах.

Из приведенных результатов следует, что учитывая высокую газотворную способность синтикома по СО и выделение его в период плавления, когда печь заполнена холодной шихтой, при применении синтикома необходимо во время проплавления металлозавалки в печь подавать кислород для дожигания СО до CO_2 .

В ОАО “Ленгипромез” В.Н.Михайловским разработана методика оценки энергоемкости различных материалов [11]. На ее основе предложен способ оценки охлаждающей способности синтикома различных марок. Данный подход основан на использовании для расчетов энергоемкости этого материала охлаждающей способности чугуна и твердого окислителя, составляющих основу синтикома. Предложенная формула имеет простой вид:

$$W_{ck} = i_{\text{чуг}} \cdot 170 + i_{\text{то}} \cdot 420 \cdot \tau_{\text{то}},$$

где $i_{\text{чуг}}$ и $i_{\text{то}}$ – соответственно массовая доля твердого чугуна и твердого окислителя в синтикоме, т; 170 – расход электроэнергии на расплавление 1 т твердого чугуна, кВтч/т; 420 – расход электроэнергии на расплавление 1 т металлолома, кВтч/т; $\tau_{\text{то}}$ – коэффициент эквивалентности твердого окислителя по отношению к лому.

Величина $\tau_{\text{то}}$ обычно изменяется в пределах 3 – 4 и может быть определена по формуле А.М.Бигеева [11]:

$$\tau_{\text{то}} = 0,0434 (\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{то}} + 0,0342 (\text{FeO})_{\text{то}} - 0,633 \quad (5.2)$$

Для данного состава окатышей $\tau_{\text{то}}$ равно 3,37.

Результаты определения охлаждающей способности синтикома различного состава по формуле В.Н.Михайловского приведены ниже:

Марки синтикома	СК5	СК10	СК15	СК20	СК25	СК30
Охлаждающий эффект, кВтч/т	232,27	294,54	356,81	419,08	481,35	543,62

Отсюда следует, что охлаждающая способность синтикома в отличие от лома и твердого чугуна изменяется в широких пределах, являясь переменной величиной, зависящей от состава материала и его компонентов. Благодаря этому синтиком может использоваться взамен лома и твердого чугуна в электропечах в качестве охладителя конвертерной плавки. При определении расхода энергии на получение 1 т жидкой стали можно пользоваться упрощенной формулой, предложенной С.В.Рудневым:

$$W_{\text{ст}} = 6,4 \cdot i_{\text{то}} + 343,$$

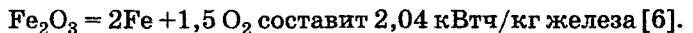
где $i_{\text{то}}$ — доля твердого окислителя в синтикоме, масс. %

По этой формуле, учитывающей все статьи расходов энергии, для выплавки 1 т стали из синтикома марки СК15 необходимо затратить в конечном счете 439 кВтч электроэнергии. Приведенный расчет с учетом нагрева металла с температуры 1380 до 1670°C дает несколько меньшее значение

$$\frac{309,65 + 0,22 \cdot 290 \cdot 905,24 / 1000}{0,90524} = \frac{309,65 + 57,75}{0,90524} = 405,9 \text{ кВтч/т.}$$

Однако этот расчет не учитывает дополнительного расхода энергии на нагрев шлака. При учете этого фактора расхождение данных снижается и его можно считать приемлемым.

Для проверки полученных результатов используем подход, основанный на том, что окисление примесей чугуна синтикома осуществляется газобразным кислородом, поступающим извне, а оксиды железа диссоциируют с получением железа. Для этого случая стандартное изменение энтальпии реакции



Расход энергии на расплавление твердого чугуна равен 170 кВтч/т чугуна или 0,17 кВтч/кг. Для 1 т синтикома СК15, состоящего из 850 кг чугуна и 150 кг окислителя, который содержит 98,21 кг железа, имеем:

$$W_{\text{ск}} = 850 \cdot 0,17 + 98,21 \cdot 2,04 = 144,50 + 200,35 = 344,85 \text{ кВтч/т.}$$

Полученное значение практически совпадает с результатами определения охлаждающей способности синтикома этой марки по формуле В.Н.Михайловского [11]. В случае, если оксиды железа в синтикоме представлены в виде $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$, то расход энергии на получение 1 кг из этой смеси путем их диссоциации равен 1,85 кВтч/кг железа [6].

5.5. Систематизация характеристик синтикама

Ниже сопоставлены плюсы и минусы синтикама с выделением его достоинств и недостатков. Для наглядности это сравнение представлено в виде колонок, параллельных друг другу.

Достоинства	Недостатки
1. Первородный характер, минимальное и стабильное содержание примесей цветных металлов.	1. Присутствие дополнительной "пустой" породы и кислорода, снижающих содержание железа по сравнению с той же массой лома и чугуна.
2. Возможность изменения термохимических свойств (охлаждающей способности) синтикама за счет варьирования доли наполнителя, обеспечивающая создание оптимальных условий для выплавки стали в конкретных агрегатах.	2. Необходимость строго соблюдения очередности заправки шихты в электродуговую печь и конвертер для полного использования потенциала синтикама
3. Одновременное присутствие углерода и кислорода в значительных количествах с развитой поверхностью контакта фаз. Высокая газотворная способность.	3. Необходимость правильного выбора состава и марки компонента для конкретного агрегата
4. Более быстрое расплавление по сравнению с ломом и раннее формирование активного вспененного шлака, способствующего дефосфорации, сходу шлака и закрытию дуг.	4. Меньшее исходное содержание железа по сравнению с ломом и чугуном при равной их массе.
5. Преимущественное окисление углерода в период плавления металлошихты.	5. Пониженная в сравнении с чугуном, конструктивная прочность чушек синтикама, увеличивающая возможность их разрушения при перегрузках и транспортировке при доле наполнителя более 15 %.
6. Высокая скорость обезуглероживания расплава после начала плавления, активное выделение CO, перемешивание и кипение ванны, а также восстановление железа из оксидов наполнителя за счет примесей металлической основы синтикама — чугуна или полупродукта.	
7. Меньшее окисление железа и возможность предохранения шихты от повышенного угара в печах с интенсивной подачей кислорода за счет раннего выделения CO. Повышение вследствие этого выхода железа.	

8. Пониженная в сравнении со стальным ломом, чугуном, кажущаяся плотность и повышенная газотворная способность, приводящая к подвсплыванию слитков синтика в металлическом расплаве. Предотвращение образования медленно плавящихся конгломератов в нижних слоя ванны.
9. Повышенная при доле наполнителя более 15 % охлаждающая способность синтика, способствующая снижению расхода охладителя в кислородных конвертерах.
10. Возможность хранения, транспортировки и загрузки материала аналогично чушковому чугуну или лому.
11. Возможность увеличения выпуска продукции производителем твердого чугуна при постоянных объемах производства жидкого чугуна и организации выпуска синтика вместо чушкового чугуна.
12. Возможность использования резервных мощностей доменного производства (избытка жидкого чугуна) для получения синтика, обеспечивающая определенную независимость от поставок покупного металлолома.
13. Стабилизация работы доменного и конвертерного производств на интегрированных заводах
14. Возможность переработки в сталеплавильных агрегатах железосодержащих отходов (шлам, сталеплавильные шлаки), вводимых в наполнитель синтика

Сопоставление достоинств и недостатков синтика свидетельствует, что этот материал является перспективной и конкурентоспособной шихтой по сравнению с железом прямого восстановления, твердым чугуном и ломом и может использоваться для выплавки стали с особо высокими требованиями к их чистоте, прежде всего, по содержанию примесей цветных металлов. Преимущества синтика обеспечивают достижение лучших технико-экономических показателей выплавки стали.

Выводы

1. Использование синтикома в электродуговых печах обеспечивает более полное использование вводимой электрической мощности по сравнению с металлоломом, твердым чугуном и железом прямого восстановления. Одним из важнейших факторов этого является более раннее формирование вспененного шлака, закрывающего дуги, а также лучшее использование тепла дожигания CO до CO_2 .

2. Охлаждающий эффект синтикома может варьироваться в весьма широких пределах за счет изменения состава синтикома и входящих в него компонентов. Благодаря этому синтиком может иметь охлаждающую способность как меньше, так и больше металлолома.

3. Это позволяет рекомендовать синтиком для широкого использования при выплавке чистых сталей в электропечах и кислородных конвертерах.

4. Синтиком с позиций энергоемкости может служить заменителем твердого чугуна, качественного лома, продуктов прямого получения железа, обеспечивая при этом требуемые энерготехнологические показатели выплавки стали.

5. При использовании синтикома следует учитывать то обстоятельство, что окисление углерода в нем, выделение CO , его дожигание, шлакообразование совмещаются с процессом расплавления металлопихты. Это открывает возможность существенного повышения эффективности дожигания CO до CO_2 и снижения за счет этого энергозатрат на выплавку стали.

Литература

1. Патент РФ № 2044061.
2. Патент РФ № 2049120.
3. Патент РФ № 2087546.
4. Патент США № 5,817,164.
5. Чумаков С.М., Югов П.И. *Металлургия*, 1998, № 9, с.38 – 39.
6. Морозов А.Н. Современное производство стали в дуговых печах. М.: *Металлургия*, 1987, 175 с.
7. Трахимович В.И., Шалимов А.Г. Использование железа прямого восстановления при выплавке стали. М.: *Металлургия*, 1982, 248 с.
8. Ойкс Г.Н., Иоффе Х.М. Производство стали (Расчеты). М.: *Металлургия*, 1969, 520 с.
9. Лопухов Г.А., Кацов Е.З. Производство стали в дуговых печах. Сб. "Производство чугуна и стали". Том 19 (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР). М., 1989, с. 3 – 88.
10. Бигеев А.М. Математическое описание сталеплавильных процессов. М.: *Металлургия*, 1982, 160 с.
11. Михайловский В.Н., Зазулин В.Ю., Рощаль А.В., Гущина Л.Б. Труды пятого конгресса сталеплавильщиков. М.: *Черметинформация*, 1999, с. 202 – 207.

Технология производства синтикома

Рассматривая синтиком с точки зрения физических особенностей его строения видно, что этот материал представляет собой механическую смесь железоуглеродистого расплава и твердых наполнителей.

В качестве наполнителя могут быть различные компоненты. Как правило, это оксиды Fe, представленные в виде руды, агломерата или окатышей, а также дополнительные углеродсодержащие или шлакообразующие добавки.

Вид основы, тип наполнителя и их соотношение определяют марку и назначение композиционного шихтового материала. Синтиком — это материал с заранее программируемыми свойствами, что существенно отличает этот материал от известных видов металлошихты таких как чугун, продукты ЖПВ, паспортная шихтовая заготовка, стальной лом. Исходя из этого, основной задачей при производстве данного материала является создание единой гетерогенной системы, в которой каждому из компонентов определено соответствующее назначение для более эффективного использования этих материалов в сталеплавильном производстве.

При разработке технологии производства данного материала ставились следующие задачи:

1. Первородность исходных компонентов.
2. Доступность исходных компонентов.
3. Компактность заготовки, технологичность в использовании, транспортировке и хранении.
4. Реализуемость данной технологии в условиях действующих металлургических производств.
5. Экономичность процесса.

В качестве основного технологического оборудования приняты разливочная машина конвейерного типа для производства товарного чушкового чугуна. Компактность заготовок определяется формой мульт разливочных машин, эксплуатируемых в доменных цехах.

Основным показателем, характеризующим производимую марку, является массовая доля твердого наполнителя — Д.

$$M_c = M_n + M_q, \quad (6.1)$$

$$Д = M_{\text{н}} / M_{\text{с}} \cdot 100 \%, \quad (6.2)$$

где $M_{\text{н}}$ — масса наполнителя, кг; $M_{\text{с}}$ — масса синтикома, кг; $M_{\text{ч}}$ — масса чугуна, кг.

Для каждой марки синтикома характерными показателями являются: расчетные химический состав и плотность.

Средний химический состав определяется по формуле:

$$A_{\text{с}} = A_{\text{ч}}(100 - Д) + A_{\text{н}} \cdot Д, \%, \quad (6.3)$$

где $A_{\text{с}}$, $A_{\text{ч}}$, $A_{\text{н}}$ — содержание определяемого элемента в синтикоме, чугуне и наполнителе соответственно, %; $Д$ — доля наполнителя в синтикоме, %.

Плотность синтикома также зависит от соотношения компонентов, их плотности и определяется по формуле 6.4.

$$\gamma = \frac{M_{\text{с}}}{V_{\text{с}}} = \frac{\gamma_{\text{р}} \cdot \gamma_{\text{н.к}}}{\gamma_{\text{н.к}}(100 - Д) + \gamma_{\text{ч}} \cdot Д}, \text{кг/м}^3, \quad (6.4)$$

где $\gamma_{\text{с}}$ — плотность синтикома, кг/м³; $M_{\text{с}}$ — масса синтикома, кг; $V_{\text{с}}$ — объем синтикома, м³; $\gamma_{\text{р}}$ — плотность чугуна, кг/м³; $\gamma_{\text{н.к}}$ — кажущаяся плотность наполнителя, кг/м³; $Д$ — доля наполнителя в синтикоме, %.

6.1. Исходные материалы

Основой синтикома является железоуглеродистый расплав, в качестве которого может быть использован переклюный чугун марок П1 или П2 ГОСТ 805, углеродистый полупродукт по ТУ 14-15-42-77, получаемый при дефанадации чугуна, а также и сам ванадиевый чугун по ТУ 14-13-103-80.

В качестве наполнителя могут быть использованы богатые железные руды, обожженные железорудные окатыши, рудоугольные окатыши, агломерат.

В условиях ОАО "Тулачермет" используется доменный переклюный чугун и железорудные окатыши Михайловского ГОКа.

В условиях ОАО "Северсталь" — переклюный доменный чугун и агломерат собственного производства.

В условиях ОАО "ЧМЗ" — полупродукт дефанадации чугуна и железорудные окатыши Качканарского ГОКа.

В табл. 6.1 представлены основные данные по используемым наполнителям при производстве синтикома.

Таблица 6.1

Основные данные по используемым наполнителям
при производстве синтикома

	Тип наполнителя			
	Михайловский ГОК	Лебединский ГОК	Качканарский ГОК	Агломерат ОАО "Северсталь"
Fe _{общ}	61,0	66,1	61,2	58,27
Fe ₂ O ₃	85,6	93,2	85,6	68,0
FeO	1,4	1,11	1,72	13,9
CaO	<20	1,06	1,14	8,07
SiO ₂	<9,4	7,48	5,68	5,36
t размягчения	1170 – 1250	1030 – 1150	1225 – 1385	1200 – 1250
t плавления	1380	Н.д.	1430	—
Плотность: γ, кг/дм ³				
насыпная	2,0 – 2,2	2,2 – 2,5	2,1 – 2,3	1,9 – 2,2
кажущаяся	3,25	3,9	3,24	3,17 – 3,23
истинная	4,4	4,5	4,85	4,4
Фракционный состав, мм	5 – 25	5 – 25	5 – 25	10 – 35

6.2. Способ производства

Способ производства синтикома заключается в создании единой заготовки из двух и более компонентов, основным из которых является железоуглеродистый расплав. Другим компонентом являются железорудные составляющие.

Весовое соотношение железоуглеродистой основы и наполнителя находится в пределах 2,3/1 – 9/1.

Композиционная заготовка, получаемая по данному способу, представляет собой многостержневую разнотолщинную отливку заданного размера и веса, соответственно технологию получения синтикома следует рассматривать как технологию литейного производства.

В данной технологии принят метод заливки твердого наполнителя в открытой форме перегретым расплавом с верхним подводом. Подача расплава осуществляется из чугуновозного наклоняемого ковша по каналу с открытым руслом и боковым сливом в непрерывнодвигающиеся металлические мульты.

Достоинством выбранной схемы являются не только простота, производительность и экономичность процесса, но и возможность использования с соответствующей доработкой действующих на металлургических заводах разливочных машин по производству твердого товарного чушкового чугуна. Преимуществом заливки сверху является и то, что процесс начала затвердевания начинается снизу слитка (со дна и стенок мульты), продвигая фронт кристаллизации через залитый напол-

нитель, и заканчивается на поверхности, образуя при этом достаточно жесткий каркас, обеспечивающий получение требуемой конструкционной прочности отливок [1].

Особенностью данной технологии является то, что наполнитель, имеющий более низкую плотность по отношению к расплаву, занимает до 50 % и более свободного объема формы, при этом характеристический размер фракции наполнителя находится в пределах: $\varnothing 12 \div 18$ мм. Вес одной фракции ~ 6 – 9 г. Количество фракций достигает 200 шт. и более.

С точки зрения литейной технологии наполнитель в данной системе нечто иное, чем стержень. В отличие от классического стержня этот элемент не закреплен и способен под действием энергии струи подаваемого расплава свободно перемещаться в объеме мульты, а учитывая его более низкую плотность по отношению к расплаву — всплывать на поверхность. Одновременно наполнитель, являясь “холодильником”, обладает развитой теплоаккумулирующей поверхностью, способствует ускоренному захлаживанию расплава и образованию на поверхности наполнителя твердой корочки, препятствующей проникновению расплава в порозность объема наполнителя.

Исходя из этого, при разработке технологии и оборудования для производства синтикома требовали решения вопросы механического и теплового взаимодействия элементов многокомпонентной системы.

Механические явления при заливке сверху определяются действием кинетической энергии падающей в мульты струи расплава и переходом остаточной энергии в работу, затрачиваемую на перемешивание расплава и наполнителя, а также всплытие наполнителя на поверхность расплава. Тепловые явления проявляются при теплообмене в результате контакта холодного наполнителя с перегретым расплавом. От взаимодействия этих явлений зависит процесс получения отливки и степень “консервации” наполнителя в отливке. Ниже рассмотрено влияние каждого из этих факторов.

6.3. Механическое воздействие

Энергия струи. В наибольшей степени механические явления проявляются под воздействием энергии струи расплава, падающего в мульты с наполнителем. Величина этой энергии определяется условиями подачи расплава.

В качестве системы подачи расплава в данной технологии принята открытая литниковая система, представляющая собой желоб трапециевидального сечения с боковыми отводами для слива расплава в мульты (рис.6.1). Расплав в желоб поступает через приемник из наклоняемых чугуновозных ковшей. Со сливных носков желоба расплав поступает в непрерывно перемещающиеся с равномерной скоростью мульты. Очевидно, что равномерное заполнение мульд расплавом возможно при условии

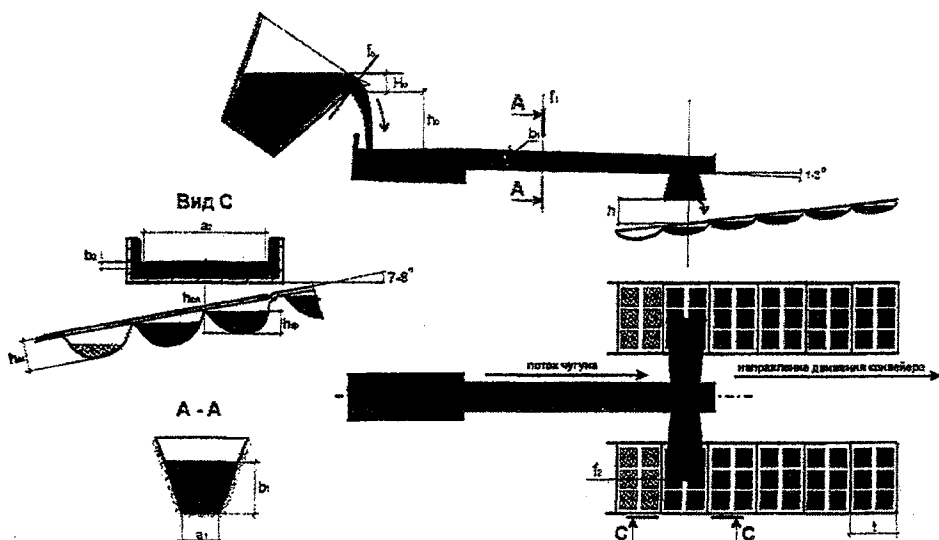


Рис. 6.1. Схема взаимодействия жидкого расплава с твердым наполнителем в процессе получения синтикома.

равенства подводимого по желобу и отводимого мультами массового расхода расплава, то есть для данной системы характерен принцип неразрывности движения и постоянства потока расплава [2, 3].

В целом систему подачи расплава в мульты разливочных машин можно рассматривать как напорную систему, в которой движение потока расплава происходит в установившемся режиме, при этом средняя скорость движения расплава $V_p = \text{const}$ на всем протяжении потока определяется величиной гидростатического напора. Но при истечении расплава из наклоняемого ковша (рис. 6.1).

$$Q_o = Q_k = f_o V_o = f_1 V_1 = f_2 V_2 = \sum f_i V_i = G_k / \gamma_p, \quad (6.5)$$

где Q_o, Q_k — объемный расход расплава, $\text{м}^3/\text{с}$; f_1, f_2, f_i — площадь поперечного сечения живого потока расплава, м^2 ; V_o, V_1, V_i — средняя скорость течения расплава в соответствующем сечении, $\text{м}/\text{с}$.

$$G_o = G_k, \quad (6.6)$$

где G — массовый расход расплава, $\text{кг}/\text{с}$.

Массовый расход расплава в различных сечениях расплава также является величиной постоянной и определяется:

$$G = Q \gamma_p = \text{const}, \quad (6.7)$$

$$G_o = V_o \cdot f_o \gamma'_p, \text{ кг/с}, \quad (6.8)$$

$$G_k = n \frac{W_k M_p}{t \cdot 60}, \text{ кг/с}, \quad (6.9)$$

где G_o — массовый расход расплава на желобе, кг/с; G_k — массовый отбор расплава мультдами на конвейере, кг/с; f_o — сечение живого потока расплава при истечении расплава со сливного носка ковша, м²; V_o — начальная скорость истечения расплава, м/с; γ'_p — удельная плотность расплава, кг/м³; W_k — скорость движения конвейера с мультдами, м/с; t — шаг мультд, м; n — количество одновременно заливаемых с желоба конвейеров.

Вследствие неразрывности движения и постоянства расхода расплава площадь сечения живого потока расплава также постоянна ($f = \text{const}$) в любом сечении рассматриваемой системы, за исключением сечений в боковых отводах. В данных сечениях, также следуя принципу неразрывности, сумма массового расхода и сумма сечений главного потока определяется:

$$\sum_{i=1}^n q_i = G_o = G_k, \quad (6.10)$$

$$q_i = \frac{G_o}{nk},$$

$$\sum_{i=1}^n f_i = f_o, \quad (6.11)$$

$f_i = \frac{f_o}{nk}$, где n — количество боковых отводов, k — коэффициент расхода расплава, $k = 0,4 - 1$.

Средняя линейная скорость течения расплава по желобу определяется

$$V_{ж} = V_o = \frac{G_o}{f_o \gamma_p} = \mu \sqrt{2gH_o}, \text{ м/с}, \quad (6.12)$$

где H_o — гидростатический напор ковша (высота уровня зеркала над нижней кромкой носка), м; μ — коэффициент расхода расплава со сливного носка ковша, $\mu = 0,3 - 0,6$.

Объемный расход:

$$Q_o = Q_k = f_o \cdot \mu \sqrt{2gH_o}, \text{ м}^3/\text{с},$$

и соответственно

$$f_0 = \frac{Q_0}{\mu \sqrt{2gH_0}}, \text{ м}^2 \quad (6.13)$$

или

$$f_0 = \frac{Q_0}{\gamma'_p \sqrt{2gH_0}}, \quad (6.14)$$

При сливе расплава со сливного носка желоба вся энергия струи преобразуется в кинетическую, которая оказывает воздействие на наполнитель и дно мульды. При ударе струи о наполнитель энергия струи частично гасится на неупругий удар, а оставшаяся часть энергии приводит в движение наполнитель [4]. Расплав и наполнитель образуют при этом единую систему. Руководствуясь законом сохранения энергии, оставшаяся часть энергии после удара переходит в работу на перемещение "системы" внутри мульды. Избыточная величина этой энергии может привести к выносу "системы" за пределы мульды.

Очевидно этого не произойдет, если величина оставшейся энергии будет меньше величины работы, необходимой для подъема "системы" за пределы мульды, то есть

$$E_{\text{ост}} \geq A_{\text{мин}}. \quad (6.15)$$

В данном случае, когда происходит соударение струи с неподвижным наполнителем

$$E_{\text{ост}} = E - E_{\text{пот}} = E \cdot \frac{P_p}{P + P_n}, \quad (6.16)$$

где E — кинетическая энергия падающей струи расплава; $E_{\text{пот}}$ — потери энергии на неупругий удар с наполнителем; P_p — вес падающего расплава, кг; P_n — вес наполнителя в мульде, кг; $E_{\text{ост}}$ — остаточная величина энергии; $A_{\text{мин}}$ — минимально необходимая работа на вынос "системы" из мульды.

Кинетическая энергия падающей струи расплава:

$$E = \frac{P_p \cdot V_{\text{сн}}^2}{2g}, \text{ кгм}, \quad (6.17)$$

где P_p — вес падающего расплава в мульды за время прохождения мульды под сливным носком, кг; $V_{\text{сн}}$ — скорость падения струи в мульду, м/с; g — ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

$$P_p = q_i \cdot \tau_3, \text{ кг}, \quad (6.18)$$

q_i — массовый расход расплава на сливном носке, кг/с.

$\tau_3 = \frac{t \cdot 60}{W_k}$, с, где t — шаг мульд, м; W_k — скорость конвейера, м/мин.

$$V_p = V_o + V_{cn} = \mu \sqrt{2g} (\sqrt{Ho} + \sqrt{h_{cn}}), \quad (6.19)$$

где V_o — скорость расплава на подходе (начальная скорость истечения расплава с разливочного ковша), м/с; V_{cn} — скорость свободного падения струи в мульду, м/с; h_{cn} — высота свободного падения струи; μ — коэффициент расхода при сливе расплава из наклоняемого ковша; $\mu = 0,52$ (принят в расчете).

Преобразуя выражение (6.17) получаем:

$$E_{ост} = \frac{\mu^2 (\sqrt{Ho} + \sqrt{h_{cn}})^2 \cdot P_p^2}{P_m + P_p} = \mu^2 (\sqrt{Ho} + \sqrt{h_{cn}})^2 \cdot P_m \cdot K, \quad (6.20)$$

где K — коэффициент потери энергии на неупругий удар падающей струи и наполнитель. Коэффициент потери энергии зависит от соотношения масс падающего расплава к массе “системы”, воспринимающей эту энергию.

$$K = \frac{P_p}{P_p + P_m} \quad (6.21)$$

определяет долю расплава в общей массе “системы” в форме.

Работа сил взаимодействия “системы” на перемещение наполнителя в мульде определяется выражением:

$$A_{min} = \varphi (P_p + P_m) \cdot h_\phi, \quad (6.22)$$

где h_ϕ — высота заливаемой формы, м; φ — коэффициент, учитывающий влияние сделанных допущений на силу трения и сопротивление среды наполнителя проникновению в него расплава,

$\varphi = 0,92 - 0,96$, принимаем $\varphi = 0,94$.

Ниже рассмотрено влияние каждого из этих факторов.

Условиями технологического процесса задано: синтиком СК15

$V_k = 13,2$ м/мин —	скорость движения конвейера,
$n = 2$ —	количество конвейеров,
$t = 0,6$ м —	шаг мульд,
$P_m = 7,6$ кг —	вес наполнителя в мульде,
$P_m = 42,6$ кг —	вес расплава в мульде,
$H_o = 0,07$ м —	высота гидравлического напора на носке наклоняемого ковша,
$h_\phi = 0,1$ м —	глубина формы (мульды),

$\mu = 0,52$ — коэффициент расхода расплава на сливе,
 Вариант I — заливка через 1 сливной носок,
 Вариант II — заливка через 2 сливных носка.

Высоты свободного падения со сливных носков: 0,1 м; 0,2 м и 0,4 м.

Исходя из условий неразрывности движения (выражения 6.5, 6.10, 6.11) массовый расход с носков составляет:

I вариант $G_o/2$; II вариант — $G_o/4$.

Таблица 6.2

Зависимость энергии и работы от высоты свободного падения
 и массового расхода расплава

Вариант	$h_{с.н.}$	Показатели										
		q_o	V_o	P_p	$V_{сп}$	V_p	$E_{кин}$	P_c	$K_{п}$	$E_{ост}$	A	Δ_A
I	0,1	31,2	0,65	42,6	0,74	1,34	3,9	50,2	0,85	3,3	4,7	+1,4
	0,2				1,03	1,63	5,8			4,9		-0,2
	0,4				1,45	2,05	9,12			7,8		-3,1
II	0,1	15,6	0,6	21,3	0,74	1,34	1,8	28,9	0,74	1,3	2,7	+1,4
	0,2				1,03	1,63	2,9			2,2		+0,5
	0,4				1,45	2,05	4,6			3,4		-0,7

Из выражения (6.20), приведенного расчета и графика (рис.6.2) следует, что определяющими факторами на величину энергии струи являются соотношение масс расплава и наполнителя и высота подачи расплава. Путем

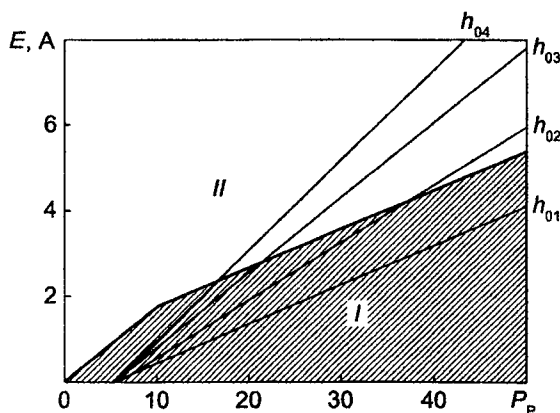


Рис. 6.2. Зависимость энергии и работы струи от высоты свободного падения: I — зона устойчивого взаимодействия энергии струи работы $E_{ост} < A$; II — зона неустойчивого взаимодействия $E_{ост} > A$.

Используя опыт литейного производства по заливке через несколько питателей, возможно при сохранении массового расхода расплава и производительности значительно снизить вредное воздействие струи расплава, организовав непрерывно последовательную заливку через последовательно расположенные по ходу заливки сливные носки, при этом массовый расход расплава на каждом носке будет обратно пропорционален количеству носков, а соответственно и величина энергии будет обратно пропорциональна их количеству. Одновременно это приведет и к снижению минимально необходимой работы на вынос “системы” из мульд. На рис.6.3 представлена схема подачи расплава.

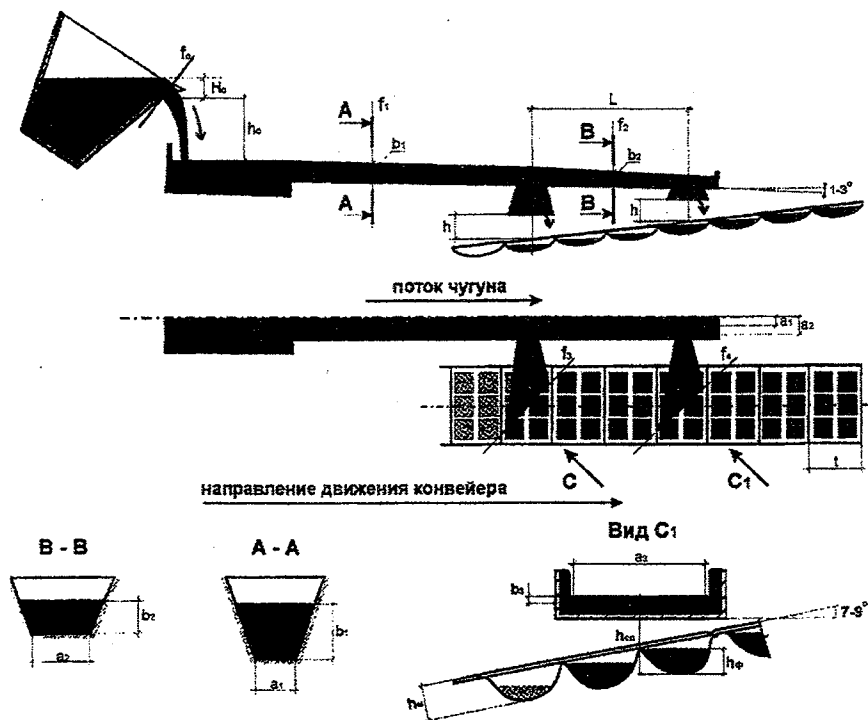


Рис. 6.3. Схема подачи расплава металла.

Условие подвода расплава. Следующим фактором, обеспечивающим получение композита заданного состава, является равномерность подачи расплава по ширине мульды. Принятый в производстве при разливке чугуна (рис.6.1) неприемлем, так как в этом случае сосредоточенная струя расплава, попадая в центральные секции, переполняет мульды, при этом энергия струи достаточна для выноса наполнителя и за пределы секций, а зачастую и мульд. При производстве синтикома следует говорить не только о величине энергии, но и об удельном давлении, создаваемом струей расплава на единицу контактной поверхности:

$$F = \frac{E_{кин}}{S}, \text{ кгм/м}^2,$$

где S — площадь контакта падающей струи с наполнителем, м^2 .

Непременным условием при подводе расплава должно быть одновременность подачи расплава во все секции мульд в поперечном сечении к направлению их движения. Это достигается путем разворота сливной кромки носка перпендикулярно или под углом до 60° к направлению движения мульд с распределением потока расплава на носке и сливных кромках носка на отдельные потоки в количестве, соответствующем количеству одновременно заливаемых секций в поперечном сечении мульд. Ширина отдельных потоков должна быть в пределах $0,6 - 0,9$ от ширины заливаемых секций и должна обеспечивать высоту сечения живого потока расплава не менее 5 мм , так как при большей ширине сливного потока высота потока расплава становится неравномерной, идет намораживание расплава и образование настывлей, расплав “гуляет” по носку, что приводит к неравномерности заливки секций мульд.

С точки зрения расположения кромки, наиболее предпочтительно поперечное расположение, так как это обеспечивает равномерную высоту слива над поперечным сечением мульд.

При косом расположении носков края носков будут разноудалены от плоскости мульд и высоты свободного падения струи расплава будут отличаться на величину Δh_{cn} (рис.6.3)

$$\Delta h_{cn} = a \cdot \operatorname{tg} \alpha, \text{ м},$$

где a — ширина кромки сливного носка в поперечном сечении, м ; α — угол наклона ленты конвейерной машины, $\alpha = 7 - 9^\circ$.

Практически Δh на типовых машинах составляет $\sim 80 \text{ мм}$, и при $h_{cn} = 0,1 \text{ м}$ min другой край будет иметь $h'_{cn} = 0,18 \text{ м}$.

Поведение наполнителя в расплаве. По мере заполнения мульд с наполнителем расплавом происходит заполнение порозности насыпного объема и при достижении определенной критической массы расплава наблюдается всплытие части наполнителя на поверхность (рис.6.4).

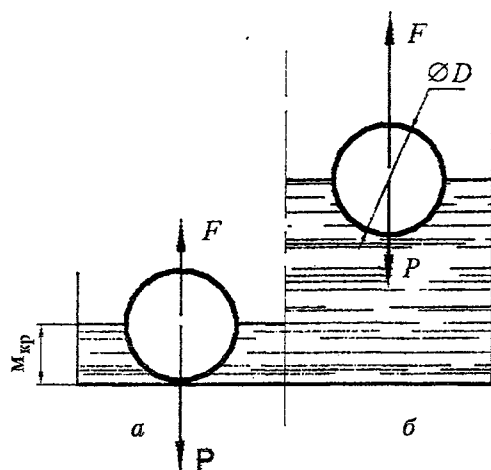


Рис. 6.4. Условия равновесия и всплытия окатышей.

До достижения $M_{кр}$ наполнитель лежит на дне мульты $P > F$ (рис. 6.4а).

При превышении расплавом $M_{кр}$ наполнитель всплывает на поверхность до уравнивания сил $P = F$ (рис. 6.4б).

P — сила тяжести, F — выталкивающая сила.

$$P = \gamma_o v_o g, \text{ кгм/с}^2, \quad (6.23)$$

$$F = \gamma'_p v_o^p g, \text{ кгм/с}^2. \quad (6.24)$$

Исходя из равенства сил

$$\frac{\gamma_o}{\gamma'_p} = \frac{v_o}{v_o^p}, \text{ откуда } v_{щ}^3 = v_o \cdot \frac{\gamma_o}{\gamma'_p}, \text{ м}^3, \quad (6.25)$$

v_o^p есть ни что иное, как v_p , вытесненное v_o^p или

$$M_{кр} = \frac{v_o \cdot \gamma_o}{\gamma'_p} \cdot \gamma'_p = M_o, \quad (6.26)$$

где v_o — объем наполнителя, м^3 ; v_o^p — объем наполнителя в расплаве, м^3 ; v_p — объем расплава, м^3 ; $M_{кр}$ — минимальная масса расплава, кг; M_o — масса наполнителя, кг; γ_o — плотность наполнителя, кг/м^3 , γ'_p — плотность жидкого расплава, кг/м^3 ; g — ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Таким образом, критическая, или $\min$ масса расплава, приводящая к всплытию, равна массе наполнителя.

6.4. Тепловые явления

Одновременно с происходящим процессом, поскольку мы имеем дело с реальным, высокотемпературным расплавом ($\sim 1280 - 1350^{\circ}\text{C}$), протекает процесс теплообмена между расплавом, наполнителем и мутьдой. По мере охлаждения расплава наблюдается образование корки твердого расплава на поверхности наполнителя и мутьды. Интенсивность процесса определяется температурой перегрева расплава и соотношением масс расплава и наполнителя. Путем регулирования массового расхода возможно достичь равенства подводимого и отводимого тепла. Это возможно при низком массовом расходе и рассредоточении наполнителя, по крайней мере, в один слой.

В условиях реального производства подобная технология не может быть реализована по следующим причинам:

1. При малом массовом расходе расплава происходит его застывание на желобе и сливных носках с образованием настывлей. Жидкотекучесть падает.

2. Переохлажденный на желобе расплав при малом массовом расходе обладает недостаточной энергией для перемешивания наполнителя, а также вследствие быстрой потери тепла и низкой жидкотекучести расплав не проходит в порозность наполнителя и на его поверхности (верхний слой) образуется твердая корка расплава.

3. Низкая производительность разлива нарушает цикл работы доменных печей.

Заметное увеличение массового расхода приводит к отрицательным воздействиям струи и несбалансированности скорости теплоотвода поступающего в мутьду тепла расплава. При разработке технологии производства многокомпозиционной отливки требовали решения следующие вопросы:

1. Установление предельно допустимой температуры расплава на заливку.

2. Определение минимально допустимого времени затвердевания отливки.

3. Установление оптимально-допустимого соотношения компонентов "расплав — наполнитель".

4. Установление массового расхода наполнителя.

Учитывая сложности описания рассматриваемой системы, в которой наполнитель обладает высокой теплоаккумулирующей поверхностью, превосходящей в несколько раз поверхность мутьды и к тому же по объему мутьды распределяется неравномерно, то при решении поставленных вопросов принят ряд допущений, качественно не сказывающихся на определении основных закономерностей:

- температура расплава, поступающая в мутьды неизменна (const);
- температура расплава в поперечном сечении формы вследствие перемешивания и высокой теплопроводности одинакова;

- тепло отводится в стенки формы и в наполнитель одновременно;
- в течение всего периода остывания расплава до температуры ликвидус температура на границе соприкосновения металла с формой и наполнителем постоянна и равна температуре ликвидус;
- охлаждение металла в форме и затвердевание отливки можно рассматривать последовательно и независимо друг от друга;
- наполнители рассматриваем как теплоаккумулирующую поверхность формы независимо от места его расположения в форме.

По признакам интенсивности охлаждения, отливка, получаемая в металлической, окрашенной изнутри форме, относится к отливкам с малой интенсивностью охлаждения, так как термическое сопротивление стенок форм и наполнителя значительно превосходит термическое сопротивление расплава. При этом температура поверхности отливки весьма мало отличается от температуры в центре отливки в период ее затвердевания. Это означает, что охлаждение отливки происходит практически одновременно и равномерно по всему объему, и затвердевание отливки начнется практически не раньше, чем жидкий расплав, залитый в форму, потеряет теплоту перегрева, а охлаждение затвердевшей части начнется только после полного затвердевания всего жидкого металла.

Расчет периода затвердевания выполнен двумя методами: аналитическим методом и численным (послойным) методом с разработкой программы расчета на ЭВМ.

6.4.1. Аналитический метод расчета кинетики затвердевания отливки

В работах Г.Ф.Баладина, А.И.Вейника, М.В.Пикунова и др. [4 – 6] подход к этому вопросу строится на выявлении интенсивности отвода тепла расплава стенками формы.

В теплофизике задача о распределении температуры в полупространстве, ограниченном одной плоскостью и имевшем первоначально одинаковую температуру t , и в котором температура на граничной плоскости стали мгновенно достигает $t_{\text{пов}}$, сводится к решению уравнения Фурье для нестационарной передачи в одном направлении [4]:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \frac{d^2t}{dx^2}, \quad (6.27)$$

$$\text{откуда} \quad t = t_0 + (t_{\text{пов}} - t_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(x \sqrt{2a\tau} \right) \right], \quad (6.28)$$

где x — расстояние от граничной плоскости; τ — время; $a = \lambda / (c \cdot \gamma)$ — температуропроводность материала полупространства; λ , c и γ — коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотности.

Дифференцируя по x выражение (6.28) при $x = 0$

$$(dx/dt)_{x=0} = -(t_{\text{пов}} - t_0) / \sqrt{a_{\text{ф}} \pi \tau}, \quad (6.29)$$

где $a_{\text{ф}}$ — температуропроводность материала формы.

$$dQ/d\tau = \lambda_{\text{ф}} (t_{\text{пов}} - t_0) / \sqrt{a_{\text{ф}} \pi \tau}, \quad (6.30)$$

отношение $\lambda_{\text{ф}} / \sqrt{a_{\text{ф}}}$ есть коэффициент теплопоглощающей способности формы, $B_{\text{ф}}$

$$B_{\text{ф}} = \sqrt{\lambda a_{\text{ф}}}. \quad (6.31)$$

Путем преобразования выражения (6.31) можно определить толщину образующейся при затвердевании расплава корочки:

$$\xi = \frac{2B_{\text{ф}} (t_{\text{кр}} - t_0)}{L\gamma_{\text{м.тв}} \sqrt{\pi}} \sqrt{\tau} \quad (6.32)$$

или $\xi = K \sqrt{\tau} \quad (6.33)$

где L — теплота кристаллизации.

Выражение (6.33) или закон квадратного корня описывает нарастание твердой корочки металла в литейной форме, залитой расплавом с минимальной температурой перегрева (в идеале — нулевой).

В данном выражении коэффициент K — коэффициент затвердевания формы.

$$K = 2B_{\text{ф}} \frac{t_{\text{кр}} - t_0}{L\gamma_{\text{м.тв}} \sqrt{\pi}}. \quad (6.34)$$

По данным Б.Б.Гуляева, $K_{\text{затв}}$, полученный экспериментально при заливке равен:

- в песчаную форму — 0,07 – 0,09 см/с^{0,5};
- в металлическую форму — 0,25 – 0,30 см/с^{0,5}.

С учетом перегрева расплава выражение (6.33) примет вид:

$$\xi = K \sqrt{\tau - ft_{\text{пор}}} \quad (6.35)$$

и соответственно время затвердевания определится:

$$\tau = \tau_2 - \tau_1,$$

где τ_1 — время снятия перегрева; τ_2 — общее время затвердевания с учетом перегрева.

Время затвердевания для отливок с малой интенсивностью может быть представлено выражением [7]:

$$\tau_2 = \frac{Mp \cdot L + C'_p(t_{\text{зал}} - t_{kp})}{B_\phi \cdot F_\phi(t_{kp} - t_\phi)} - \tau_1, \text{ ч.} \quad (6.36)$$

Однако это выражение не учитывает влияние развитой теплоаккумулирующей поверхности наполнителя. Чтобы оценить его влияние в работе сделано допущение, что наполнитель, также как и окраска стенок мульты, обладает термическим сопротивлением и воспринимает часть тепла расплава.

Термическое сопротивление стенки формы, а также и окатышей определяется:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{X}{\lambda},$$

где λ — теплопроводность, ккал/(м·ч), X — толщина слоя.

Соответственно для окатыша:

$$\beta_o = \frac{\lambda_{\text{ок}}}{X} = \frac{3\lambda_{\text{ок}}}{R_{\text{ок}}}, \quad (6.37)$$

где $X = R_{\text{пр.шара}} = 1/3R_o$ [4]

и для формы:

$$\beta_\phi = \frac{\lambda_{\text{кр}}}{X_{\text{кр}}}. \quad (6.38)$$

С учетом охлаждающей способности наполнителя выражение (6.36) можно представить:

$$\tau_2 = \frac{M_1 L_1 + M_1 C'_1(t_{\text{зал}} - t_{kp})}{\beta_o F_o(t_{kp} - t_o) + \beta_\phi B_\phi(t_{kp} - t_\phi)} - \tau, \text{ ч,} \quad (6.39)$$

$$\tau_1 = \frac{M_1 C'_1(t_{\text{зал}} - t_{kp})}{\beta_o F_o(t_{kp} - t_o) + \beta_\phi \cdot F_\phi(t_{kp} - t_\phi)}, \text{ ч,} \quad (6.40)$$

где M_1 — масса расплава в форме, кг; L_1 — тепло кристаллизации расплава, ккал/кг; C_1 — теплоемкость расплава, ккал/(кг·°C); β_o, β_ϕ — коэффициенты теплоотдачи наполнителя и формы соответственно, ккал/(м²·ч·°C); F_o, F_ϕ — теплоохлаждающая поверхность наполнителя и формы, соответственно, м²; $t_{\text{зал}}$ — температура заливаемого расплава, °C; t_o — температура наполнителя,

$^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ф}}$ — температура поверхности формы, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{кр}}$ — температура кристаллизации расплава, $^{\circ}\text{C}$.

Для чугуна ($\text{C} \sim 4,3 - 4,5 \%$, $\text{Si} \leq 1,2 \%$), $t_{\text{кр}} = 1150^{\circ}\text{C}$. По данным [7] интервал кристаллизации составляет $0,05 - 0,08 t_{\text{кр}}$. Соответственно температурный интервал кристаллизации $t_{\text{кр}} = 1150 - 1230^{\circ}\text{C}$.

В реальных условиях установлено, что для передельного чугуна интервал кристаллизации достаточно близок к $t_{\text{кр}} \sim 1210 - 1230^{\circ}\text{C}$, а для полупродукта ОАО "Чусовской металлургический завод" этот интервал ниже и составляет $t_{\text{кр}} = 1150 - 1180^{\circ}\text{C}$.

Из выражения (6.39) следует, что чем ниже температура перегрева расплава ($t_{\text{зал}} \rightarrow t_{\text{кр}}$), тем быстрее идет процесс затвердевания отливки. Однако применительно к условиям производства синтикома это недопустимо, так как при температуре перегрева $\rightarrow 0$ резко падает жидкотекучесть расплава, а именно жидкотекучесть расплава обеспечивает заполнение порозности насыпного объема наполнителя и чем выше его доля, тем более развита его охлаждающая поверхность, соответственно тем выше должна быть жидкотекучесть расплава. Очевидно, что для расплава одного химического состава величина жидкотекучести зависит от температуры перегрева — $t_{\text{пер}}$. Следовательно, на разливку расплав должен подаваться с температурой перегрева, обеспечивающей удовлетворительное истечение расплава с носка и заполнение порозности наполнителя во время заливки. Экспериментально установлено, что в зависимости от вида расплава температура перегрева находится в пределах:

— для передельного чугуна $t_{\text{зал}} = 1280 - 1320^{\circ}\text{C}$

$t_{\text{пер}} = 130 - 170^{\circ}\text{C}$

— для полупродукта ОАО "ЧМЗ" ($\text{C} = 2,8 - 3,9 \%$, Si — следы)

$t_{\text{зал}} = 1210 - 1300^{\circ}\text{C}$,

$t_{\text{пер}} = 60 - 150^{\circ}\text{C}$.

Пример:

Рассмотрим время затвердевания расплава в мультде с наполнителем при различном соотношении масс расплава и наполнителя.

Из выражения (6.26) следует, что min масса расплава, приводящая к всплытию, должна быть не менее массы окатышей.

Известно, что порозность наполнителя определяется:

$$\eta = \left(1 - \frac{\gamma_{\text{он}}}{\gamma_{\text{ок}}} \right), \quad (6.41)$$

где $\gamma_{\text{он}}$ — насыпная плотность, $\text{кг}/\text{дм}^3$; $\gamma_{\text{ок}}$ — кажущаяся плотность, $\text{кг}/\text{дм}^3$.

Соответственно, для заливки только порозности наполнителя необходимо:

$$M_{\text{пор}} = \left[v_o \left(1 - \frac{\gamma_{\text{он}}}{\gamma_{\text{ок}}} \right) \right] \gamma'_p, \text{ кг}$$

или

$$M_{\text{пор}} = M_{\text{ок}} \left(\frac{\gamma_{\text{ок}} - \gamma_{\text{он}}}{\gamma_{\text{ок}} \gamma_{\text{он}}} \right) \cdot \gamma'_p, \text{ кг} \quad (6.42)$$

и при известных $\gamma_{\text{он}} = 2,2 \text{ кг/дм}^3$, $\gamma_{\text{ок}} = 3,5 \text{ кг/дм}^3$, $\gamma'_p = 6,8 \text{ кг/дм}^3$, $M_{\text{пор}} = 1,14 \text{ Мо}$, кг.

В синтикоме при известной доле наполнителя масса расплава должна составить

$$M_p = M_o \cdot \frac{100 - Д}{Д}, \quad (6.43)$$

где $Д$ — массовая доля наполнителя, при $Д = 15\%$ и $M_o = 1,3 \text{ кг}$ $M_p = 7,1 \text{ кг}$.

В данном случае $M_{\text{пор}} = 1,5 \text{ кг}$ и составляет $\sim 21\%$ M_p , что явно недостаточно для обеспечения конструкционной прочности отливки. К тому же при данной массе чугуна энергии струи недостаточно для перемешивания расплава с наполнителем, а низкий массовый расход способствует быстрому снятию перегрева и затвердеванию расплава уже на сливных носках.

Наиболее оптимально, что подтверждено и экспериментально, доля чугуна, подаваемого на 1-ом этапе должна находиться в пределах $0,4 - 0,6$ к общей массе или составлять $1,5 - 3,0$ к массе наполнителя.

В расчете приняты 2 варианта.

I вариант: Заливка осуществляется в один прием.

II вариант: Заливка осуществляется в 2 приема через последовательно расположенные по ходу движения мульд сливные носки с равномерным распределением расплава по сливным носкам.

Исходные данные:

Марка синтикома — СК15.

В качестве наполнителя — железорудные обожженные окатыши Михайловского ГОКа.

Окатыши загружаются в мулды в требуемом количестве до заливки.

Мульда 6 секционная (3×2).

Объем — $1,4 \times 6 = 8,4 \text{ дм}^3$

$E_{\phi} = 0,41 \text{ м}^2$ — площадь поверхности мулды, омываемая расплавом во время заливки.

Шаг мульд $t = 0,6 \text{ м}$.

Покрытие мульд — известковый раствор толщиной $1,5 \text{ мм}$.

$M_p = m_p \cdot 6 = 7,1 \cdot 6 = 42,6 \text{ кг}$ — масса расплава в мульде.

$M_o = m_o \cdot 6 = 1,3 \cdot 6 = 7,8 \text{ кг}$ — масса окатышей в мульде.

При среднем диаметре окатыша 14 мм и весе 5 г в мульды поступает 1560 окатышей (260×6) и при средней площади поверхности 1 окатыша $0,62 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ суммарная площадь поверхности окатышей составит:

$$F_o = 0,967 \text{ м}^2.$$

$W_k = 13,2 \text{ м/мин}$ — скорость движения мульд на конвейере.

$$\tau_{\text{зап. мульд}} = \frac{t \cdot 60}{W} = 2,73 \text{ с.}$$

Расход наполнителя при загрузке в мульду:

$$G_o = \frac{M_o W_k}{t \cdot 60} = 2,86 \text{ кг/с.}$$

Массовая скорость заливки при известной массе наполнителя в мульде и доле наполнителя составит:

$$G_p = K \left[\frac{W_k}{t \cdot 60} \cdot M_o \left(\frac{100 - D}{D} \% \right) \right], \text{ кг/с,} \quad (6.44)$$

где K — коэффициент расхода расплава.

При одинарной заливке $K = 1$;

При заливке в 2 приема $K = 0,4 - 0,6$.

M_o — масса окатышей в мульде; D — доля наполнителя в синтикоме, % (задается производимой маркой синтикома); $t_{\text{зал}} - 1320^\circ\text{C}$ — температура расплава на заливке; $t_o - 20^\circ\text{C}$ — температура наполнителя; $t_\phi - 120^\circ\text{C}$ — температура стенок формы.

В табл. 6.3 представлены теплофизические свойства материалов.

Таблица 6.3

Теплофизические свойства материалов (средние значения) [8]

Параметры	Чугун		Окатыши	Покрытие
	Жидкий $\rightarrow t_{\text{кр}}$	твердый $\leftarrow t_{\text{кр}}$	Мих.ГОКа	формы
$t_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$		1150	1380	2500
$t_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$	1150-1230	—	—	—
$\gamma, \text{кг/м}^3$	6800	7000	3400	1504
$\lambda, \text{ккал}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	14,4	36	1,09	0,41*
$C, \text{ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	0,18	0,18	0,15	0,13
$L, \text{ккал/кг}$	59,7			
$a, \text{м}^2/\text{ч}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	38	0,0017	0,002
$v_\phi, \text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}^{0,5})$	—	148	23,7	9
$\beta, \text{ккал}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	—		467	273

* влажность 3,4 %.

Вариант I. Масса окатышей $M_o = 1,3$ кг (в секции). Масса расплава $M_p = 1,1$ кг (в секции).

Определяя время снятия перегрева τ_1 и время затвердевания τ_2 из выражений (6.39) и (6.40) получаем

$$\tau_1 \sim 4 \text{ с}, \tau_2 \sim 18 \text{ с}.$$

При скорости $W_k = 13,2$ м время снятия перегрева произойдет на расстоянии $L_1 = 0,9$ м, а затвердевание на расстоянии $L_2 = 4,2$ м от сливного носка.

При этом распределение окатышей в форме будет выглядеть таким образом (см. рис. 6.5).

Исходя из выражений (6.39) и (6.40) τ_1 и τ_2 равны:

$$\tau_1 = 2 \text{ с}, \tau_2 = 9 \text{ с}.$$

Как видно, время снятия перегрева сопряжено со временем заливки, а затвердевание расплава произойдет на расстоянии $L_2 \approx 2,1$ м.

Из варианта II следует, что практически во время заливки мульды происходит снятие перегрева и начинается кристаллизация расплава с образованием корочки расплава.

Если принять во внимание, что перемешивание расплава энергией струи продолжается и после заливки порядка 3 с, то можно определить толщину корочки и вес твердого расплава

$$X_i = K\sqrt{\tau_i}, \text{ мм}.$$

По данным Б.Б.Гуляева, полученным экспериментальным путем, величина K определяется теплоотдачей формы, и для чугунных мульд $K_\phi = 0,25 - 0,3 \text{ см/с}^{0,5}$.

Для железорудных окатышей принимаем $K_o = 0,38 \text{ см/с}^{0,5}$.

Таким образом на 3-й секунде толщина корочки составит:

$$X_\phi = 0,25\sqrt{3,73} = 0,48 \text{ см},$$

$$X_o = 0,38\sqrt{3,73} = 0,73 \text{ см}.$$

С образованием корочки доля затвердевающего расплава составит $\approx 45\%$, что практически полностью заполняет порозность наполнителя и создает внутренний металлический каркас (см. рис. 6.6).

Всплывшие окатыши после первой заливки расположены по поверхности зеркала в один слой и погружены в расплав. Последующая заливка после затвердевания 1-й порции позволит полностью сохранить окатыши в отливке. В табл. 6.4 представлено заполнение секций мульд расплавом в зависимости от соотношения расплав-наполнитель.

Таблица 6.4

Заполнение секций мульд на 1-ом наливе в зависимости от соотношения масс расплава и наполнителя

Марка СК	Характеристика синтикама			Масса 1-ой порции расплава			% заполне- ния мульд $V_{СК},$ %	Высота заполнения секций мульд, мм		Распределение окатышей в секции мульд	
	$P_{ок},$ кг	$P_{м},$ кг	$P_{СК},$ кг	$P_{ч}/P_{о},$ кг	$P_{ч},$ кг	$P_{ч},$ %		Поверх- ности	Металл (низ)	количество слоев, шт.	на поверх- ности
СК15	1,3	7,1	8,4	1,5	1,9	26	33	50	20	1,3	76
				2	2,5	36	40	52	30	1,2	76
				2,5	3,2	45	45	56	38	1,1	76
СК20	1,6	6,4	8	1,5	2,4	37	42	53	25	1,3	97
				2	3,2	50	51	63	30	1,2	97
				4	63	60	65	42	1,05	97	
СК25	1,94	5,8	7,74	1,5	2,91	50	50	62	28	1,4	117
				2	3,9	67	60	67	40	1,3	117
				2,5	4,85	84	70	71	50	1,2	117

Примечание: плотность жидкого металла — $6,8 \text{ кг/м}^3$, насыпная плотность окатышей — $2,2 \text{ кг/м}^3$, кажущаяся плотность окатышей — $3,4 \text{ кг/м}^3$, объем секции — $1,4 \text{ дм}^3$.

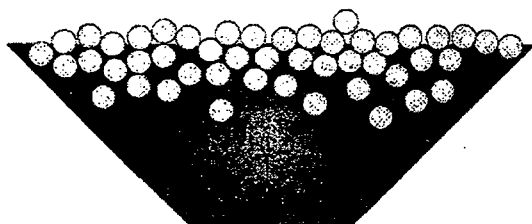


Рис. 6.5. Распределение окатышей в слитке синтикома при заливке в один прием.

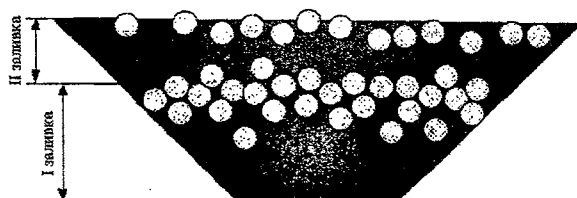


Рис. 6.6. Распределение окатышей в слитке синтикома при заливке в два приема.

6.4.2. Численный метод расчета кинетики затвердевания расплава

В ходе настоящей работы разработана математическая модель оценки скорости затвердевания расплава, основанная на послойном принципе передачи тепла от расплава наполнителю и стенкам мульты.

Основные принципы построения математической модели

1. Основными источниками (потребителями) тепла являются жидкий чугун, окатыши и мульты.

2. Окатыши и мульты представлены как многослойные тела.

3. Температурный перепад в заливаемом чугуне отсутствует. Тепловое сопротивление чугуна сосредоточено в слое, непосредственно прилегающем к окатышу или мульты.

5. В начальный момент времени заливаемый чугун уже находится в мульты.

6. Система чугун-окатыши-мульты — замкнута. Теплообмен с окружающей средой отсутствует.

7. Все окатыши эквивалентны друг другу.

Для любого тела процесс переноса тепла теплопроводностью всецело зависит от распределения температуры. Для процесса теплопроводности температура является основной физической величиной и, соответственно, для решения задачи теплопередачи необходимо решить задачу распределения температур в пространстве и во времени, то есть найти функцию:

$$t = f(x, y, z, \tau),$$

где t — температура; x, y, z — координаты рассматриваемой точки; τ — время.

В общем случае эта зависимость не может быть найдена аналитическим путем. Упростим задачу. В телах простейшей формы, таких как шар, бесконечно длинный цилиндр, полубесконечная плоскость, температурное поле изменяется только в зависимости от одной координаты. Для них уравнение примет более простой вид:

$$t = \psi(X, \tau).$$

По закону Фурье удельный тепловой поток равен:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx},$$

где q — удельный тепловой поток, отнесенный к единице площади и единице времени; λ — коэффициент теплопроводности.

Для вывода дифференциального уравнения температурного поля выделим в теле элементарный параллелепипед, имеющий стороны dx, dy, dz (рис. 6.7).

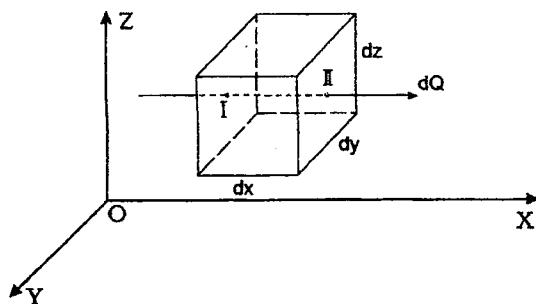


Рис. 6.7. К выводу дифференциального уравнения теплопроводности.

Так как температурное поле одномерно, тепловой поток изменяется только вдоль оси OX :

$$dq = \frac{\partial q}{\partial x} \cdot dx.$$

Умножив удельное значение на площадь грани и время dt , получим изменение величины теплового потока:

$$dQ = \frac{\partial q}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau.$$

Учитывая, что $dx \cdot dy \cdot dz = dV$:

$$dQ = \frac{\partial q}{\partial x} \cdot dV \cdot d\tau.$$

Разность входящих и выходящих из параллелепипеда тепловых потоков идет на изменение внутренней энергии этого параллелепипеда. В свою очередь внутренняя энергия является функцией температуры:

$$dU = -dV \cdot \gamma \cdot c \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau,$$

где γ — удельная плотность вещества; c — удельная теплоемкость; $\frac{\partial q}{\partial \tau} d\tau$ — приращение температуры.

Приравнявая эти два уравнения получим дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$-\gamma \cdot c \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial q}{\partial x}.$$

Учитывая, что $q = -\lambda \frac{dt}{dx}$:

$$\gamma \cdot c \cdot \frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial(\lambda \cdot t)}{\partial x^2}.$$

Дальнейшее решение этого дифференциального уравнения возможно только для случаев, когда коэффициенты γ , c , λ постоянны, то есть не зависят от температуры и координаты. Обычно эти коэффициенты можно принять константами, так как они в зависимости от температуры изменяются незначительно и использование таких “эффективных” значений не вносит существенных ошибок.

Для нашего случая, когда в теплообмене участвуют окатыши, применение “эффективных” значений может дать значительную погрешность, так как теплопроводность окатышей меняется от 0,814 до 1,728 Вт/(м·К), а теплоемкость от 0,66 до 2 кДж/(кг·К) при изменении температуры от 0 до 1300°С.

Рассмотрим передачу тепла внутри пары слоев (рис. 6.8).

В соответствии с законом Фурье для стационарного теплового потока тепло, переданное первым слоем второму за время τ_0 , равно:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{x} \cdot \lambda(t) \cdot F \cdot \tau_0,$$

где T_1 и T_2 — температура I и II слоя соответственно; $\lambda(t)$ — текущая теплопроводность I слоя; F — площадь поверхности раздела слоев.

При этом первый слой охладился на

$$\Delta\tau_1 = \frac{Q}{V_1 \cdot c_1(t) \cdot \gamma_1},$$

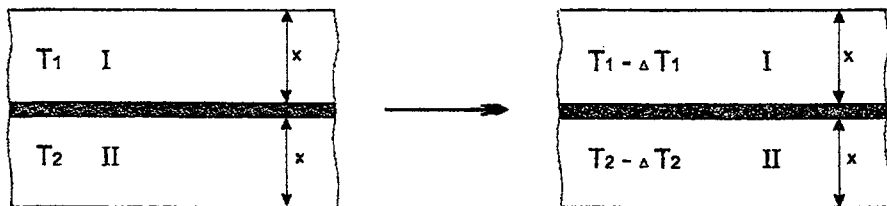


Рис. 6.8. К определению времени снятия перегрева и затвердевании расплава.

где V_1 — объем I слоя; $c_1(t)$ — текущая теплоемкость I слоя; γ_1 — плотность I слоя, а второй нагреется на

$$\Delta\tau_2 = \frac{Q}{V_2 \cdot c_2(t) \cdot \gamma_2}.$$

Если временной интервал τ_0 достаточно мал, то $T_1 - T_2 \gg \Delta T_1 + \Delta T_2$ и применение закона Фурье для этого случая достаточно корректно, так как $(T_1 - T_2)$ за время τ_0 изменится незначительно.

Рассчитав теплоту, переданную через все границы слоев за время τ_0 , можно найти новое распределение температур в окатышах и мульде.

Внешние слои окатышей и мульды получают (отдают) тепло от залитого чугуна, соответственно, охлаждая (нагревая) его, то есть можно найти и новую температуру чугуна.

Многократно повторяя эти вычисления, можно рассчитать температурные поля в окатышах и мульде и поглощенное (отданное) ими тепло в любой момент времени.

Исходя из существующей на настоящий момент времени технологии необходимо, чтобы первая порция чугуна, залитая на окатыши, кристаллизовалась до подачи второй порции, и, кроме того, вторая порция чугуна не должна растопить первую. Следовательно, время, которое необходимо иметь между двумя подачами чугуна, должно быть достаточно для переохлаждения первой порции до температуры, которая обеспечит ее нерасплавление.

Блок-схема алгоритма расчета времени, необходимого для кристаллизации первой порции чугуна, при производстве синтикома представлена на рис.6.9.

В табл.6.5 представлены результаты численного метода расчета затвердевания отливок в зависимости от марки синтикома и соотношение масс наполнителя и расплава на 1-й заливке.

Как видно из табл.6.5 расчет, выполненный на ЭВМ, имеет достаточно точное схождение с результатами аналитического метода анализа по оценке скорости затвердевания и достаточно близкое значение с экспериментальными данными на производстве и подтверждена опытом работы на предприятиях ОАО "Северсталь", ОАО "ЧМЗ", ОАО "Тулачермет".

Полеченные решения защищены патентами [9 – 24].

Резюмируя выполненные анализы и расчеты можно сделать вывод, что процесс производства отливки синтикома необходимо осуществлять двустадийной подачей расплава на наполнитель. Основополагающими факторами, определяющими качество отливки, являются совместное действие энергии струи падающего расплава и соотношение масс расплава и наполнителя в получаемой системе на первой стадии процесса заливки.

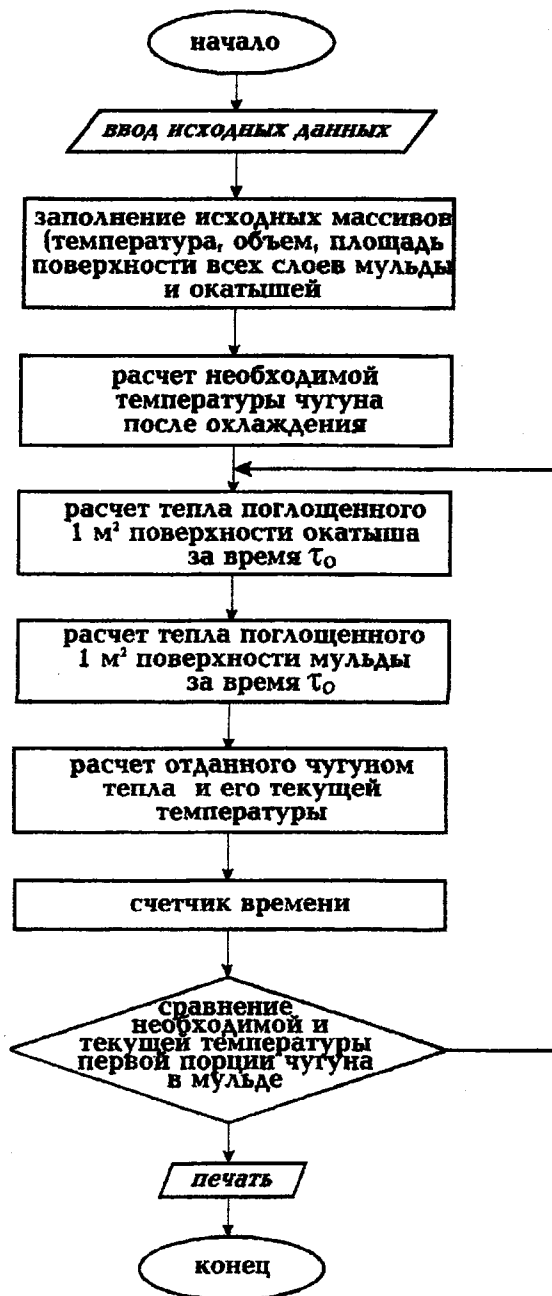


Рис. 6.9. Блок-схема алгоритма математической модели охлаждения чугуна.

Таблица 6.5

Время снятия перегрева и кристаллизации расплава в зависимости от соотношения масс расплава и наполнителя

Марка СК	Характеристика синтикома			Масса 1-й порции расплава			Охлаждение и кристаллизация расплава при температуре 1320 град					Охлаждение и кристаллизация расплава при температуре 1400 град				
	$P_{ок}'$ кг	$P_{м}'$ кг	$P_{СК}'$ кг	$\frac{P_{ч}}{P_{ок}}$	$P_{ч}'$ кг	$\frac{P_{ч}}{P_{ч}'}$ %	Начало кристаллизации, с	6 с	8 с	10 с	конец кристаллизации, с	Начало кристаллизации, с	6 с	8 с	10 с	конец кристаллизации, с
СК15	1,3	7,1	8,4	1,5	1,9	26	0,8	100	100	100	4,9	1,4	96,2	100	100	6,3
				2	2,5	36	1,1	85,6	100	100	7,2	2,1	62	86,6	100	9,2
				2,5	3,2	45	1,6	62,3	83,4	100	9,8	2,9	39,1	59,9	78,6	12,6
СК20	1,6	6,4	8	1,5	2,4	37	0,8	100	100	100	5,3	1,5	87,7	100	100	6,9
				2	3,2	50	1,3	77,6	100	100	8,0	2,3	54	76,9	97,2	10,3
				2,5	4	63	1,7	56,5	76,2	93,7	10,8	3,2	33,3	52,7	70,1	14
СК25	1,94	5,8	7,74	1,5	2,91	50	0,8	100	100	100	5,6	1,6	82,8	100	100	7,3
				2	3,9	67	1,3	73,7	95,3	100	8,5	2,4	49,8	71,6	90,9	11,1
				2,5	4,85	84	1,8	53,9	72,9	89,7	11,4	3,3	30,7	49,4	66,1	>14

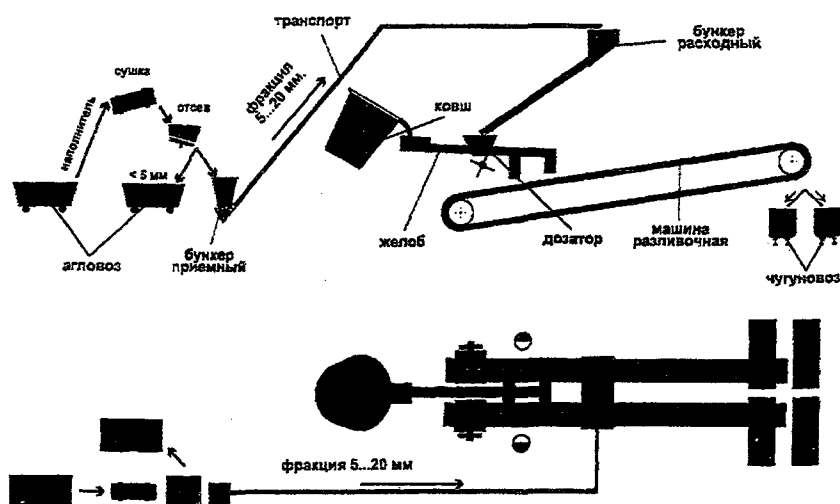


Рис. 6.10. Принципиальная технологическая схема производства ситнтикома.

Для производства ситнтикома на заводах-производителях рекомендована следующая технологическая схема (рис.6.10).

Основные технологические операции:

1. Подготовка наполнителя (сушка, фракционный отсев +5 – 25 мм).
2. Подача наполнителя в мульды разливочных машин (количество определяется маркой производимого продукта).
3. Заливка наполнителя расплавом с температурой перегрева не менее 60°С в количестве 40 – 60 % от общей массы расплава.
4. Охлаждение до затвердевания не менее 60 % поданного расплава (не менее 6 с).
5. Окончательная заливка мульд расплавом со 2-го сливного носка до полного наполнения мульд расплавом.

Оптимальная температура заливки — 1280 – 1320°С. При более высокой температуре желательно введение предварительной выдержки ковшей с расплавом или увеличение расстояния между сливными носками.

Данная технология защищена патентом РФ [23] и реализована в опытно-промышленных масштабах на 3-х заводах:

- ОАО “Тулачермет”, г.Тула — 1997 г.;
- ОАО “Северсталь” — 1998 г.;
- ОАО “Чусовской металлургический завод” — 2000 г.

6.5. Технология и оборудование

В рамках данной работы разработана технологическая программа учета расходуемых материалов и оценки производительности разливочных машин. Результаты расчета технологической части представлены в табл.6.6 – 6.13.

Таблица 6.6

Задаваемые параметры производства синтикома марки СК15

№	Наименование параметра	Обозначения	Единица измерения	Показатель
I Объем производства				
1	Производственная мощность по выпуску жидкого чугуна	Аж	Т	2500000
5	Годовое производство твердого чугуна	Ач	Т	2000000
6	Годовое производства синтикома*	Ас	Т	350000
7	Марка синтикома	СК	%	15
8	Допустимые отклонения в партии синтикома по наполнителю		%	2,5
II Характеристики оборудования				
9	Количество разливочных машин	К	шт	1
10	Количество конвейеров на РМ	к	шт	2
11	Скорость движения конвейера РМ (чугун)	W _{кч}	м/мин	13,2
12	Скорость движения конвейера РМ (синтиком)	W _{кс}	м/мин	13,2
13	Масса разливаемого чугуна (слив или ковш)	Мчк	Т	60
14	Объем мульды	Vс	Дм ³	8,4
15	Количество секций (чушек) в мульдe	n	шт	6
16	Шаг мульд	t	М	0,6
17	Время между первым и вторым наливом	t _{кр}	С	6
18	Подготовительно-заключительное время (чугун)	t _{пзч}	мин	25
19	Подготовительно-заключительное время (синтиком)	t _{пзс}	мин	30
20	Неизбежные технологические потери чугуна	Вч	%	2
21	Неизбежные технологические потери наполнителя	Вн	:	3
22	Коэффициент загрузки РМ, не более			0,85
23	Годовой фонд времени работы РМ	Fo	Дней	350

Примечание: * объем жидкого чугуна на производство синтикома составит 303571 т/год

Таблица 6.7

Химический состав исходных материалов и синтикома марки СК15

№	Химический элемент или соединение	Исходные материалы		Расчетный состав синтикома		
		Чугун	Окатыши МГОК	Среднее	Минимум	Максимум
1	Fe _{общ}	94,280	61,833	89,413	88,602	90,224
2	Fe _{втн}	94,280	0,000	80,138	77,781	82,495
3	Fe ₂ O ₃	0,000	85,000	12,750	10,625	14,875
4	FeO	0,000	3,000	0,450	0,375	0,525
5	C	4,500	0,000	3,825	3,713	3,938
6	Si	0,800	0,000	0,680	0,660	0,700
7	Mn	0,100	0,000	0,085	0,083	0,088
8	S	0,030	0,010	0,027	0,028	0,027
9	P	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
10	Cu	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	Cr	0,050	0,000	0,043	0,041	0,044
12	SiO ₂	0,000	3,830	0,0575	0,479	0,670
13	CaO	0,000	1,020	0,153	0,128	0,179
14	MgO	0,000	2,030	0,305	0,254	0,355
15	Al ₂ O ₃	0,000	2,550	0,383	0,319	0,446
16	Прочие примеси	0,200	2,520	0,548	0,490	0,606
17	Основность		0,266			

Таблица 6.8

Физические свойства исходных материалов и синтикома марки СК15

№	Свойство материала	Исходные материалы		Расчетный состав синтикома		
		чугун	наполнитель	Среднее	Минимум	максимум
1	Плотность ρ , кг/дм ³	7,01	3,24	5,79	5,65	5,94
2	Насыпная плотность, кг/дм ³	4,00	2,20			
3	Масса чушки (в ячейке) m , кг	9,8		8,10	7,91	8,31

Таблица 6.9

Расход материалов

Год.объем производ. доменного цеха		Норма расхода на 1 т продукции g , кг/т		Выход пр.из 1 т ж/ч а, кг/т	Годовой расход материалов,	
Назначение	т	Ж.чугуна	Наполн.		Ж.чугун	Наполн.
Тв. Чугун	250000	1020,4		980	2551020	
СК15	350000	867,3	154,6	1153	303571	54124

Таблица 6.10

Подача наполнителя в мульды разливочных машин

Исходные данные			Дозирование наполнителя				Производ. дозатора, Q _{нд}		Расход на РМ Q _{нм} , т/сут
Марка	Объем мульд V, м ³	Скор-ть конв-ра W _к , м/мин	по секциям			по мульдам		Кг/с	
СК15	8,4	13,2	1,25	40,7	28	7,5	3,4	2,75	9,92

Таблица 6.11

Подача чугуна в мульды разливочных машин

Исходные данные				Заливка чугуна по секциям, кг		Масса чугуна в мульде М _{чм} , кг	Растояние между носками, L, м	Расход чугуна, кг/с		
Марка	Объем мульд V _с , дм ³	Время м-ду нал. ткр, с	Скор. конве-тера м/мин	1-й нал. Мч1	2-й нал. Мч2			1-й носок Q _{чн1}	2-й носок Q _{чн2}	Общий на жел. Q _{чж}
СК15	8,4	6	13,2	2,8	4,1	41,3	1,32	6,1	9,1	30,3
Чугун	8,4	—	1,2	9,814	—	58,9	—	21,591		43,2

Таблица 6.12

Расчет производительности разливочной машины

Исходные данные			Расход наполн. на ковш	Цикл заливки мульд	Прод-ть слива ковша	Общее время разливки ковша	Расход чугуна на РМ	Произ-водительность РМ
Марка	Масса чуг. Р _{чк} , т	Подгот. заключ. т _{пз} , мин	Р _{нк} , т	t _{зм} , с	T _{кр} , мин	t _{кр} , мин	Q _ч , т/ч	РМ, т/ч
СК15	60	30	10,7	2,73	32,3	62,3	57,8	66,6
Чугун	60	25		2,73	22,7	47,7	75,5	74,0

Таблица 6.13

Расчет загрузки разливочных машин

Исходные данные			Пропуск. способн.	Фактич. фонд времени работы	Расчет. кол-во РМ	Принятое кол-во РМ	Фактич. кол-во РМ	Коэф. загр.
Марка	План произ. А, т/год	Год. фонд работы РМ F _г , ч	Р _р , т/год	Ф _ф , ч	Н _р , шт	Н _ф , шт	К, шт	К, %
СК15	350000	7140	475457,75	5256	0,736	1	1	73,6

Одновременно в рамках работы разработаны методы контроля качества производимого материала как непосредственно в ходе производства, так и при проведении приемочного контроля.

Контроль по времени разливки. Контроль качества в ходе выполнения технологического процесса основан на оценке времени разливки ковша расплава известной массы и достигнутой точности дозирования наполнителя в мульты разливочных машин при известной скорости разливки.

$$M_o = \frac{W}{t} \cdot \tau \cdot n \cdot m_o, \text{ кг}$$

где M_o — масса наполнителя в расплаве, кг; W — скорость движения конвейерной ленты, м/мин; t — шаг мульты на конвейере, м; τ — время заливки, мин; m_o — масса окатышей в мульте, кг.

Далее пользуясь выражением (6.1) и (6.2) определяется масса произведенного синтикома и доля наполнителя.

Гидростатический метод контроля. Метод гидростатического контроля позволяет с известной долей точности определить массовую долю наполнителя в чушке или в партии.

Метод основан на определении плотности синтикома путем взвешивания чушки на воздухе и в воде и определения доли наполнителя по известным объемным плотностям твердого чугуна, наполнителя и синтикома.

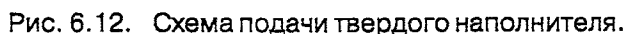
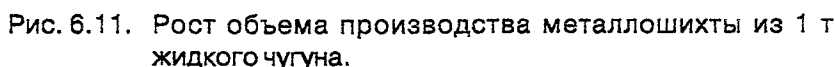
$$D = K \left[\frac{(\gamma_{\text{ч}} - \gamma_{\text{син}}) \gamma_{\text{ок}}}{(\gamma_{\text{ч}} - \gamma_{\text{ок}}) \gamma_{\text{син}}} \right] 100\%,$$

$K = (0,92 - 1)^{-1}$ — коэффициент, учитывающий скрытую пористость в отливках.

Разработанный в рамках этой работы технологический процесс изготовления синтикома вполне реализуем на конвейерных разливочных машинах типа М611 производства ПО “Усольмаш” с проведением соответствующей доработки по установлению дозирующих устройств и организации подачи наполнителя.

Разливочные машины подобного типа установлены практически на всех металлургических заводах, производящих товарный чушковый чугун. Производительность машины типа М6111 составляет 350 – 400 тыс. тонн/год. При производстве синтикома производительность машин практически не изменяется. При этом физический объем товарной продукции в виде синтикома увеличивается (рис.6.11).

В настоящее время на предприятиях производителях синтикома использована упрощенная схема с применением саморазгружающихся контейнеров (рис.6.12).



Дозирующее устройство

Учитывая особенности работы оборудования (высокая температура, запыленность, открытое пространство) для дозирования принят объемный метод дозирования. При разработке конструкции дозатора основная задача – подача требуемой дозы наполнителя в соответствующую ячейку мульды и равномерность распределения наполнителя по ячейкам мульд. Это решено путем применения вращающегося барабана с пазами (карманами), соответствующими требуемому объему наполнителя в мульдах. Количество

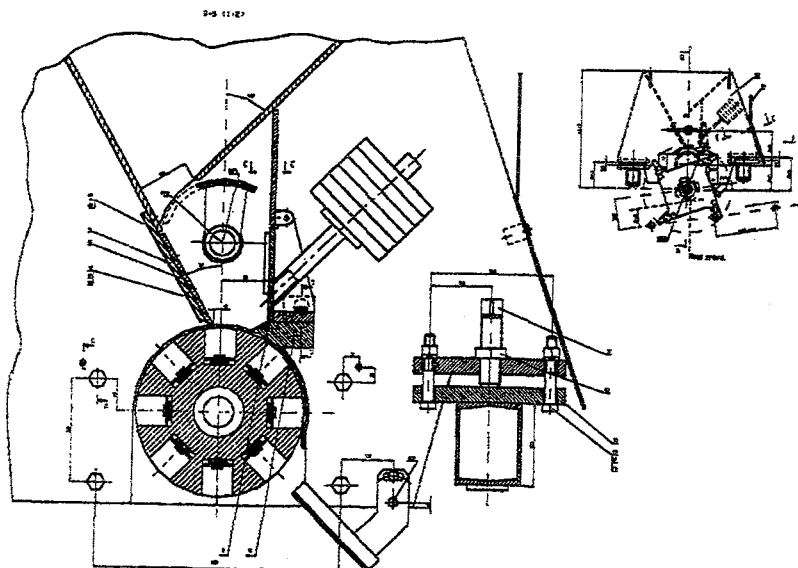


Рис. 6.13. Общий вид дозатора для подачи наполнителя.

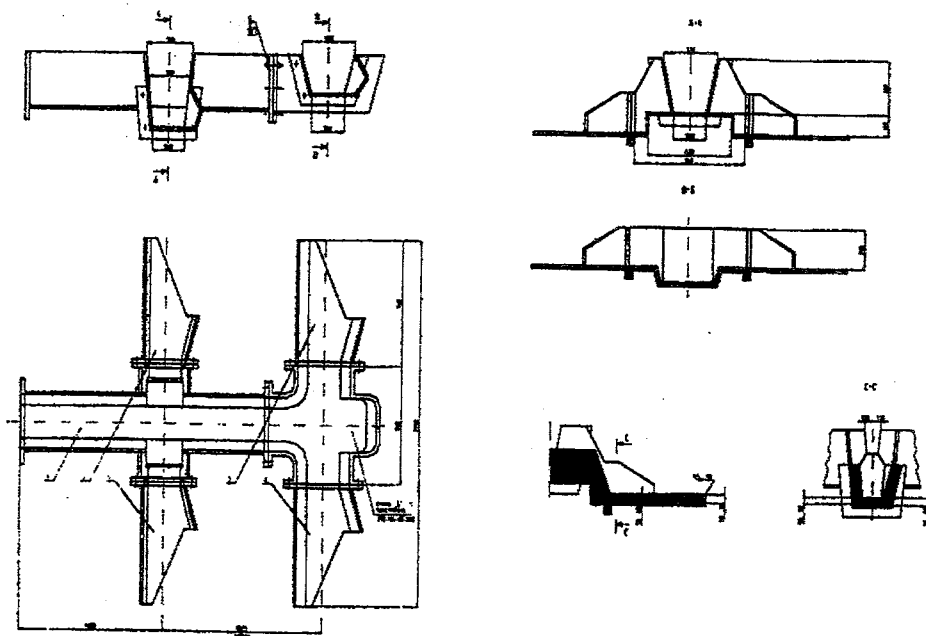


Рис. 6.14. Желоб подачи чугуна двойного налива.

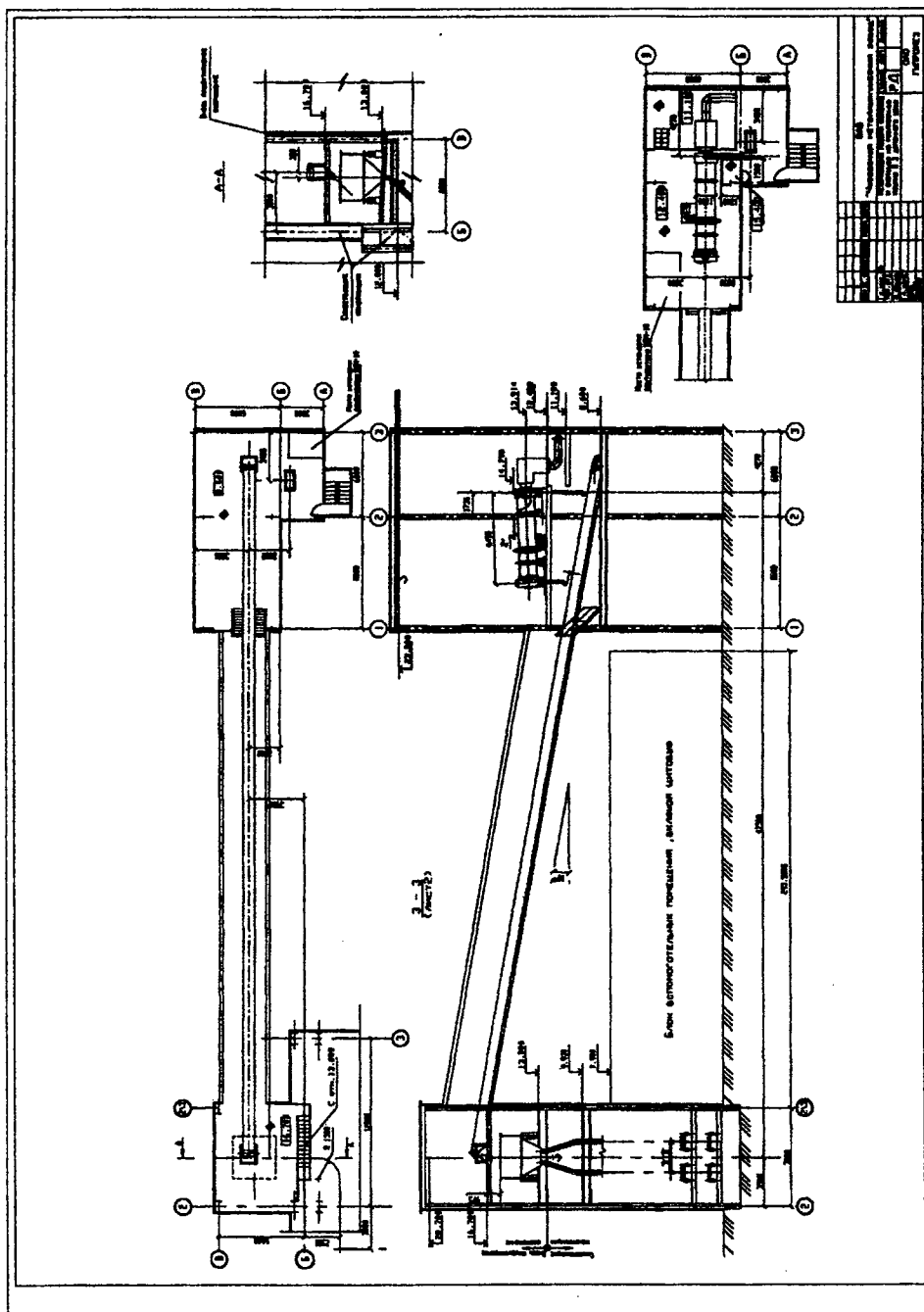


Рис. 6.15. Общая схема линии для производства синтетика на базе разливочной машины чугуна М611.

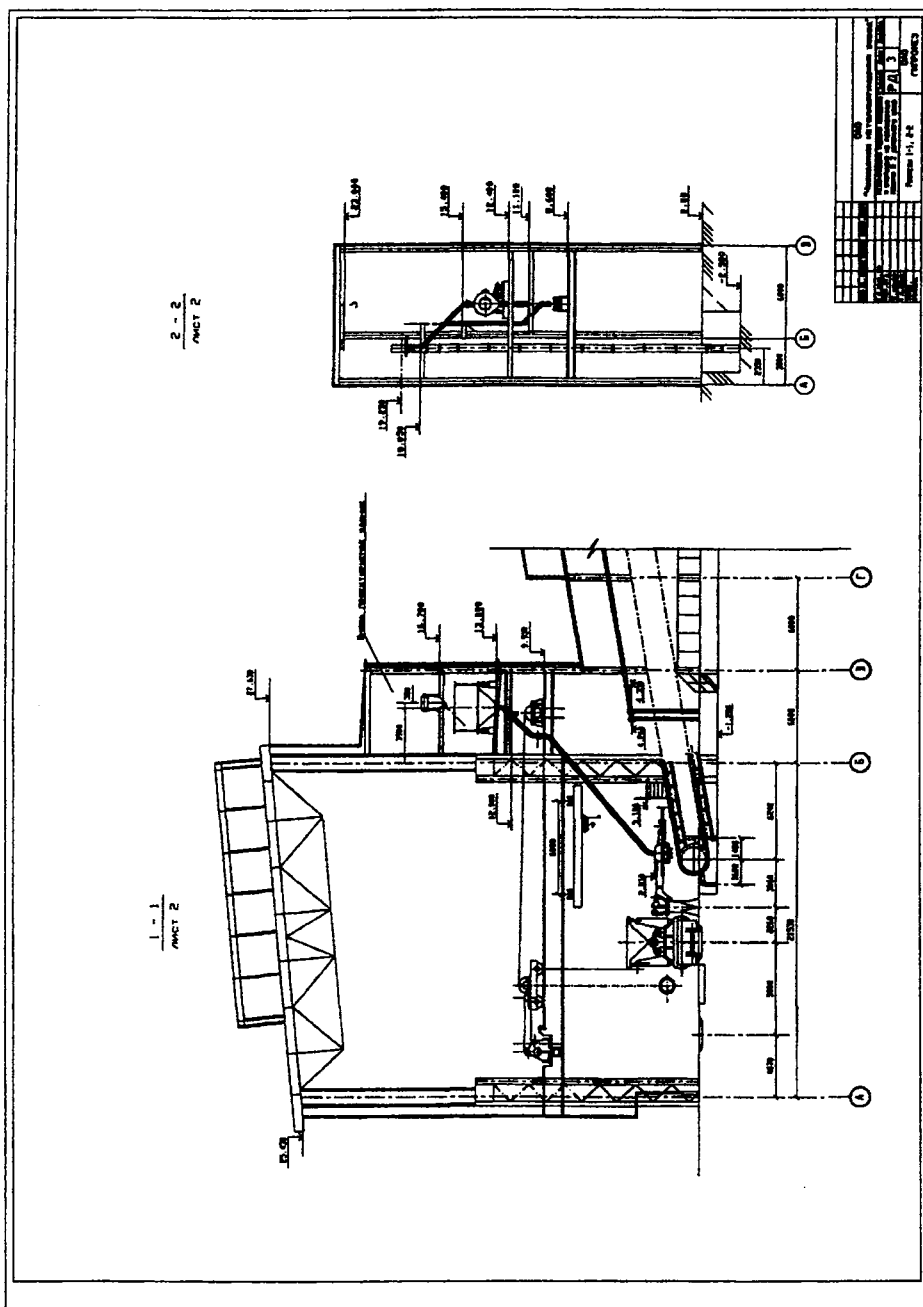


Рис. 6.16. Схема подачи жидкого расплава и твердого наполнителя в литейные формы (изложницы) разливочной машины чугуна М611.

пазов кратно количеству ячеек в продольном сечении мульд. Привод барабана осуществляется от цап цепи конвейера разливочной машины. С помощью паразитных шестерен достигается полная синхронизация движения со скоростью движения конвейерной ленты. Мальтийский крест выполнен 4-мя лучами с расстоянием между ними, соответствующими шагу мульд. Разработка защищена патентом РФ [22]. Разработана конструкторская документация черт. 057.00.00.000СБ. На рис. 6.13 представлен общий вид дозатора, использованного на ОАО "Тулачермет" и ОАО "ЧМЗ". При необходимости может быть выполнен цепной и электрический привод. На ОАО "Северсталь" установлен объемный дозатор шиберного типа. Последним достижением является дозатор пневматического типа, разработанный ООО "НПМП Интермет-Сервис" и ОАО "ЧМЗ".

Желоб подачи чугуна

Желоб подачи чугуна (рис. 6.14) представляет металлоконструкцию с двумя последовательно расположенными по ходу движения мульд конвейерной машины сливными носками. В зависимости от конструктивных особенностей машины расстояние между сливными носками может быть выполнено в пределах 1,2 – 1,8 м, при этом высота расположения 1-го по ходу движения сливного носка — регулируема, что создает условия для изменения энергии падающей струи расплава. Футеровка желоба выполняется огнеупорным кирпичом, огнеупорной глиной и желобными составами. Разработана конструкторская документация на желоб черт. 020.000.000СБ. В настоящее время ведутся работы по созданию системы дозирования жидкого металла.

На каждом из заводов для синтикама разработаны собственные технические условия:

ОАО "Тулачермет" — Заготовка шихтовая для металлургического производства "синтиком" ТУ 14-127-273-99.

ОАО "Чусовской металлургический завод" — Заготовка шихтовая для металлургического передела "синтиком" ВТУ 14-115-69-00.

В соответствии с технологическим заданием ООО НПМП "Интермет-Сервис" ОАО "Гипромез" выполнил рабочий проект автоматизированной линии производства синтикама применительно к разливочным машинам типа М611 (рис. 6.15, 6.16).

Литература

1. Справочник по разливке черных металлов. М.: Металлургия, 1981 г. Под ред. Власова Н.Н.
2. Введение в литейную гидравлику. М.: Машиностроение, 1966 г. Б.В.Рабинович.
3. Гидравлика/Н.Н.Кременицкий. 3- издание, переработанное. М.: Энергия, 1980 г.
4. Плавки металлов. Кристаллизация сплавов. Затвердевание отливки/М.В.Пикунов.-Москва, МИСиС, 1997 г.
5. Курс физики./К.А.Путилов. Москва. 1954 г. Гос. изд. Техничко-теоретической литературы.
6. Специальные виды литья./Под редакцией Г.Ф.Баландина. М.: Машиностроение, 1970 г.
7. Литье намораживанием/Г.Ф.Баканиди. М.: Мапгаз, 1962 г.
8. Теплофизические свойства топлива и шихтовых материалов черной металлургии./Справочник. М.: Металлургия, 1982 г.
9. Патент РФ № 2075519. Авт.: Дорофеев Г.А. и др.
10. Патент РФ № 2075516. Авт.: Дорофеев Г.А., Афонин С.З. и др.
11. Патент РФ № 2075366. Авт.: Дорофеев Г.А. и др.
12. Патент РФ № 2039090. Авт.: Дорофеев Г.А., Белкин А.С. и др.
13. Патент РФ № 2083686. Авт.: Дорофеев Г.А. и др.
14. Патент США № 5,752,561. Авт.: Дорофеев Г.А. и др.
15. Патент РФ № 2075367. Авт.: Дорофеев Г.А., Тамбовский В.И. и др.
16. Патент РФ № 2086342. Авт.: Дорофеев Г.А., Афонин С.З. и др.
17. Патент РФ № 2094480. Авт.: Дорофеев Г.А., Тамбовский В.И. и др.
18. Патент РФ № 2113503. Авт.: Дорофеев Г.А., Афонин С.З. и др.
19. Патент РФ № 2111079. Авт.: Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х. и др.
20. Патент РФ № 2049120. Авт.: Дорофеев Г.А. и др.
21. Патент РФ № 2039628. Авт.: Дорофеев Г.А. и др.
22. Патент РФ № 2088374. Авт.: Дорофеев Г.А., Тамбовский В.И. и др.
23. Патент РФ № 2127651. Авт.: Дорофеев Г.А., Тамбовский В.И. и др.
24. Патент США № 5,817,164. Авт.: Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х. и др.

Выплавка стали в кислородных конвертерах с использованием синтикама

7.1. Исходные положения

Основной составляющей шихты и единственным источником тепла в конвертерном процессе служит жидкий доменный чугун. Избыток физического и химического тепла чугуна используется для получения стали из дополнительной твердой шихты (как правило, стального лома), вводимой в конвертер совместно с расплавленным чугуном и выполняющей роль охладителя плавки. С учетом теплового к.п.д. конвертерного процесса допустимая массовая доля твердой завадки в кислородно-конвертерной плавке как правило не превышает 24 – 26 % всей шихты. Эта доля определяется так называемой охлаждающей способностью твердого материала, то есть количеством тепловой энергии, которое поглотит из расплава 1 кг твердых материалов, необходимых для получения жидкой стали с требуемой температурой.

В зависимости от наличия в твердом материале экзотермических (выделяющих при окислении тепло) или эндотермических (поглощающих тепло при восстановлении оксидов) примесей охлаждающая способность шихтовых материалов соответственно изменяется. В синтикоме наряду с окисляемыми примесями основы (C, Si, P, Mn и т.д.) законсервированы и восстанавливаемые оксиды железа. Поэтому охлаждающая способность синтикама в зависимости от соотношения между основой и наполнителем, их химического состава и характера реакций — экзо- или эндотермической может варьироваться в достаточно широких пределах.

Для выплавки в конвертерах особо качественной стали (например, автолистовых сталей для весьма особо сложной вытяжки — ВОСВ или IF по стандартам США) использование в шихте стального лома нежелательно [1]. Причиной этого является неконтролируемое содержание в покупном ломе примесей цветных металлов (Cu, Ni, Sn и т.д.), неудаляемых существующей технологией и резко ухудшающих ряд свойств проката (особенно — штампуемость). Поэтому для получения особо качественных сталей необходима либо первородная металлошихта, либо использование только чистого оборотного лома.

Анализ термодинамических и кинетических закономерностей процессов рафинирования металла в сталеплавильной ванне при использовании синтикома, одновременно содержащего окислительные (FeO , Fe_2O_3) и восстановительные (C , Si , Mn) компоненты, позволяет заключить, что синтиком отвечает требованиям конвертерного процесса и повышает технологическую гибкость его. В их числе – возможность повышения чистоты стали, достижение раннего плакообразования, глубокой дефосфорации, десульфурации и регламентированного регулирования окисленности конечного металла перед его выпуском, а также более равномерное окисление углерода.

Свойства синтикома и расчетные показатели конвертерной плавки с его применением представлены в табл. 7.1 и 7.2. Из представленных данных следует, что охлаждающая способность синтикома может варьироваться в весьма широких пределах — от 900 до 2070 мДж/т или от 250 до 575 кВтч/т. По отношению к лому этот составляет 0,89 – 1,60. Первое из этих значений отвечает примерно охлаждающему действию 1 т твердого углеродистого полупродукта или химически холодного чугуна. Верхнее значение этого показателя превосходит охлаждающую способность металлолома примерно в 1,6 раз. Отсюда следует, что в общем случае синтиком по своему охлаждающему действию может быть как слабее, так и сильнее лома [7.1].

Плотность синтикома с содержанием 20 % и более окислителя (рис. 7.1) меньше аналогичного показателя для жидкого чугуна (5,5 – 6,1 и 6,5 соответственно). В результате этого достигается более равномерно

Таблица 7.1

Свойства шихтовых материалов конвертерной плавки

Вид материала	Плотность, т/м ³		Охлаждающий эффект, МДж/т
	Удельная	Насыпная	
1. Синтиком:			
— 10 %	6,3 – 6,5	4,3 – 4,5	1065 – 1150
— 20%	5,9 – 6,1	4,0 – 4,2	1520 – 1590
— 30%	5,5 – 5,7	3,7 – 3,9	1970 – 2070
2. Чугун перекдельный жидкий	6,4 – 6,8	—	+1050 – 1190*
3. Чугун перекдельный твердый	7,0 – 7,3	5,0	615 – 720
4. Металлолом стальной:			
— тяжеловесный	7,6	2,5 – 3,5	1320 – 1360
— пакетированный	7,6	0,8 – 1,5	1320 – 1360
— легковесный	7,6	0,5 – 1,2	1240 – 1260
5. Руда железная	3,5	2,0 – 2,5	4800 – 5100
6. Окатыши железорудные	3,5	2,0 – 2,3	4800 – 5100
7. Агломерат	3,0	1,6 – 1,8	4000 – 4200

* — реакция проходит с выделением тепла.

Таблица 7.2

Изменение состава металлической части шихты и технологических показателей плавки при замене лома на синтиком марки СК20

Показатель	Соотношение скрапа и чугуна в металлошихте, %				
	25/75	19/81	11/89	5/94	0/100
1. Расход шихтовых материалов, кг/т:					
— чугуна	825	891	980	1035	1100
— лома	275	209	121	66	0
— руды	0	25	34	52	71
2. То же при замене лома на синтиком, кг/т:					
— чугуна	825	891	980	1035	1100
— лома	292	222	129	70	0
— руды	6	30	36	53	71
3. Увеличение выхода газов, %					
— при 100 % лома	—	6,6	13,3	20,0	26,0
— при замене на синтиком	26	26	26	26	26
4. Изменение количества шлака, кг/т:					
— при 100 % лома	150	162	178	187	200
— при замене на синтиком	192	194	196	198	200
5. Изменение расхода извести, кг/т:					
— при 100 % лома	75	81	89	93	100
— при замене на синтиком	96	97	98	99	100
6. Расход кислорода, м ³ /т:					
— при 100 % лома	45,4	47,3	48,4	47,8	47,8
в т.ч. на чугун	58,2	58,8	59,6	60,0	60,5
с рудой	-1,1	-5,5	-6,5	-9,6	-12,7
с синтикомом	-10,5	-8,0	-4,6	-2,5	0

распределение его в объеме ванны уже с момента начала кислородной продувки (рис. 7.1) и вследствие этого более низкие градиенты температур. Это обеспечивает более равномерное обезуглероживание и предотвращает пиковые газовыделения, а также позволяет снизить воздействие колебаний температуры на футеровку конвертера.

Высокая насыпная плотность и размер слитков синтикома (до 250 мм) позволяют отнести его к разряду тяжеловесного лома, что обеспечивает ведение плавки при более высоких начальных температурах расплава (примерно на 100°C), более раннее начало обезуглероживания и ускорение формирования высокоосновного шлака. Отличием синтикома также является существенно более низкая температура его плавления по сравнению с ломом, достигающая 350°C.

При замене лома синтикомом в металлической части шихты увеличивается доля чугуна, вследствие чего возрастает количество шлака, выход газа и увеличивается расход извести. При 100 % замене лома выход конвертерных газов увеличивается на 25 %, количество шлака возрастет на 30 %, а расход

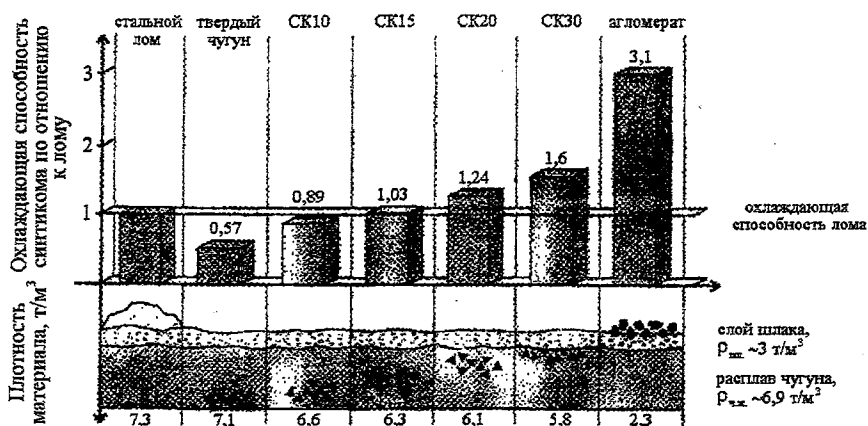


Рис. 7.1. Охлаждающая способность и плотность синтикама и распределение твердой составляющей в жидком расплаве

известии при переработке передельного чугуна достигнет 100 кг/т (табл. 7.2). Эти данные соответствуют варианту работы конвертера на 100 % жидкого чугуна. Несмотря на увеличение количества чугуна расход газообразного кислорода при применении синтикама марки СК20 практически не изменяется и длительность продувки сохраняется на прежнем уровне. Это объясняется тем, что синтиком содержит в своем составе значительное количество кислорода в виде оксидов железа. Так, 1 т синтикама марки СК20 вносит с собой около 36 нм³ кислорода. Что же касается влияния синтикама на длительность продувки, то как показали лабораторные исследования (глава 3), окисление углерода в синтикоме протекает со скоростями, не уступающими конвертерной ванне. Это исключает влияние синтикама на длительность обезуглероживания и плавки в целом.

Анализ теплофизических свойств синтикама и теплосодержания конвертерного процесса при его использовании показывает, что этот материал в силу его меньшей температуры плавления и возможности автокаталитического развития физико-химических процессов окисления углерода и других примесей и одновременного восстановления железа по ходу его плавления является наилучшим материалом для конвертерной плавки по сравнению с другими охладителями и обеспечивает получение более высоких теплотехнических и технологических показателей.

Таким образом, синтиком является эффективным, экономичным и перспективным шихтовым материалом для конвертерного производства. Его применение в плавке повышает технологическую гибкость процесса и позволяет выплавлять высококачественные чистые стали. Он может быть самостоятельной качественной шихтой в конвертерной плавке либо использоваться в комбинации с другими материалами.

Для конвертеров большей емкости (выше 100 т) замена лома жидким чугуном и применение в качестве охладителя железорудных материалов вызывает ряд трудностей организационного и технологического характера.

Они заключаются в следующем. Конструкция оборудования подачи сыпучих материалов в конвертер не обеспечивает рассредоточенную присадку большого количества твердых окислителей в необходимый период времени продувки. Увеличение времени их присадки и смещение его на период обезуглероживания ванны приводит к перегрузкам газоотводящего тракта, неконтролируемым выносам шлакометаллической фазы в газоотводящий тракт, заметалливанню кислородных фурм и элементов котла-охладителя.

Применение известного способа загрузки рудных материалов в конвертер лотками дает неравномерное распределение их в объеме конвертера, приводит к ошлакованию больших масс вводимого охладителя и нерегулируемому ходу процесса окисления углерода металла, сопровождаемому возрастаниями скорости обезуглероживания и объема отходящих газов, повышением выносов, а также другими нежелательными явлениями, в том числе связанными со снижением рафинирующих свойств шлака. Кроме того, рудные окислители – охладители оказывают негативное влияние на стойкость футеровки конвертера.

Отмеченные выше факторы, а также необходимость повышения чистоты выплавляемых сталей создают благоприятные предпосылки для использования в конвертерах новых шихтовых материалов на первородной основе с высокой степенью чистоты типа синтикома.

7.2. Результаты испытаний синтикома в конвертерах ОАО “НЛМК”

Первое крупномасштабное промышленное использование синтикома было осуществлено в 160 т конвертерах ОАО “НЛМК” в 1994 – 1996 гг. [2]. Материалы изготавливали на основе передельного чугуна (78 – 83 % по массе) и железорудных окатышей (17 – 20 %) в условиях доменного цеха ОАО “НЛМК”.

Содержание рудных окатышей принято с учетом того, что количество кислорода окатышей меньше стехиометрического значения, соответствующего реакции полного окисления углерода синтикома.

Химический состав (расчетный) одной из композиций синтикома марки СК20 (20% окатышей по массе) приведен ниже, масс. %:

Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O
74,54	0,630	17,534	1,7120	0,004	0,730	0,089	0,015	0,003
K ₂ O	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	P	S
0,013	3,712	0,635	0,277	0,515	0,007	0,009	0,057	0,018

Для этого состава количество кислорода из оксидов железа синтикома, идущее на окисление собственных углерода и кремния, составляет 87,5 % от массы, требуемой для этих реакций (табл. 7.3).

При таком распределении кислорода на реакции окисления углерода и кремния синтикома недостающая часть кислорода (10 – 15 %) во время

Таблица 7.3

Поступления и распределения кислорода на окисление углерода и кремния синтикома массой 1 т

Кислород оксидов железа, кг	Расход кислорода на реакции, кг		1*
FeO $\frac{0,630}{100} \cdot \frac{16}{72} \cdot 1000 = 1,4$ кг	C → CO 0,9 [*]	$\frac{3,712}{100} \cdot \frac{16}{12} \cdot 1000 = 44,544$ кг	61,699 – 54,002 = = 7,697
Fe ₂ O ₃ $\frac{17,534}{100} \cdot \frac{48}{160} \cdot 1000 =$	C → CO ₂ 0,1	$\frac{3,712}{100} \cdot \frac{32}{12} \cdot 1000 = 9,898$ кг	
= 52,602 кг			
Итого: 54,002 кг	Итого: 61,699 кг		7,697 кг

0,9^{*}) – доля углерода, переходящего в CO

1* – Количество кислорода, поступающее из ванны и дутья на реакции, кг

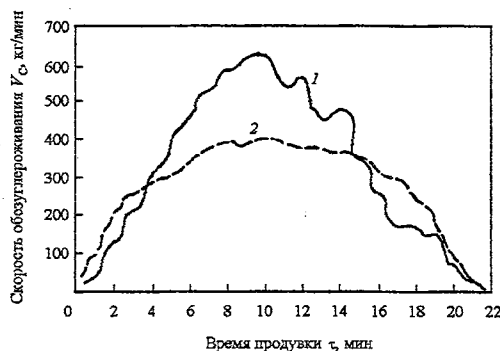


Рис. 7.2. Изменение скорости обезуглероживания металла в 160-т конвертере: 1 — для плавков с применением рудных окатышей; 2 — для плавков с применением синтикома.

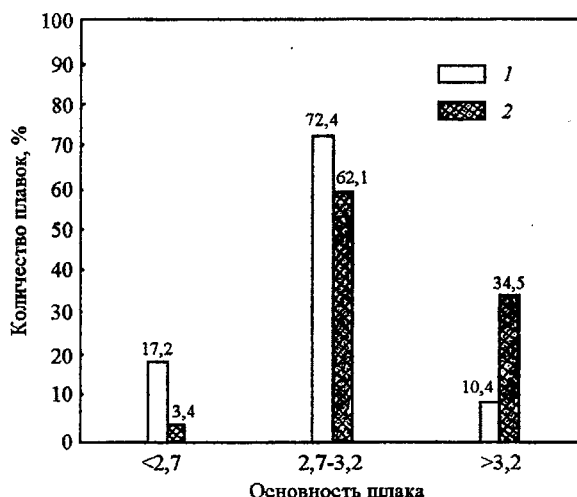


Рис. 7.3. Распределение плавков по основности шлаков в зависимости от технологии: 1 — с применением лома в составе шихты плавков; 2 — с применением лома и синтикома.

продувки поступает из жидкой ванны, снижая либо устраняя вообще процесс накопления кислорода в конвертерной ванне. Благодаря более низкой по сравнению с ломом температуре плавления синтикома (1150 – 1250°C) процесс обезуглероживания ванны начинается раньше и вначале протекает внутри проплавляемого слитка синтикома с выделением оксида углерода. Интенсивное перемешивание металла пузырями оксида углерода улучшает массообменные процессы в объеме ванны и обеспечивает спокойный ход реакции обезуглероживания (рис. 7.2). При этом устраняются пиковые газовыделения, снижаются тепловые нагрузки на оборудование котла – охладителя, уменьшаются выносы и заметалливание элементов котла. Охлаждающий эффект синтикома марки СК20 близок к эффекту лома, поэтому при введении его в металлошихту определение расхода добавок – охладителей не представляет трудности. Замена лома на синтиком в соотношении 1:1 практически не приводит к изменению теплового баланса плавки.

Наличие в синтикоме оксидов железа, калия, натрия и магния способствует ускоренному растворению извести и раннему формированию высокоосновного активного шлака.

При проведении промышленных испытаний исследовано влияние шихтовой заготовки на шлакообразование и износ футеровки 160-т конвертера. Установлены рост основности конвертерных шлаков (рис. 7.3) и снижения содержания магнезии в них, как показателя понижения интенсивности износа футеровки (табл. 7.4).

Количество плавков с пониженной основностью (менее 2,7) сократилось с 17,2 % до 3,4 %. Более трети плавков (34,5 %) имели основность шлаков

Таблица 7.4.

Стойкость футеровки и показатели факельного торкретирования 160-т конвертеров при использовании лома и смеси лома с синтикомом

Показатели	Вариант шихты	
	Лом	Лом и синтиком
Стойкость рабочего слоя футеровки, плавов	952	966
Скорость износа футеровки цилиндрической части, мм за плавку	1,11	0,78
Количество операций торкретирования, шт.	96	69
Частота торкретирования, кол-во операций на 100 плавов	10,7	6,46
Удельный расход торкретмассы, кг/т	3,86	2,72
Количество компаний, шт.	14	3

выше 3,2. Скорость износа рабочего слоя футеровки цилиндрической части конвертера снизилась с 1,11 мм до 0,78 мм за плавку, удельный расход торкрет массы сократился на 1,4 кг/т при увеличении стойкости футеровки на 14 плавов в среднем.

Изменение характера износа рабочего слоя огнеупорной футеровки 60-т конвертера после перехода на новый состав металлозавалки представлено на рис.7.4. Из рис.7.4 видно, что в цилиндрической части конвертера минимальная остаточная толщина футеровки в плоскости цапф составляет 100 мм, а продолжительность эксплуатации футеровки

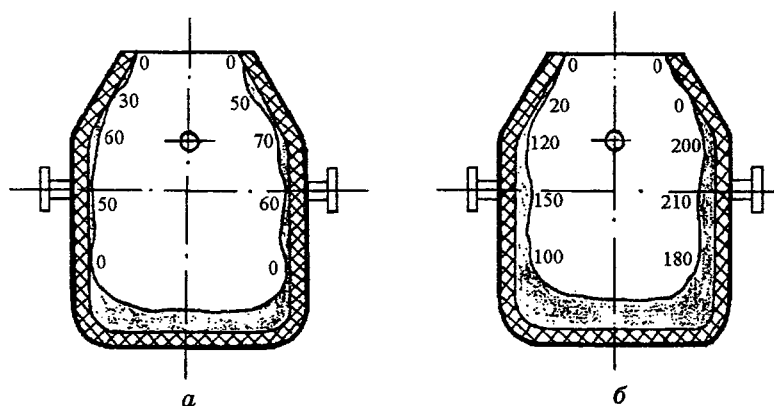


Рис. 7.4. Топография остаточного рабочего слоя футеровки 160-т конвертера (остаточная толщина слоя дана в мм): а — для технологии с применением лома в составе шихты; б — для технологии с применением лома и синтика.

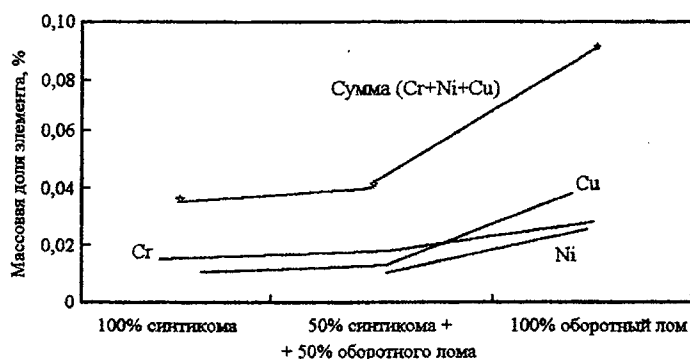


Рис. 7.5. Содержание Cr, Ni и Cu в стали опытных и сравнительных плавок.

лимитирует износ в шлемной части. Такая закономерность износа создает предпосылки дальнейшего повышения сроков службы футеровки при использовании торкрет-фурм, обеспечивающих нанесение защитного огнеупорного покрытия на шлемную часть футеровки.

Высокая чистота синтикома по содержанию цветных металлов и примесных (остаточных) элементов, например Cu, Ni, Cr, Mo, Sn, Pb, обеспечивает снижение содержания этих элементов в стали. В табл. 7.5 и на рис. 7.5 приведено содержание Cr, Ni, Cu в зависимости от состава шихты плавок электротехнической стали. Увеличение жидкого чугуна в составе шихты до 90,3%, снижение количества лома до 6% и введение синтикома позволили вдвое снизить содержание Cr, Ni, Cu в стали. Это безусловно способствовало улучшению магнитных свойств и увеличению выхода высших марок. Выход высших марок изотропной электротехнической стали (2212,

Таблица 7.5

Содержание остаточных элементов в изотропной электротехнической стали в зависимости от состава шихты и выход высших марок стали

Состав шихты, % (период производства)	Содержание элементов, %			Выход высших марок стали, %		
	Cr	Ni	Cu	1*	2*	3*
Жидкий чугун — 79,1; Лом — 20,9	0,037	0,046	0,064	76,2	72,5	55,0
Жидкий чугун — 83,1; Лом — 16,9	0,029	0,31	0,038	84,7	74,2	68,7
Жидкий чугун — 90,3; Синтиком — 3,7	0,022	0,027	0,026	90,6	91,6	85,0

1* — 2212, 2215, 2216, ГОСТ 21427.2-83

2* — 2312, ГОСТ 21427.2-83, 2315, ТУ 14-106-335-89

3* — 2312, 2413, 2414, 2415, ГОСТ 21427.2-83

2215, 2216; 2312, 2315; 2413, 2414, 2415) I, II и III групп легирования увеличился на 15,9; 17,4; 16,3 %, соответственно.

В результате исследований определен состав шихты для 160-т конвертеров, включающий 140-145 т жидкого чугуна, 10-12 т лома и 10-16 т синтикома, суммарной массой 166 т на плавку. Сравнительные технико-

Таблица 7.6

Сравнительные технико-экономические показатели выплавки стали

Показатели	Варианты шихтовки				
	Сравнительные		Опытные		
	До начала испытаний	После окончания испытаний	4-5 т синти-кона	10-16 т синти-кона	100% чугуна
Расход чугуна, т	137,8	142,6	151,0	142,5	166,0
Расход м/лома, т	32,5	23,5	10,5	10,0	—
Расход синтикома, т	—	—	4,5	13,5	—
Доля лома в м/шихте, %	19,1	15,4	6,3	6,0	—
Расход извести, т	10,5	9,8	9,8	9,8	10,6
Расход железоблока, т	—	0,18	0,9	—	4,8
Расход шпата, т	0,14	0,10	0,2	0,05	0,16
Расход рудных окатышей, т	0,27	0,29	1,9	2,3	2,8
Содержание [Si] в чугуне, %	0,57	0,61	0,51	0,54	0,59
Содержание [Mn] в чугуне, %	0,58	0,31	0,24	0,27	0,24
Содержание [S] в чугуне, %	0,023	0,026	0,025	0,023	0,019
Температура чугуна, °C	1306	1291	1306	1311	1294
Температура мет, п/прод., °C	16604	1656	1668	1657	1650
Содержание [C] после прод., %	0,043	0,036	0,039	0,042	0,038
Содержание [Mn] после прод., %	0,159	0,086	0,078	0,084	0,068
Содержание [S] после прод., %	0,021	0,027	0,023	0,022	0,014
Содержание [P] после прод., %	0,010	0,010	0,008	0,008	0,008
Содержание (Fe) в шлаке, %	16,5	16,8	16,1	17,5	17,9
Основность шлака	2,9	2,9	3,3	3,1	3,1
Додувка, %	27,1	32,4	24,0	25,6	20,0
Продолжительность продувки, мин,	16,6	17,7	22,6	21,4	15,6
Расход кислорода, м³/пл	7967	8657	7650	7488	7462
Стойкость фурм по заматаливу, пл	10,1	11,0	7,7	8,6	—
Средний вес плавки, т	150,1	145,5	144,9	142,8	142,8
Выход жидкого, %	91,2	19,1	91,6	91,0	89,1
Удельный расход чугуна, кг/т	913,6	979,7	1040,1	1026,4	1162,5
Удельный расход м/лома, кг/т	218,7	158,8	90,3	102,8	—
Удельный расход извести, кг/т	70,5	73,3	71,0	72,1	74,2
Удельный расход железоблока, кг/т	—	3,7	9,8	9,4	33,6
Удельный расход рудных окатышей, кг/т	1,4	1,6	11,3	12,0	19,6

экономические показатели выплавки на стали по действующей технологии (лом) и использовании лома и синтикама представлены в табл. 7.6.

7.3. Испытания синтикама в конвертерах ОАО “Северсталь”

С конца 1994 года начались испытания синтикама в 375 т конвертерах ОАО “Северсталь”. В отличие от ОАО “НЛМК” на ОАО “Северсталь” при производстве синтикама применяли вместо железорудных окатышей агломерат. Производимый синтиком использовался конвертерным цехом в качестве охладителя для выплавки чистых сталей типа 08Ю. Результаты этих работ достаточно полно представлены в технической литературе [3 – 11]. Основные положения данных исследований приведены ниже.

По данным этих исследований процесс плавки в 375 т конвертерах не вызывает технических затруднений: синтиком в отличие от чушкового чугуна и стального лома имеет меньшую плотность и благодаря этому, а также газотворной способности всплывает в расплаве чугуна, не приводя к формированию конгломератов в нижних слоях расплава, гарантируется устойчивое зажигание факела, ускоренное шлакообразование, отсутствие выбросов и промежуточного скачивания шлака.

Случаев неполного расплавления или “закозления” металлопихты не наблюдалось. Прироста содержания углерода за время выпуска не отмечено, что также косвенно подтверждает полноту и своевременность расплавления синтикама и его полного обезуглероживания.

При отработке технологии использования нового материала были определены оптимальный его состав, схема подачи пихтовых материалов в конвертер, оптимальные дутьевой режим ведения кислородной продувки с измененными газодинамическими характеристиками и режим присадки шлакообразующих материалов [8 – 10]. Обнаружена тенденция к снижению окисленности конвертерного шлака и повышению степени дефосфорации расплава на 3 – 5 %.

Одновременно была проанализирована возможность снижения доли жидкого чугуна в пихте конвертерной плавки при различных соотношениях в твердой металлозавалке синтикама и стального лома.

За счет изменения соотношения стальной лом/синтиком в твердой металлозавалке возможно снижение расхода жидкого чугуна при использовании синтикама, содержащего в качестве наполнителя до 10 – 12 % окислителей. Синтиком с малой долей агломерата позволяет за счет своей пониженной охлаждающей способности по сравнению с ломом обеспечить, при необходимости, выплавку стали с содержанием в пихте 70 % жидкого чугуна.

ОАО “Северсталь” совместно с ООО “НПМП “Интермет-Сервис” разработана технология плавки, позволяющая заменять 100 % стального лома синтиком в пихте конвертерного процесса, причем эта технология позволила в определенные периоды (нехватка качественного лома)

обеспечивать производственную программу цеха. В частности, в 1998 г. более 70 плавов в 350-ти конвертерах проведены с исключением из шихты стального лома и использованием вместо него синтикома. Изменяя состав используемого синтикома, можно получать его охлаждающую способность или меньше или больше охлаждающей способности металлолома и в зависимости от складывающейся ситуации менять тепловой баланс конвертерной плавки.

В случае дефицита жидкого чугуна использование синтикома, имеющего охлаждающий эффект меньше, чем у металлолома позволит при постоянстве потребляемого конвертерным цехом объема жидкого чугуна увеличить объем производимой стали или позволит снизить расход жидкого чугуна на 20 – 30 кг/т при сохранении объемов производимой стали.

Практика применения синтикома в конвертерах ОАО “Северсталь” показала, что синтикомом можно полностью или частично заменить стальной лом в шихте конвертерной плавки.

Синтиком, применяемый в кислородных конвертерах как заменитель лома, содержит меньшее количество железа, чем лом. Поэтому при замене лома, если исходить из соотношения 1:1, выход железа из той же массы шихты должен снижаться. Результаты специально выполненной серии плавов в 375 т конвертерах ОАО “Северсталь” показали, что для одной и той же марки стали (типа 08Ю) по “стандартной” технологии (жидкий чугун + стальной лом) выход годного составил 88,21 %, а по технологии “жидкий чугун + стальной лом) выход годного снизился до 86,17 %. Эти данные являются приблизительными и требуют уточнения.

Это видно даже из следующего расчета. При полной замене лома синтикомом расход последнего на плавку должен быть равен 110 т. При марке синтикома СК10 в этой массе синтикома содержится 11 т агломерата, из которых 60 т приходится на железо в виде оксидов. Даже при полном отсутствии восстановления оксидов железа и их переходе в шлак снижение выхода железа не могло превысить более 1,75 %.

Полученные результаты нельзя отнести на недостатки синтикома, поскольку оценка выхода железа при замене лома синтикомом в соотношении 1:1 неверна в принципе из-за меньшего исходного содержания железа в 1 т синтикома по сравнению с 1 т лома. Она должна производиться исходя из соотношения 1,1:1 вместо 1:1. Нарушение этого соотношения и стало основной причиной получения заниженного выхода жидкой стали.

Остановимся на вопросе выхода железа из синтикома более подробно, поскольку естественно меньшее содержание железа в 1 т синтикома по сравнению с ломом и твердым чугуном часто рассматривается как недостаток синтикома.

В специально выполненном исследовании Зинченко С.Д. и соавторов [12], посвященном изучению зависимости выхода жидкой стали от состава металлошихты в 375 т конвертерах ОАО “Северсталь”, показано, что наилучшие результаты достигаются для варианта плавки с использованием

твердого чугуна и агломерата в количестве до 20 и до 5 т на плавку соответственно. Выход жидкой стали при этом составил 89,64 % против 88,87 % на текущих плавках. Полученные данные свидетельствуют о том, что совместное хотя и раздельное применение твердого чугуна и агломерата, не только не уменьшает, а, наоборот, увеличивает выход жидкой стали. Очевидно, что объединение этих компонентов в единое целое — синтикома (в данном случае марки СК20) не может оказать отрицательного влияния на этот показатель.

В свете изложенного ранее полученные результаты о снижении выхода железа при использовании синтикома, представляющего не что иное как смесь твердого чугуна и твердого окислителя, представляются спорными. Объяснением этому служит, как отмечено выше, некорректный подход к определению выхода жидкой стали на основе эквивалентности 1 т синтикома марки СК20 и 1 т металлолома по содержанию в них железа, то есть в соотношении по массе 1:1, что не отвечает действительности.

Отметим еще одну особенность синтикома. Согласно данным [12] увеличение расхода чугуна соответственно выше 20 и 5 т оказывает негативное влияние на выход годного и поэтому их расход ограничен указанными выше значениями. В отличие от этого расход синтикома на плавку не имеет технологических ограничений. На опытных плавках расход синтикома на плавку достигал 110 т, что больше суммарного расхода твердого чугуна и агломерата в 4,4 раза. Эти данные являются еще одними аргументом в пользу применения в конвертерах твердого чугуна и твердого окислителя в виде композита, соединяющих эти компоненты в одно целое.

Принципиально важным является вывод о решающем влиянии отклонения фактической температуры металла на повалке от оптимальной расчетной температуры (градиента температур) на величину выхода жидкой стали, установленный в этой работе [12]. При отсутствии этого отклонения выход достигает максимальных значений, равных 89 %, и снижается до 87% при превышении фактической температуры над расчетной на -100°C и до 87,5% в случае увеличения градиента температур до $+100^{\circ}\text{C}$. С этих позиций синтиком, обладающий возможностью изменения охлаждающего эффекта в широких пределах получает дополнительное преимущество по сравнению с ломом, твердым чугуном и охладителями — окислителями.

Исходя из этого, нет оснований приписывать синтикому отрицательное влияние на величину выхода, если, конечно, при определении этого показателя учитывать меньшее исходное содержание железа в синтикоме по сравнению с металлоломом или твердым чугуном.

На начальном этапе синтиком загружали совместно с металлоломом совместно из одного совка с преимущественным расположением композита на поверхности лома. Вследствие этого увеличивалась вероятность скопления кусков синтикома в кучи и попадания синтикома в нижние и средние слои общей металлозавалки. В дальнейшем было показано [13,14], что при изменении режима загрузки синтикома и расположении его поверх-

лома потери железа снижаются. Выход железа за счет этого возрастает и перекрывает с избытком меньшее исходное содержание железа в синтикоме по сравнению с ломом и чугуном.

Применение синтикома позволило повысить качество производимого автолистного металла, надежно получать в нем весьма низкое содержание примесей цветных металлов (хрома, никеля, меди), снизить отсортировку слябов в конвертерном производстве и увеличить выход высших категорий вытяжки в прокате на 8,4 абс. % (рис. 7.5).

Суммарное содержание остаточных концентраций хрома, никеля и меди составило:

- при 100-110 т синтикома — 0,035 %;
- при 50 т синтикома и чистом ломе — 0,040 %;
- при 50 т синтикома и смешанном ломе — 0,090 %;
- на сравнительных плавках (смешанный лом) — 0,090 %.

Варианты со 100 % синтикомом и с 50 т синтикома в сочетании с чистым ломом обеспечивают 100 % -ное выполнение ужесточенных требований для назначения плавки на категорию ВОСВ (при использовании смешанного лома — только 50 – 60 %).

Опыт двухлетней работы 375 тонных кислородных конвертеров с использованием синтикома в пихте показал, что синтиком является технологически и экономически целесообразным материалом для производства высококачественных сталей. Возможные сферы использования композитов этого типа представлены в табл. 7.7.

Дополнительный ввод синтикома в кислородный конвертер неизбежно должен сопровождаться выводом части стального лома (или другого охладителя) из завалки. При этом возможны два варианта подобной замены:

- вариант 1* — эквивалентная замена по содержанию железа в рассматриваемых пихтовых материалах;
- вариант 2* — эквивалентная замена по охлаждающей способности данных пихтовых материалов.

В качестве примера первого варианта замены рассмотрим следующий случай. Пусть из состава пихты выведено 2 т стального лома с содержанием железа 99,4 %. Значит, количество железа, вносимое этой металлопихтой, уменьшилось на $994 \times 2 = 1988$ кг. Для компенсации этого количества железа, в расплав необходимо внести 2,22 т синтикома марки СК-20 с общим содержанием железа ($Fe_{\text{Мет}} + Fe_{\text{окс}}$) примерно равным 89,4 % (в расчете принято содержание наполнителя в синтикоме 19 %).

При этом сталеплавильная ванна будет “захолаживаться” в большей степени. Так, на расплавление 1 т стального лома необходимо затратить около 400 кВт·час энергии, в то время как на расплавление 1 т синтикома указанной марки требуется около 465 кВт·ч. Следовательно, во втором случае от ванны будет отнято $2,22 \times 465 = 1032,3$ кВт·ч энергии или на $1032 - 800 = 232$ кВт/час больше чем в первом случае. Согласно результатам расчета материального и теплового баланса такой запас тепла у ванны имеется.

Таблица 7.7

Область применения синтикома

Параметры	Доля наполнителя в синтикоме, %				
	10	15	20	25	30
1. Охлаждающий эффект по отношению к металлолому	0,89	1,00	1,23	1,39	1,56
2. Области применения в конвертерной плавке:					
2.1. Снижение расхода жидкого чугуна	20 – 30	–	–	–	–
2.2. Увеличение производства стали при постоянном объеме производства жидкого чугуна	+	–	–	–	–
2.3. Сохранение теплового баланса плавки (без применения дополнительных теплоносителей и охладителей) в условиях нехватки (избытка) жидкого чугуна (металлолома)	+	+	+	+	+
2.4. Стабильность шихтовки плавки в условиях изменения соотношения долей жидкого чугуна и металлолома	+	+	+	+	+
2.5. Сохранение (увеличение) объемов производства стали при нехватке металлолома	–	–	+	+	+
3. Возможность производства качественной стали с низким содержанием углерода, серы, фосфора, хрома, никеля, меди	+	+	+	+	+
4. Возможность гарантированного планирования получения требуемого содержания углерода, фосфора, серы, хрома, никеля, меди в стали перед выпуском	+	+	+	+	+
5. Возможность точного расчета параметров кислородной продувки по статистической модели	+	+	+	+	+
6. Снижение себестоимости качественной стали с низким содержанием вредных примесей	+	+	+	+	+

В качестве примера второго варианта замены рассмотрим следующий случай. Пусть из состава шихты выведено 2 т стального лома.

Тогда с позиций эквивалентности по охлаждающей способности необходимо в конвертер ввести 1,6 – 1,7 т синтикома СК-20. В расчете принята охлаждающая способность стального лома равной 1, а СК-20 — 1,24. Основным недостатком такой замены является снижение массы железа, вносимого синтикомом примерно на $1988 - 1430 = 558$ кг.

В случае ввода в конвертер по ходу плавки синтикома марки СК-15 (относительная охлаждающая способность около 1) выводить из шихты стальной лом необходимо с позиций эквивалентности содержания железа. Тогда при выводе 2 т стального лома должно быть введено около 2,2 т

синтикома СК-15. При этом ванна будет охлаждаться всего на $2,2 \times 400 - 2 \times 400 = 80$ кВт·ч больше, чем по стандартной технологии.

7.4. Использование в конвертерах синтикома на основе углеродистого полупродукта

Испытания проводились в конвертерном цехе металлургического комбината ЕКО Stahl, оснащенным конвертерами вместимостью 240 т. Проведена серия опытных плавов с использованием синтикома марки СК10 в качестве охладителя плавки взамен части металлолома. Выплавлялись стали повышенной чистоты по примесям цветных металлов с ультранизким содержанием углерода до 0,03 %, предназначенные для автолиста типа ВОСВ. Всего было проведено 75 плавов с содержанием в металлозавалке от 5 до 40 т синтикома. Синтиком СК10 был изготовлен ОАО "ЧМЗ" из углеродистого полупродукта, получаемого продувкой ванадийсодержащего передельного чугуна. В отличие от стандартного чугуна этот полупродукт и синтиком, изготовленный на его базе, содержат пониженную концентрацию углерода и следы кремния и марганца. Поэтому энергопотенциал этого

Таблица 7.8

Химический состав синтикома его компонентов производства ОАО "ЧМЗ"

Компоненты	Массовая доля, масс. %		
C	4,07	0,06	3,66
Si	<0,01	—	—
Mn	0,021	0,16	0,019
P	0,034	<0,01	<0,31
S	0,035	0,002	0,031
Cu	0,018	0,01	0,016
Cr	0,068	0,07	0,061
Ni	0,055	0,03	0,049
V	0,064	—	0,058
Ti	0,001	—	<0,001
Fe _{общ}	95,62	60,5	92,011
Fe _{мет}	95,62	0,50	86,011
FeO	—	2,30	0,23

синтикома меньше по сравнению с обычным синтиком из передельного чугуна. Анализ отдельных компонентов и расчетный состав синтикома СК10 ОАО "ЧМЗ" приведен ниже в табл. 7.8.

Пустая порода содержала следующие оксиды, масс. %: 4,3 SiO₂; 1,3 CaO; 0,53 V₂O₅; 2,6 MgO; 2,47 TiO₂; 2,5 Al₂O₃.

Состав исходного чугуна и конвертерного металла, масс. %:

Передельный чугун

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
4,07	0,335	0,522	0,08	0,001	0,017	0,019	0,001	0,002

Металл по окончании продувки без применения синтикома

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,045	0,004	0,162	0,007	0,007	0,013	0,026	0,002	0,018

Металл по окончании продувки с применением синтикома

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,028	0,003	0,114	0,008	0,005	0,010	0,027	0,002	0,011

По заключению завода применение синтикома вместо части дома снижает в среднем содержание фосфора в металле на 0,001 – 0,002 %, примесей Cu, Cr и Ni – на 0,012 %, серы — на 0,002 % (рис. 7.6 и рис. 7.7). Отмечена более высокая технологичность синтикома по сравнению с твердым чугуном и

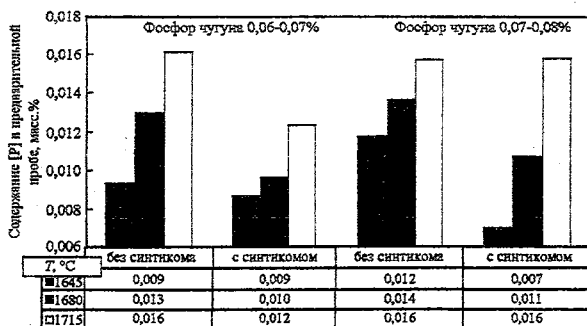


Рис. 7.6. Сравнительное содержание фосфора в предварительной пробе при использовании синтикома и без него.

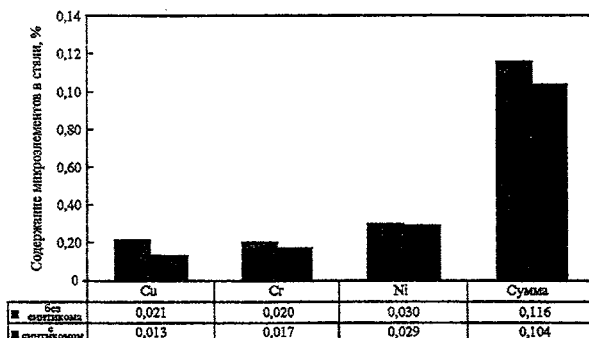


Рис. 7.7. Влияние синтикома на содержание примесей цветных металлов.

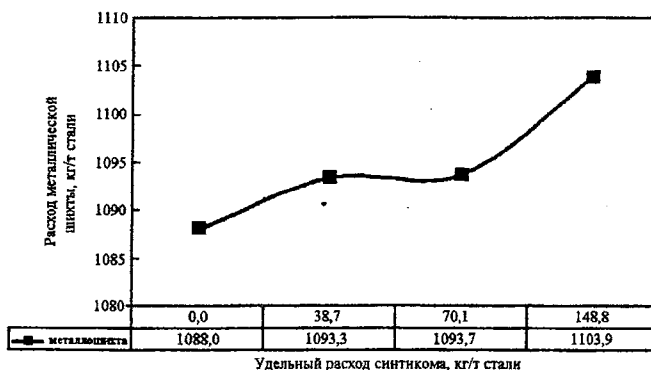


Рис. 7.8. Влияние синтикома на расход металлошихты.

возможность использования синтикома в металлозавалке конвертеров в больших количествах. В целом был сделан вывод о том, что синтиком является аналогом чистого скрапа и может применяться при выплавке в конвертерах сталей высокой чистоты, включая полную замену лома. Интересными являются полученные данные о возможности использования в качестве одной из составляющих металлошихты при выплавке сталей с весьма низким содержанием углерода (0,028 %) синтикома марки СК10П, хотя этот материал имеет повышенное содержание углерода (3,66 %).

Как показали исследования, расход металлошихты при замене части лома на синтиком марки СК10 при удельном расходе композита 38,7 и 70,1 кг/т по сравнению с работой на 100 % ломе практически остался прежним (рис. 7.8). Он составил соответственно 1093,3 и 1093,7 кг/т против 1088,0 кг/т на ломе, увеличившись всего лишь на 5,3 – 5,7 кг/т. Если учесть, что содержание углерода в металле после окончания продувки на опытных плавках составляло 0,028 % вместо 0,045 %, то это неизбежно вызвало усиленное окисление железа. Поэтому расход металлошихты с использованием синтикома в количестве 38,7 – 70,1 кг/т не только не возрос на опытных плавках, а даже снизился. Это косвенно подтверждает уменьшение угара железа.

Обратим внимание на то, что на первый взгляд относительно небольшое уменьшение конечного содержания углерода в металле с 0,045 до 0,028 % сопровождается большим угаром железа, который может согласно А.М.Бигееву [15] достигать 2 % и более. Следовательно, применение синтикома в данном количестве снизило потери железа на эту величину, что и помогло компенсировать меньшее исходное содержание железа в синтикоме по сравнению с ломом и чугуном. При увеличении количества синтикома расход металлошихты начинает возрастать и достигает 1103,9 кг/т, увеличившись на 10,2 кг/т стали при удельном расходе синтикома 148,8 кг/т. Вероятной причиной этого является повышенная охлаждающая способность

синтикома, изготовленного из химически холодного углеродистого расплава, которая начинает заметно проявляться при увеличенных количествах композита, даваемого на плавку. Определенную роль играет и повышенное содержание пустой породы в окатышах КачГОКа, использованных при получении синтикома, количество которой в окатышах достигает 13,7 %.

Цикл проведенных на ЕКО Stahl испытаний синтикома СК10 производства ОАО "ЧМЗ" позволил сделать вывод о том, что синтиком на основе углеродистого полупродукта может служить полноценным заменителем металлолома при выплавке в конвертерах чистых сталей с особо низким содержанием углерода.

Конвертерные цехи многих заводов работают в условиях хронической нехватки металлолома, причем со временем дефицит лома усиливается. Это приводит к неизбежному увеличению в металлозавалке доли жидкого чугуна и возрастанию его удельного расхода до 900 кг/т стали. Дефицит металлолома, а также резкое увеличение производства автолистовых сталей типа 08Ю и 1Г и других сталей с высокой и особо высокой чистотой по содержанию хрома, никеля и меди приводят к необходимости замены части лома твердым чугуном, также к расширению масштабов применения твердых окислителей-охладителей (агломерата, руды, окатышей) и сыпучих материалов (известь, доломит, известняк).

Попытки поиска альтернативных охлаждителей конвертерной плавки возникли еще на заре появления конвертерного процесса и не прекращаются до настоящего времени. Более того, актуальность этих вопросов непрерывно усиливается. Значительный вклад в исследовании этих процессов внесен металлургами ОАО "Северсталь" [3 - 9]. В этих работах проанализирована технология конвертерной плавки с использованием различных охлаждителей, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Применение твердого чугуна носит ограниченный характер и не превышает 30 т на плавку для 375 т конвертеров [3]. Причиной ограничения расхода твердого чугуна является, прежде всего, переокисление верхних слоев металла и шлака при выплавке низкоуглеродистых сталей типа 08Ю.

Что же касается использования в качестве регулятора теплового баланса плавки сыпучих материалов, то их применение приводит к увеличению массы конечного шлака и возрастанию потерь железа. Это делает использование таких материалов весьма проблематичным.

При увеличенном расходе твердого чугуна возрастает вероятность попадания его в нижние слои металлозавалки, образования массивного конгломерата, плавящегося с замедленной скоростью и возможность сохранения твердого чугуна до окончания продувки. В результате этого нижняя часть металлической ванны конвертера по окончании продувки обогащается углеродом, поступающим при расплавлении последних порций твердого чугуна. По завершении процесса продувки металлическая ванна имеет значительный градиент концентраций углерода и кислорода в расплаве, причем избыточный углерод находится в нижних слоях ванны, а

кислород, наоборот, в верхней части. Это усложняет технологию плавки, приводит к нестабильности состава металла перед выпуском, увеличивает опасность выбросов, затрудняет попадание в заданный состав. Последние исследования в этой области, выполненные С.Д.Зинченко и соавторами [12], и отличающиеся особой тщательностью и глубиной, показали, что доля твердого чугуна в 375 т конвертерах не должна превышать 20 т или 5,0 % от массы металлозавалки. Иными словами, верхнее предельное значение расхода чугуна снижено с 30 до 20 т или в 1,5 раза. Исходя из этого, расход твердого чугуна в конвертерах должен быть ограничен 5 %.

В работе сделан весьма интересный вывод о том, что применение твердого чугуна вместо части металлолома в количестве до 20 т на плавку в 375 т конвертере должно сопровождаться обязательным вводом агломерата с расходом его до 5 т на плавку. Соотношение твердого чугуна и агломерата соответствует 4:1, что соответствует при условии объединения чугуна и агломерата в единый композиционный материал — синтиком марке композита СК20. Этот, неожиданный на первый взгляд вывод, убедительно свидетельствует в пользу применения в конвертерном процессе композиционных материалов, в данном случае типа СК20. Их основным преимуществом в данных условиях является возможность полной замены лома и увеличение количества синтикома на плавку до 110 т при предельном возможном расходе твердого чугуна 20 т. Следовательно, перевод чугуна в композиционный материал — синтиком снимает ограничения с применения твердого чугуна в конвертерной плавке и открывает возможность выплавки стали на 100 % первородной шихты — жидкого чугуна и синтикома.

Исходя из условия сохранения металлозавалки на уровне 410 т, использование твердого чугуна и агломерата в количестве 20 и 5 т соответственно, расход лома при его дефиците может быть снижен со 107 до 83 т или на 24 т. Из этого косвенно следует, что в тепловом отношении охлаждающая способность 20 т твердого чугуна и 5 т агломерата эквивалентна 24 т металлолома или, что одно и то же, 1 т смеси твердого чугуна и агломерата (0,8 т чугуна и 0,2 т агломерата). Наши расчеты для этого случая с учетом меньшей охлаждающей способности агломерата по сравнению с рудой равной 4593,6 МДж/т или 1276 кВтч/т дают следующее примерное значение $0,8 \cdot 720 + 0,2 \cdot 4593,6 = 1494,72$ МДж/т или 415,2 кВтч/т синтикома СК20. Это значение примерно соответствует верхнему пределу охлаждающей способности тяжеловесного металлолома (табл. 7.4). Несколько меньшее значение охлаждающего эффекта данного синтикома марки СК20 с агломератом по сравнению с композитом той же марки, но имеющей в своем составе вместо агломерата железную руду или окатыши, объясняется меньшей эндотермичностью агломерата по сравнению с указанными окислителями.

7.4. Новые области применения синтикома

Благодаря металлической матрице плотность синтикома в твердом состоянии близка к плотности жидкого чугуна. Это создает возможности для погружения чушек синтикома в объем жидкого чугуна и их пребывания в нем в течение времени, равном времени расплавления. Одновременно железоуглеродистая матрица синтикома удерживает оксиды железа и другие компоненты внутри чушек от момента их ввода в жидкий чугун и до полного расплавления. Благодаря этому достигается равномерное поступление кислорода в ванну, причем в конденсированном состоянии. С этих позиций синтиком можно рассматривать как еще один способ ввода кислорода в объем металла [16]. Данный материал является первым, который позволяет оксидам железа находиться в жидком чугуне относительно долгое время. Это расширяет функциональные возможности синтикома и технологическое воздействие, оказываемое им на основные процессы в сталеплавильной ванне. Благодаря этому материалы этого типа являются многофункциональными и могут выполнять наряду с ролью чистой первородной шихты следующие функции:

- регулятора теплового состояния ванны;
- средства интенсификации процесса обезуглероживания ванны в области пониженных концентраций углерода;
- реагента для внедоменного рафинирования чугунов. В том числе природнолегированных;
- газотворного вещества, обеспечивающего вспенивание шлака и образование гарнисажа.

При заливке жидкого чугуна на металлолом наблюдается сильное охлаждение чугуна, что приводит к "холодному" началу продувки. Особенно сильно это ощутимо при работе на физически холодных чугунах. В результате в начальный момент плавки создается не избыток, а недостаток тепла. Значительное количество стального лома в рассматриваемый период находится выше уровня залитого чугуна и сжигается кислородом дутья, расплавляясь за счет тепла окисления железа и увеличения его потери.

Для предотвращения вышеизложенных негативных явлений может быть предложен способ дискретной подачи материалов-охладителей по ходу плавки. При этом часть охладителя может подаваться в конвертер по традиционной схеме, то есть до заливки жидкого чугуна, а часть — по ходу плавки.

Однако при использовании в качестве охладителя стального лома практически невозможно организовать его подачу в рабочее пространство конвертера по ходу плавки. Это потребовало бы дефрагментировать скрап и проводить тщательный отбор с целью получения кусков более или менее постоянных геометрических размеров. Кроме того, существующая система подачи материалов в конвертер исключает возможность ввода металлодобавок по ходу продувки.

С этих позиций физические свойства синтикома и их постоянство (форма, размеры, масса ит.д.) в сочетании с относительной небольшой их массой порядка 10-40 кг открывают возможности его подачи в конвертер по ходу плавки – дискретно или непрерывно. Естественно, что это требует внесения соответствующих изменений в конструкцию конвертера, необходимость которой становится все более очевидной.

Ввод синтикома по ходу продувки обеспечит снижение доли твердой шихты в исходной металлозавалке, степени охлаждения жидкого чугуна перед началом продувки. В предельном случае при полной замене лома синтикомом исходная металлошихта в конвертере будет состоять из одного жидкого чугуна неохлажденного ломом. Это означает переход от твердо-жидкого к жидкому старту с регулируемым охлаждением ванны по мере подъема температуры ее присадками синтикома. Достоинства такой технологии не требуют комментариев.

При вводе синтикома по ходу плавки появляется возможность резкого повышения эффективности его технологического воздействия на ход процесса выплавки конвертерной стали, в том числе в заключительный период продувки. Известно, что после снижения концентрации углерода в металле ниже критической величины, равной 0,15-0,35 %, скорость обезуглероживания ванны падает, а окисление железа резко возрастает. Эти негативные явления можно устранить путем ввода относительно небольших количеств синтикома в конце продувки при достижении критических концентраций углерода в ванне. Эффект технологического воздействия синтикома на процессы в ванне основан на способности углерода и оксидов железа синтикома вступать в реакцию между собой при их вводе в расплавленную металлическую ванну с образованием монооксида углерода в количестве 20-90 $\text{м}^3/\text{т}$ композита. Выделяющийся газ действует на ванну аналогично донной продувке, обеспечивая интенсивное объемное кипение ванны, ее перемешивание, интенсификацию окисления углерода.

С позиций изложенного синтиком в данном случае выполняет роль высокоэффективной технологической добавки, регулирующей тепловой баланс конвертерной плавки и режим главной реакции – процесса обезуглероживания.

В отличие от чугуна углерод в синтикоме начинает окисляться с момента начала расплавления. В результате этого окисление углерода в самом синтикоме и металлургической ванне и сопровождающее этот процесс выделение СО приобретает более равномерный характер. Это благоприятно влияет на технологию плавки.

Кроме того, это обеспечивает повышение степени дожигания СО до CO_2 и доли тепла дожигания, передаваемого ванне, а также увеличивает время теплообмена газов с ванной.

Повышенная эффективность использования углерода в синтикоме создает предпосылки для существенного увеличения энергопотенциала композита и использования его как источника дополнительной энергии. При

высоком исходном содержании углерода в синтикоме его энергопотенциал может сравняться с аналогичными показателями для твердого чугуна, составляющий примерно 170-200 кВтч/т или 612-720 МДж/т. Такой материал идеально отвечает условиям работы кислородных конвертеров на физически и химически холодных чугунах или полупродукте его внедоменной обработки.

Содержание кислорода в синтикоме марок СК25-СК30 достигает 62,5-75 кг/т материала. Это делает синтиком такого сортамента потенциальным источником кислорода для окисления примесей не только собственного чугуна синтикома, но и жидкого чугуна, в который введен композит. Например, при вводе в ванну 12 % синтикома марки СК25 количества кислорода, содержащегося в синтикоме, оказывается достаточным для окисления всех примесей чугуна синтикома и всех примесей природно-легированного ванадиевого чугуна, за исключением углерода. Для обычных передельных чугунов, отличающихся от природнолегированных существенно меньшим содержанием окисляемых примесей, требуемый расход синтикома значительно ниже. В частности, для удаления из чугуна 0,3 % кремния необходимый расход синтикома марки СК25 не превышает 55, а марки СК30 – 46 кг/т чугуна. Подчеркнем особо, что свойства синтикома делают возможным его ввод непосредственно в жидкий чугун и совместную подачу его в конвертер вместе с жидким чугуном. Это явление может найти использование в дальнейшем. Технология рафинирования чугунов с помощью синтикома уже прошла промышленную апробацию и может найти применение.

Проблемы, связанные с оставлением в конвертере жидкого шлака предыдущей плавки для повторного его использования хорошо известны. Основным недостатком такой технологии является возможность выбросов из конвертера при заливке жидкого чугуна на шлак вследствие взрывообразного характера взаимодействия углерода чугуна с оксидами железа жидкого шлака. При оставлении в конвертере более 20 – 25% шлака возникают также выбросы при продувке. Безопасность заливки чугуна на оставленный жидкий шлак можно обеспечить присадкой синтикома. За счет ввода композита с высокоуглеродистой основой достигается также раскисление шлака, его загущение и охлаждение. Кроме того, эта технология позволяет обеспечить раннее наведение шлака, интенсивное окисление фосфора, снизить расход извести, повысить выход железа, сократить тепловые потери со шлаком.

Значительная газотворная способность синтикома и высокая скорость окисления углерода в слитках синтикома, имеющих пониженную температуру плавления создают предпосылки для подъема шлака по футеровке конвертера с целью образования шлакового гарнисажа.

Рассмотрим взаимосвязанные между собой вопросы охлаждения конечного шлака и возможность его вспенивания с помощью синтикома на следующем примере. Пусть масса шлака, образовавшаяся за период плавки

стали в 375-т кислородном конвертере, составляет 50 тонн (13,3 % от максимальной садки). Согласно предлагаемой технологии по одному из ее вариантов в рабочем пространстве конвертера оставляется 50 % шлака образованного за период предыдущей продувки, то есть 25 т. Температура шлака в данном расчете принята равной 1700 °С. Определим количество физического тепла шлакового расплава при принятой температуре по формуле:

$$Q = m \cdot (0,298 \cdot T + 50),$$

где m — масса оставленного шлака, кг; T — температура оставленного шлака, °С; 0,298 — теплоемкость шлака, ккал/(кг·°С); 50 — скрытая теплота плавления шлака, ккал/кг.

Тогда в начальный момент времени

$$Q_{\text{нач}} = 25000 \cdot (0,298 \cdot 1700 + 50) = 13915000 \text{ ккал} = 58220,4 \text{ МДж.}$$

Определим величину физического тепла шлака при конечной температуре 1200°С:

$$Q_{\text{кон}} = 25000 \cdot (0,298 \cdot 1200 + 50) = 10190000 \text{ ккал} = 42635 \text{ МДж.}$$

Следовательно, для снижения температуры указанного количества шлака на 500°С от него необходимо отвести около 58220,4 – 42635 = 15585,4 МДж тепла.

Охлаждающая способность 1 тонны синтикома марки СК15 составляет примерно 430 кВт·ч или 1548,4 МДж, а аналогичный параметр для композита марки СК20 – 465 кВт·ч или 1674,5 МДж. Тогда для охлаждения оставленного в конвертере шлака до температуры затвердевания потребуется 15585,4/1548,4 = 10 тонн синтикома марки СК15 и 15585,4/1674,5 = 9,3 тонны композита СК20 или соответственно 0,4 и 0,37 тонны композиционных материалов на каждую тонну шлакового расплава. В пересчете на вместимость конвертера это составляет около 2,5 % от массы стали шихты.

Далее определим количество монооксида углерода, образующегося в результате взаимодействия компонентов синтикома. При содержании углерода в доменном чугуне 4,5 % композиты СК15 и СК20 содержат соответственно 3,83 и 3,6 % углерода. Тогда 10 тонн синтикома марки СК15 внесут 383 кг углерода, а 9,3 тонны композита СК20 – 335 кг углерода. При полном его окислении собственным кислородом из состава оксидов железа синтикома и кислорода оксидов железа шлака будет образовано 893,7 и 781,7 кг СО, соответственно. При плотности монооксида углерода равной 1,25 кг/м³ объем выделяющегося газа составит около 715 и 625 м³, соответственно. С учетом температурного расширения газов их объем возрастет не менее чем в 5 раз и составит соответственно 3575 и 3125 м³. Это почти на порядок больше объема рабочего пространства 375 т конвертера, не говоря уже об объеме всего конечного шлака равного 15,6 м³. Это создает предпосылки для использования синтикома не только в качестве охладителя

конечного конвертерного шлака, но и в качестве вспенивающего реагента, позволяющего за счет образующегося СО существенно увеличивать объем шлакового расплава и заставить его двигаться по футеровке конвертера вверх, формируя гарнисаж из застывшего шлака. В последнем случае температуру оставленного в конвертере шлака нельзя снижать более чем на $300 - 350^{\circ}\text{C}$ (конечная температура шлака должна составлять не менее $1350 - 1400^{\circ}\text{C}$), что уменьшает расход синтикома. Из этого следует, что расход синтикома на вспенивание шлака существенно ниже, чем для его охлаждения до температуры затвердевания.

На образование шлаковой пены и ее подъем по высоте рабочего пространства кислородного конвертера влияет не только общий запас газа, имеющийся в системе, но и интенсивность его выделения. Поэтому количество образующегося газа является необходимым, но недостаточным условием. Необходимо оценить интенсивность образования газов, которая определяется временем, требуемым для расплавления введенного в шлак синтикома.

Расчеты показали, что длительность расплавления единичных слитков синтикома в высоконагретом шлаковом расплаве не превышает 1 мин. Примем, что все количество одновременно введенного синтикома в шлак расплавится за 3 мин. В этом случае интенсивность газовыделения составит для синтикома марки СК15 $715/3 = 238,33 \text{ м}^3/\text{мин}$, а для синтикома марки СК20 $625/3 = 208,33 \text{ м}^3/\text{мин}$. С учетом объемного расширения газа в 5 раз данные значения значительно возрастут до 1190 и $1010 \text{ м}^3/\text{мин}$, соответственно. При диаметре конвертера 6,4 м площадь его поперечного сечения, равна $\pi D^2/4 = 0,785 \cdot 6,4^2 = 32,15 \text{ м}^2$. Отсюда средняя линейная скорость газа, отнесенная к этому сечению, составит для указанных выше марок синтикома соответственно 37 и 32 м/с .

Исходя из этих значений, продолжительность пребывания каждой порции образующегося газа в рабочем пространстве конвертера высотой 10 м составит 0,27 и 0,31, соответственно, в среднем 0,29 с. Возможная высота подъема конечного шлака составит: $H_{\text{кон}} - H_{\text{нач}} + t \cdot W = 0,48 + 0,29 \cdot (37 + 32) = 10,48 \text{ м}$.

Представленный расчет показывает, что выделение большого количества СО в результате окисления углерода синтикома и значительная интенсивность газообразования обеспечивают вспенивание шлака до уровня горловины конвертера. Согласно полученным данным для вспенивания шлака достаточно 3-4 т синтикома. Эта цифра существенно меньше расхода синтикома, требуемого для перевода шлака из жидкого в твердое состояние.

В заключение обратим внимание на огромную роль какую может играть в некоторых случаях пониженная температура плавления основы синтикома. В данном случае пониженные значения температуры плавления чугуна — металлической основы синтикома и весьма высокая температура плавления конечного шлака в конвертерной плавке резко ускоряют теплообмен между ними, расплавление синтикома и реакцию окисления углерода в нем. Благодаря этому скорость газообразования достигает больших значений.

Отмеченные факторы создают необходимые и достаточные условия для быстрого вспенивания шлака, его подъема на высоту конвертера и формирования гарнисажа из застывшего шлака.

Таким образом, выполненный расчет указывает на то, что введение в шлаковый расплав 375 т конвертера 3 – 4 т синтикома обеспечивает вспенивание шлака и его подъем. За счет этого открывается возможность формирования на футеровке конвертера гарнисажского слоя, состоящего из затвердевшего шлака. Однако это предположение требует экспериментальных исследований и проверки в производственных условиях.

Выводы

Апробация синтикома в кислородных конвертерах начиналась и продолжалась в весьма неблагоприятных условиях. Прежде всего, производимый материал не отвечал требованиям однородности и стабильности химического состава. Массовая доля окислителя колебалась от 3 – 5 до 25 – 27 %, соответственно этому в пределах одной партии свойства синтикома изменялись от окислительных до восстановительных, а энергопотенциал – от энергоносителя до охладителя. Помимо этого отсутствовало понимание того, что несмотря на общую металлическую основу с чугуном и относительно небольшое различие в содержании высокоуглеродистого сплава (100 % в чугуне и 75 – 95 % в композите), синтиком принципиально отличается от твердого чугуна, не говоря уже о железе прямого восстановления и металлоломе. Наличие одной и той же металлической основы у чугуна и синтикома интуитивно подталкивало к мысли о том, что методы их применения должны быть одинаковыми. В этой ситуации использования синтикома по сравнению с чугуном не могла даже прийти в голову. Новизна синтикома, совершенно другие его физико-химические свойства, их необычное сочетание сослужили синтикому недобрую службу. Поэтому полностью реализовать потенциал синтикома в это время не представлялось возможным.

Наряду с этими субъективными факторами определенную негативную роль сыграли и факторы времени. Черная металлургия была вынуждена искать свое место в новых условиях. Это не могло не сказаться отрицательно на продвижение синтикома. В настоящее время ситуация коренным образом изменилась. Металлолом, являющийся с момента зарождения конвертерного процесса главным охладителем плавки, перестал удовлетворять современным требованиям. Причем не только по чистоте от примесей цветных металлов, но и по своим физическим параметрам, в частности, насыпной плотности. В результате этого лом перестал помещаться в жидком чугуне и стал возвышаться над уровнем жидкого металла. Это привело к появлению нового периода в конвертерном процессе, а именно периода расплавления лома за счет сжигания железа вдуваемым кислородом. Иными словами, железо стало превращаться в топливо.

По этой причине характер конвертерной плавки изменился и приблизился к электродуговой печи. Особенностью конвертерного процесса при этом является необходимость расплавления лома, возвышающегося над жидким чугуном только за счет сжигания части железа, а не подвода электроэнергии как в электропечи. Элементарные расчеты показывают, что для перевода 1 т лома из твердого в расплавленное состояние требуется сжечь кислородом не менее 315 кг железа. Сказанное выше наводит на мысль о необходимости пересмотра роли металлолома как охладителя в конвертерном процессе и замене его на новые материалы. Непрерывное увеличение степени загрязненности, ухудшение физических свойств и технологичности лома в сочетании с дефицитом подтверждают необходимость разработки новых материалов. Одним из них является синтиком, представляющий альтернативу металлолому, твердому чугуну, железу прямого восстановления.

Результаты проведенных испытаний подтвердили принципиальную возможность и целесообразность применения синтикама в кислородных конвертерах в качестве металлошихты вместо части, а в случае необходимости и всего металлолома. Однако впереди предстоит еще большая работа.

Объединение отдельных компонентов в единый материал — синтиком устраняет недостатки, свойственные составляющим компонентам — твердому чугуну и железорудным окислителям при их раздельном применении. Это открывает новые возможности для эффективного использования в производстве стали таких традиционных материалов как твердый чугун и железорудные окислители, объединенных в единый материал.

Литература

1. Поживанов М.А., Шахпазов Е.Х., Свяжин А.Г. Выплавка стали для автолиста. М.: Интерконтакт Наука, 2006, 166 с.
2. Белянский А.Д., Рябов В.В. Труды третьего конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1996, с. 42 – 45.
3. Алымов А.А. Труды третьего конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1996, с.46 – 52.
4. Клочай В.Д., Зинченко С.Д., Кулешов В.Д. Труды третьего конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1996, с.76 – 80.
5. Чумаков С.М., Зинченко С.Д., Филатов М.В. и др. Труды пятого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1999, с. 63 – 65.
6. Чумаков С.М., Филатов М.В., Зинченко С.Д., Лятин А.Б. Труды шестого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2001, с. 41 – 45.
7. Чумаков С.М., Филатов М.В., Зинченко С.Д. и др. Труды шестого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2001, с. 55 – 57.
8. Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х., Югов П.И., Зинченко С.Д. Труды седьмого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2003, с. 80 – 83.
9. Дорофеев Г.А., Матвеев Л.З., Афонин С.З., Чумаков С.В. Труды шестого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2001, с.220 – 229.
10. Дорофеев Г.А., Матвеев Л.З., Афонин С.З., Чумаков С.М. Опыт использования синтикома при выплавке стали. Сталь, 2001, № 3, с.28 – 32.
11. Чумаков С.М., Югов П.И. Сталь, 1999, № 10, с.18 – 22.
12. Зинченко С.Д., Ефимов С.В., Краснов А.Д. и др. Труды девятого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2007, с.171 – 178.
13. Дорофеев Г.А., Руднев С.В., Шахпазов Е.Х., Афонин С.З., Галушка М. Труды восьмого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2007, с.111 – 112.
14. Дорофеев Г.А., Руднев С.В., Шахпазов Е.Х., Югов П.И. М.: Черметинформация, 2007, с.112 – 116.
15. Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавления процессов. М.: Металлургия, 1982, 160 с.
16. Патенты РФ №№ 2233890, 2150514, 2166549, 2288278, 2258745, 2280699, 2231558. Авт. Дорофеев Г.А., Шахпазов Е.Х., Афонин С.З.

Исследование технологии применения синтикома в конвертерном производстве

8.1. Моделирование процесса формирования металлозавалки

В качестве объекта исследования выбран 360 т кислородный конвертер с верхней подачей дутья завода “Хута-Катовице” (Польша).

Для исследований процесса формирования металлозавалки в рабочем пространстве кислородного конвертера было проведено физическое моделирование данного процесса для трех вариантов:

1) традиционный режим: 100 % стальном лом; 2) опытный режим: замена 50 % стального лома на синтиком (загрузка композиционного материала на днище конвертера под слой лома); 3) опытный режим: замена 50 % стального лома на синтиком (загрузка композиционного материала на слой металлолома).

Стандартный состав шихты на заводе “Хута-Катовице”: 280000 кг (77,78 %) — жидкого чугуна; 80000 кг (22,22 %) — стального лома.

Опытный вариант выбран согласно расчетам сопряженных материально-тепловых балансов процесса выплавки стали в кислородном конвертере, которые показали возможность использования до 50 % синтикома марки СК15 в составе твердой металлозавалки взамен стального лома в пропорции 1:1 без изменения базового режима ведения плавки. Приведенная марка синтикома является аналогом стального лома по охлаждающей способности.

В ходе моделирования варьировали насыпными плотностями лома, характерными для существующих производственных условий (600 – 1800 кг/м³). Насыпная плотность композиционного материала СК15 2700 кг/м³. В качестве замены реальных шихтовых материалов, а именно жидкого чугуна, стального лома и синтикома, использовали соответственно воду с добавкой NaCl, пластилин с добавками наполнителя для уменьшения его плотности и парафин.

Для проведения исследований была построена физическая модель 360 т кислородного конвертера, объем которой меньше реального в 640000 раз с сохранением основных геометрических размеров и которая представляет собой прозрачный сосуд [1].

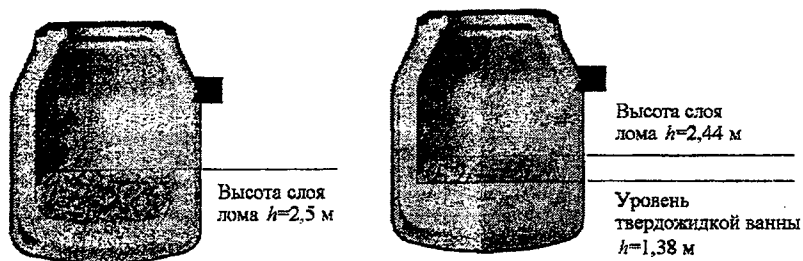


Рис.8.1. Формирование металлозавалки по традиционной технологии: а — стальной лом, б — стальной лом, жидкий чугун.

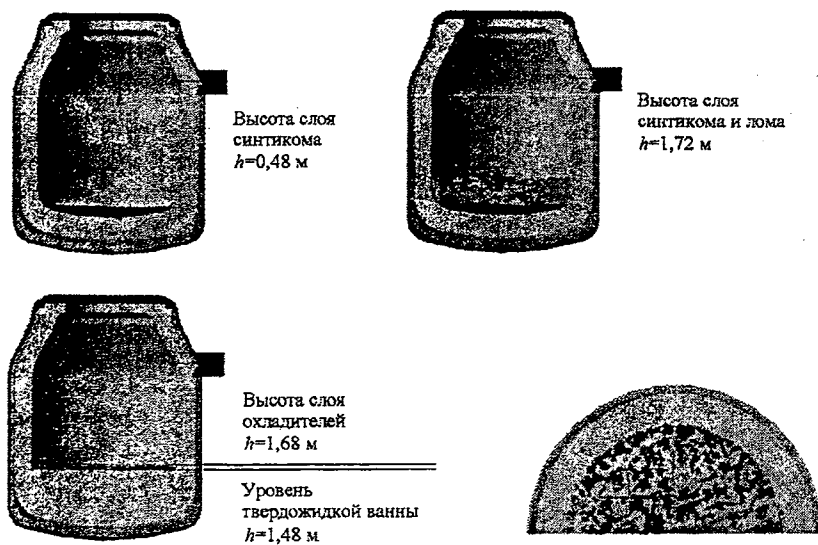


Рис.8.2. Формирование металлозавалки по опытной технологии: а — синтетиком; б — синтетиком, лом; в — синтетиком, лом, жидкий чугун; г — синтетиком, жидкий чугун (вид сверху).

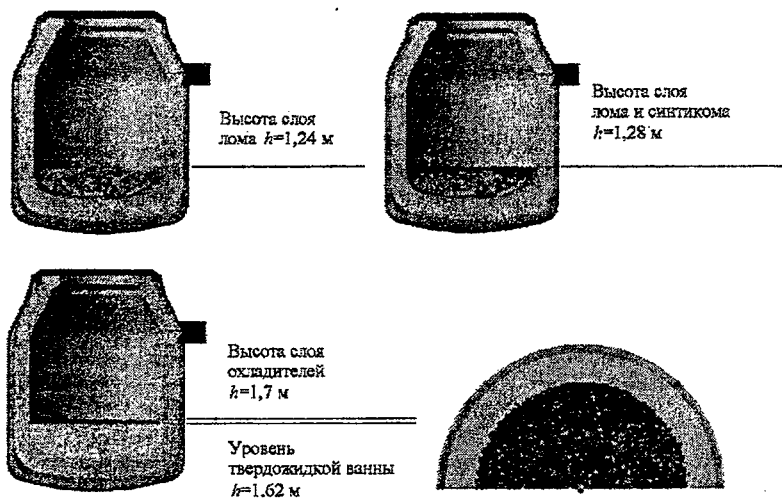


Рис.8.3. Формирование металлозавалки по опытной технологии: а — стальной лом; б — лом, синтиком; в — лом, синтиком, жидкий чугун; г — лом, синтиком, жидкий чугун (вид сверху).

В качестве примера на рис.8.1, 8.2, 8.3 представлены компьютерные модели технологических режимов загрузка шихты, при которых насыпной вес стального лома составлял $\sim 1000 \text{ кг/м}^3$.

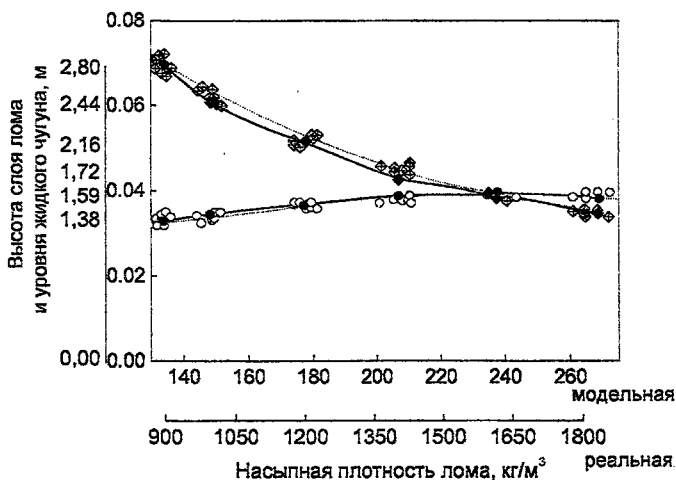


Рис.8.4. Зависимости изменения высот шихтовых материалов от насыпной плотности стального лома по традиционной технологии.

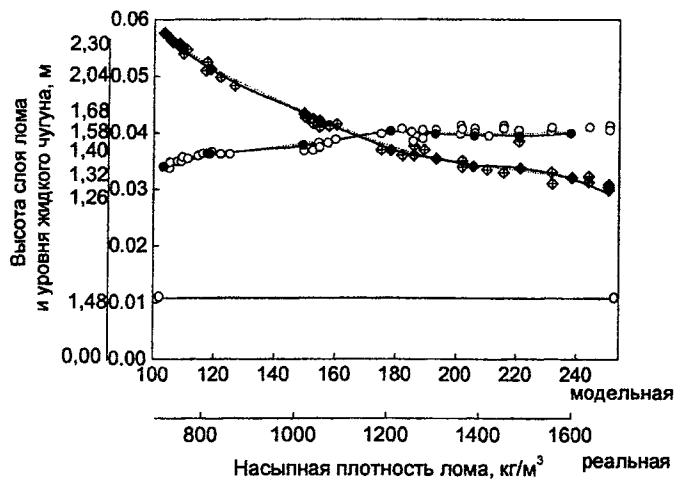


Рис.8.5. Зависимости изменения высот шихтовых материалов от насыпной плотности лома по опытной технологии (синтиком на днище конвертера).

На основе результатов физического моделирования и их статистической обработки получены регрессионные уравнения и построены графики (рис.8.4; рис.8.5; рис.8.6), описывающие зависимость изменения уровня твердожидкой ванны и высоты слоя стального лома от его физических характеристик.

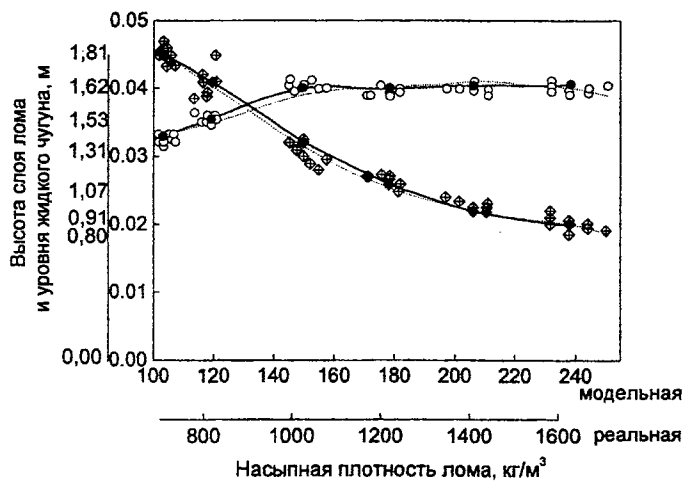


Рис.8.6. Зависимости изменения высот шихтовых материалов от насыпной плотности лома по опытной технологии (синтиком на слой металлолома).

Моделирование традиционного режима загрузки шихты (см. рис.8.2) показало, что физические свойства материала-охлаждителя определяют формирование структуры металлошихты в рабочем объеме сталеплавильного агрегата.

Уравнения, описывающие изменения высоты уровня железоуглеродистого расплава и высоты слоя лома по традиционной технологии, имеют вид:

$$\begin{cases} Y_{H_{ж/чуг}} = 0,023053 - 0,036874x_{\rho_{лома}} - 0,036398x_{H_{лома1}} - 0,005185x_{H_{лома}} + \\ + 0,010818x_{\rho_{лома}}^2 + 0,007184x_{H_{лома}}^2 - 0,002711x_{H_{лома}}^2 \end{cases} \quad (8.1)$$

$$\begin{aligned} Y_{H_{лома}} = & 0,070043 + 0,050056x_{\rho_{лома}} + 0,071821x_{H_{лома1}} - \\ & - 0,010945x_{\rho_{лома}}^2 - 0,008552x_{H_{лома1}}^2 \end{aligned} \quad (8.2)$$

где $x_{лома1}$ — высота слоя лома после заливки жидкого чугуна, м; $Y_{H_{ж/чуг}}$ — высота уровня жидкого чугуна с учетом погруженного охладителя, м; $x_{\rho_{лома}}$ — плотность лома; кг/м³; $x_{H_{лома}}$ — высота слоя лома до заливки жидкого чугуна, м.

Как показывает график, представленный на рис.8.4, при использовании стального лома с физическими свойствами, характерными для существующих производственных условий, то есть с насыпной плотностью в интервале 600 – 1000 кг/м³, формируется высокая, неравномерная и хаотичная структура твердой металлозавалки, в том числе над уровнем ванны. Ее высота составляет до 40 – 45 % от суммарной высоты твердой металлошихты. Использование стального лома с плотностью, близкой к 1600 кг/м³ и выше, обеспечивает формирование более равномерной и прогнозируемой структуры металлозавалки.

При замене части металлолома на синтиком с загрузкой слитков на днище конвертера структура металлозавалки определяется физическими свойствами комплексной металлошихты (см.рис.8.4).

Данный технологический режим, при использовании металлолома с аналогичными физическими характеристиками, способствует снижению ее суммарной высоты. При этом слитки синтика на днище конвертера формируют плотный, равномерный, не проницаемый для лома слой. Однако над уровнем твердожидкой ванны формируется хаотичная структура твердой комплексной металлошихты, состоящая преимущественно из лома и частично слитков синтика (см. рис.8.5).

Уравнения, описывающие изменения высоты уровня железоуглеродистого расплава и высоты слоя лома по опытной технологии с загрузкой синтика на днище конвертера:

$$\begin{cases} Y_{H_{ж/чуг}} = 0,065895 - 0,068099x_{H_{лома}} - 0,056742x_{P_{лома}} - 0,002422x_{H_{лома}} - \\ - 0,02070705x_{H_{лома}}^2 - 0,014536x_{P_{лома}}^2 + 0,000253x_{H_{лома}}^2 \end{cases} \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} Y_{H_{лома}} = & 0,031151 + 0,016089x_{H_{лома1}} - 0,027438x_{P_{лома}} + \\ & + 0,011461x_{H_{лома}}^2 + 0,005905x_{P_{лома}}^2 \end{aligned} \quad (8.4)$$

В зависимости от насыпной плотности лома и структуры слоя твердой металлошихты при заливке жидкого чугуна с днища конвертера сквозь пустоты в ее объеме подвсплывают слитки синтикома, ввиду различия истинных плотностей материалов (железоуглеродистого расплава и синтикома). Это вызывает колебание уровня твердожидкой ванны. С увеличением плотности стального лома более 1150 кг/м³ суммарная высота металлозавалки снижается.

Режим с загрузкой синтикома на слой лома обеспечивает формирование более компактной структуры комплексной металлозавалки при его меньших насыпных плотностях по сравнению с традиционным. Он способствует максимальному погружению кусков лома в объем железоуглеродистого расплава за счет эффекта их "подпрессовки" в процессе загрузки композиционного материала, с последующим формированием равномерного, плотного "защитного" слоя из слитков синтикома (см. рис.8.3).

Представленный на рис.8.6 график показывает, что при насыпной плотности лома до 880 кг/м³ над уровнем ванны формируется слой комплексной металлошихты, который преимущественно состоит из слитков синтикома. С увеличением насыпной плотности лом полностью погружается в железоуглеродистый расплав, синтиком равномерно распределяется на поверхности твердожидкой ванны.

Данный режим шихтообразования по результатам моделирования является оптимальным не только с позиций рационального использования рабочего объема сталеплавильного агрегата и возможности переработки традиционного металлического лома, но и создания новых условий для протекания основных процессов конвертерной плавки, прежде всего процесса ее "зажигания".

Уравнения, описывающие изменения высоты уровня железоуглеродистого расплава и высоты слоя лома по опытной технологии с загрузкой синтикома на слой стального лома:

$$\begin{cases} Y_{H_{ж/чуг}} = 0,49507 + 0,025626x_{P_{лома}} + 0,020966x_{H_{лома1}} - 0,002533x_{H_{лома}} - \\ - 0,003309x_{P_{лома}}^2 - 0,010801x_{H_{лома1}}^2 - 0,00145x_{H_{лома}}^2 \\ Y_{H_{лома}} = 0,036618 + 0,008156x_{P_{лома}} + 0,021071x_{H_{лома1}} + 0,001242x_{P_{лома}}^2 - \\ - 0,005964x_{H_{лома1}}^2 \end{cases} \quad (8.5)$$

Анализ механизма “зажигания” конвертерной плавки с традиционным режимом шихтообразования показал, что начало плавки характеризуется неорганизованным взаимодействием кислорода дутья с ломом, ввиду хаотичного его расположения. “Старт” плавки сопровождается активным окислением железа металлошихты на поверхности лома и выделением огромного количества тепла в локальных участках, температура в которых достигает температуры кипения железа. В результате этого лом расплавляется. Однако процесс расплавления сопровождается интенсивным испарением железа и последующим выносом его частиц потоками отходящих газов, в том числе не усвоившимся кислородом дутья.

При использовании в составе традиционной металлошихты синтикома с загрузкой на слой лома “старт” плавки начинается раньше, так как матрица синтикома имеет более низкую температуру плавления по сравнению со стальным ломом. Слитки синтикома равномерно распределяются над уровнем твердожидкой ванны, увеличивая полезную площадь взаимодействия со струями кислорода дутья и повышая степень их усвоения. Нагрев и плавление синтикома сопровождается активным окислением углерода, носящим в синтикоме эндотермический характер [2], что снижает температуру в зоне дутья и уменьшает окислительную способность атмосферы агрегата. В этом случае синтиком выполняет роль холодильника. В целом это снижает угар и испарение железа металлошихты, обеспечивая тем самым повышение выхода железа.

Начальное положение фурмы относительно днища конвертера для разных вариантов формирования металлозавалки, как установлено при моделировании, изменяется в пределах от 4,4 до 3,66 м. При этом максимальное значение соответствует режиму с использованием 100 % стального лома с насыпной плотностью 1000 кг/м^3 , а минимальная – использованию синтикома с его загрузкой на слой лома.

Результаты выполненных исследований показали, что технологический режим формирования металлозавалки с использованием синтикома с его с загрузкой на слой стального лома создает предпосылки для улучшения технологии конвертерной плавки. Эта технология позволит вести плавку на ломе с физическими свойствами, характерными для существующих производственных условий (насыпная плотность $\sim 600 - 1000 \text{ кг/м}^3$) без изменения дутьевого режима, а также сократить количество выносов оксидов железа, снизив тем самым вредное воздействие на экосистему.

На основе выполненных исследований разработан, с помощью Excel, расчет основных параметров формирования металлозавалки, а именно высоты слоя твердых охладителей и уровня жидкой ванны в зависимости от качественных характеристик металлошихты. Результаты расчета позволяют прогнозировать физическую картину распределения твердых материалов — охладителей и изменение уровня твердожидкой ванны, а также положение фурмы в начальный момент плавки при разных технологических и производственных условиях конвертерного цеха.

8.2. Методика проведения опытных плавов в 360 т конвертере

Для проведения испытаний была поставлена партия синтикома марки СК15 производства ОАО Липецкий металлургический завод "Свободный Сокол" массой 1500000 кг. Химический состав партии и физические характеристики материала приведены в табл. 8.1 и 8.2.

Синтиком производства ОАО ЛМЗ "Свободный Сокол" представляет собой слитки с геометрической формой в виде усеченной пирамиды. Материал изготовлен на разливочной машине с использованием железорудных окатышей производства Лебединского ГОКа [3].

Промышленные испытания синтикома были разбиты на восемь серий.

Первая серия плавов проведена при следующем составе шихты: жидкий чугун — 280000 кг; стальной лом — 74700 кг; синтиком — 5000 кг. Всего в данной серии выполнено 3 плавки. Результаты, полученные в ходе проведения первой серии, подтвердили возможность использования синтикома при выплавке стали в кислородном конвертере и замены им стального лома в пропорции 1:1.

Вторую серию плавов производили при следующем составе металло-шихты: жидкий чугун — 267500 кг; стальной лом — 65000 кг; синтиком — 10000 кг. В этой серии произведены две плавки. При этом на плавке №313560 в конвертер было отдано 35000 кг жидкой стали с разливки, а расход жидкого чугуна был снижен до 255000 кг.

Загрузку шихты на данной серии плавов проводили в следующей последовательности. На днище конвертера отдавали известь и доломит. Затем на слой флюсов загружали стальной лом и на него отдавали синтиком. Загрузку твердого охладителя (лома и синтикома) осуществляли двумя или

Таблица 8.1

Химический состав синтикома марки СК15, % масс.					
FeO	Fe ₂ O ₃	Fe _{общ}	SiO ₂	CaO	C
0,2 – 0,4	10,9 – 16,1	88,1 – 91,6	0,6 – 1,4	0,1 – 0,4	3,6 – 4,0
Si	Mn	P	S	Прочие	
0,3 – 1,1	0,1 – 0,4	0,03 – 0,06	0,01 – 0,04	0,1 – 0,3	

Таблица 8.2

Физические характеристики синтикома марки СК15					
Марка	Содержание основных компонентов, %		Плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Масса слитка, кг
	Чугун	Твердые окислители			
СК15	85±1,5	15±2,5	5700 – 5900	2700 – 3100	8 – 10

тремя совками в зависимости от количества применяемого на плавке легковесного стального лома. После окончания загрузки конвертер несколько раз наклоняли с целью перемешивания шихты.

После проведения первой и второй серии экспериментов доля синтикома СК15 в шихте была увеличена до 15000 кг на плавку. С учетом этого состав шихты в третьей серии опытно-промышленных плавов был следующим: жидкий чугун — 281050 кг; лом — 59500 кг; синтиком — 15000 кг. Загрузка шихтовых материалов осуществлялась аналогично первым двум сериям. Всего проведено 10 плавов.

Вследующем, четвертой серии, доля синтикома в шихте была увеличена до 25000 кг на плавку. Эта серия плавов проведена при следующем составе шихты: жидкий чугун — 277500 кг; лом — 53000 кг; синтиком — 25000 кг. Количество выполненных плавов — 10.

После завершения четвертой серии экспериментов долю синтикома в шихте увеличили до 30000 кг на плавку. Основные результаты первой плавки показали возможность дальнейшего увеличения доли синтикома в составе твердой металлозавалки до 35000 кг на плавку.

Состав металлошихты на шестой серии плавов: жидкий чугун — 275000 кг; лом — 424000 кг; синтиком — 35000 кг. Особенностью этой серии плавов являлось варьирование места расположения синтикома и стального лома при формировании твердой металлозавалки.

На плавке № 333500 загрузку шихты осуществляли в следующей последовательности. Известь и доломит вводили на днище конвертера. Затем был загружен один совок стального лома. Синтиком — давали сверху на слой стального лома вторым совком. На плавке № 333501 композит был загружен в конвертер в нижние слои шихты непосредственно после подачи извести и доломита.

На плавках № 333502 и № 333503 синтиком загрузили между слоями стального лома. Загрузка производилась в следующей последовательности. На слой извести и доломита был отдан совок с легковесным стальным ломом. Затем на слой лома вторым совком загружали синтиком, после чего в конвертер ввели третий совок с тяжеловесным стальным ломом. Такое варьирование загрузки твердой металлошихты открывало возможность найти оптимальное расположение синтикома с позиций получения низкого содержания фосфора в выплавляемой стали, повышенного выхода железа и достижения равномерной скорости окисления углерода по ходу продувки.

В соответствии с полученными данными оптимальной плавкой по расположению шихтовых материалов была признана плавка № 333500 с размещением синтикома в верхних слоях шихты. По результатам этих исследований было принято решение в дальнейшем (шестая серия) на всех плавках размещать шихтовый композиционный материал поверх стального лома.

Всего в этой серии с массой синтикома на плавку 35000 кг проведено 5 опытно-промышленных плавов. Данные, полученные в ходе проведения этой серии, показали возможность дальнейшего увеличения доли синтикома

в составе шихты конвертерной плавки. Поэтому было принято решение о проведении седьмой серии опытно-промышленных плавов с расходом композиционного материала 40000 кг на плавку или 50 % от массы твердой шихты. Состав металлошихты на седьмой серии исследовательской работы: жидкий чугун — 278000 кг; лом — 40000 кг; синтиком — 40000 кг. Количество плавов в седьмой серии — 5.

Использование 40000 кг синтикома в завалку не вызвало каких-либо технологических затруднений и не потребовало изменения дутьевого режима. Это подтвердило результаты ранее проведенных расчетов сопряженных материально-тепловых балансов. В связи с этим после проведения седьмой серии плавов была опробована технология плавки с расходом синтикома 45000 кг на плавку (восьмая серия). При среднем составе металлошихты 280000 кг — жидкого чугуна, 33300 кг стального лома и 45000 кг синтикома всего было проведено три опытно-промышленные плавки стали. При этом на плавке № 333508 после окончания продувки с расходом кислорода около 17000 м³ содержание углерода в металле составило 0,06 %, а температура ванны (первый замер) — 1634°C. Оба эти фактора вынудили произвести додувку плавки с расходом кислорода около 590 м³. На плавке № 333509 после окончания продувки получен металл с содержанием углерода 0,044 % и температурой 1642°C. Расход кислорода на этой плавке составил 17716 м³. После корректировки дутьевого режима была проведена плавка № 333510 с расходом кислорода 17263 м³. При этом на плавке № 333510 получен весьма высокий выход жидкой стали на уровне 94,21 % при сохранении других показателей на уровне показателей текущего производства.

Основные технологические параметры выплавки стали в кислородном конвертере с использованием в шихте синтикома марки СК15 поплавно и в среднем по массиву плавов приведены в табл.8.3. Химический состав выплавленной стали с использованием в шихте различного количества этого материала представлен в табл.8.4. Результаты статистической обработки опытных и контрольных плавов приведены в табл.8.5 и 8.6.

Сравнительная характеристика основных параметров выплавки стали в кислородном конвертере с использованием синтикома и по традиционной технологии на 100 % лома представлена в табл.8.7.

Таблица 8.3

Основные параметры плавов в кислородном конвертере с использованием синтикома марки СК15

№ плавки	Масса жидкого чугуна, кг	Масса легк. лома, кг	Масса тяж. лома, кг	Масса прочих видов лома, кг	Сумм. расход лома, кг	Масса СК15, кг	Температура чугуна, °С	Масса стали (без учета расхода ферросплавов), кг	Т _{стали} , °С	Выход стали, %	Расход О ₂ , м ³	Время продувки, Мин.	Основность шлака	(FeO), % мас.	Масса извести, кг	Масса доломита, кг	[C] в стали, % мас.
313559	280000	33000	37000	0	70000	5000	1356	324700	1679	92,05	16809	17	4,3	21,8	11000	3000	0,045
313560	2555000	31000	29000	0	60000	1000	1341	322050	1689	89,87	16549	20	1,8	25,7	9000	3000	0,032
313561	280000	27000	33000	0	60000	15000	1358	314500	1624	89,56	16062	17	4,2	22,1	10000	3000	0,046
333462	280000	27000	48000	0	75000	5000	1335	324000	1692	89,66	17210	17	3,3	20,5	16000	3000	0,049
333463	280000	40000	24000	15000	79000	5000	1351	309230	1637	86,93	18227	20	3,6	20,2	10000	3000	0,047
333465	280000	35000	35000	0	70000	10000	1367	321520	1676	89,84	16584	19	4,1	23,8	10000	3000	0,037
333466	280000	26000	34000	0	60000	15000	1340	309400	1644	87,59	15945	16	3,4	24,8	10000	3000	0,038
333468	285000	44000	11000	0	55000	15000	1360	321210	1670	91,38	17286	18	3,9	25	8000	3000	0,04
333469	285500	24000	26000	10000	60000	15000	1356	326800	1653	92,22	16817	17	4,5	27,1	9000	3000	0,041
333470	285000	26000	20000	9000	55000	15000	1363	330200	1639	92,54	17588	18	4,5	27	9000	3000	0,047
333471	280000	25000	25000	10000	60000	15000	1358	320400	1683	90,87	17388	17	4,6	25,4	12000	3000	0,037
333479	280000	45000	15000	0	60000	15000	1354	298200	1640	84,9	16689	17	2,7	Н.Д.	10000	3000	0,04
333480	280000	30000	30000	0	60000	15000	1345	324320	1650	91,74	16288	16	3,6	27,6	8000	3000	0,33
333481	275000	26000	24000	15000	65000	15000	1388	302800	1651	87,24	15900	15	4,3	26,6	8000	3000	0,034
333482	280000	41000	19000	0	60000	15000	1360	324960	1688	91,94	16919	17	4,3	25,7	8000	3000	0,031
333483	275000	7000	20000	25000	52000	25000	1369	326920	1624	93,5	15656	17	2,7	15,2	9000	3000	0,051
333484	275000	24000	31000	0	55000	25000	1368	327700	1616	92,49	16684	22	2,9	18,5	8000	3000	0,04
333485	280000	38000	15000	0	53000	25000	1389	313700	1663	88,13	16860	17	3,4	23,1	10000	3000	0,037
333486	275000	35000	20000	0	55000	25000	1357	330600	1620	93,8	17217	18	2,9	24,1	8000	3000	0,041
333487	275000	35000	20000	0	55000	25000	1415	305400	1646	87,65	17334	17	2,9	25,1	12000	3000	0,04
333488	275000	26000	29000	0	55000	25000	1404	331900	1641	93,65	17504	17	3,9	20,9	10000	3000	0,041
333489	275000	39000	16000	0	55000	25000	1370	311800	1647	87,04	17135	16	3,4	27,7	8000	3000	0,035
333490	280000	35000	15000	0	50000	25000	1359	322000	1650	91,09	17535	17	3,5	26,6	8000	3000	0,043
333491	280000	30000	20000	0	50000	25000	1379	315300	1707	89,01	17301	18	3,5	25,2	8000	3000	0,041
333499	285000	17000	23000	10000	50000	25000	1359	313870	1630	88,99	19632	19	2,9	26,5	13000	3000	0,043
Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	88,78	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	29,8	Н.Д.	Н.Д.	0,0492
333500	280000	40000	5000	0	45000	35000	1382	323000	1677	93,1	18280	17	3,5	21,7	9000	3000	0,042

Таблица 8.3 (продолжение)

№ плавки	Масса жидкого чугуна, кг	Масса легк. лома, кг	Масса тяж. лома, кг	Масса прочих видов лома, кг	Сумм. расход лома, кг	Масса СК15, кг	Температура чугуна, °С	Масса стали (без учета расхода ферросплавов), кг	T _{стали} , °С	Выход стали, %	Расход О ₂ , м ³	Время продувки, Мин.	Основность шлака	(FeO), % мас.	Масса извести, кг	Масса доломита, кг	[C] в стали, % мас.
3501	275000	18000	18000	6000	42000	35000	1401	326470	1635	92,89	16726	17	2,8	15,6	10000	3000	0,05
3502	275000	19000	21000	0	40000	35000	1347	311800	1682	89,93	17142	17	2,4	21,3	8000	3000	0,04
3503	280000	40000	0	0	40000	35000	1372	333100	1648	92,5	16817	16	Н.д.	19	8	3000	0,045
3504	265000	20000	25000	0	45000	35000	1327	333600	1659	93,54	17680	16	Г.д.	14,6	12	3000	0,039
3505	275000	10000	35000	0	45000	40000	1371	328700	1659	91,4	16454	17	3,8	15,8	10	3000	0,052
3506	275000	34000	6000	0	40000	40000	1366	327310	1645	90,65	16699	17	3,6	21,9	10	3000	0,087
3507	280000	30000	10000	0	40000	40000	1350	328850	1626	90,3	18561	17	2,8	18,6	13	3000	0,061
3508	280000	24000	11000	0	35000	45000	1381	328600	1635	91,52	17591	18	3	17,9	10	3000	0,062
3509	280000	35000	0	0	35000	45000	1332	307400	1642	86,01	17716	17	2,6	21,5	8	3000	0,044
3510	280000	25000	5000	0	30000	45000	1383	333000	1673	94,21	17263	17	2,6	21,6	10	3000	0,043
3511	280000	27000	13000	0	40000	40000	1340	338640	1650	91,75	17508	17	2,7	21,8	10	30000	0,058
3512	280000	25000	10000	0	35000	40000	1399	323990	1642	91,17	16859	19	3,7	14,5	12	3000	0,057
Итого	10565500	1113000	7780000	100000	1991000	975000	51852	12218600	62832	3441,66	650415	661	124,8	862,8	372	114000	1,7382
в среднем	278040	29289,5	20473,7	12500	52394	25000	1364,53	3214600	1653,5	90,57	17116,8	17,39	3,37	22,12	9,79	3000	0,044

Таблица 8.4

Химический состав металла по окончании продувки на плавках
с заменой части стального лома на синтиком марки СК15

№ плавки	C*	Mn*	P*	S*	A[O]ppm	T стали, °C
313559	0,045	0,062	0,013	0,024	645	1679
313560	0,032	0,054	0,018	0,017	1138	1689
313561	0,046	0,072	0,01	0,015	580	1624
333462	0,049	0,15	0,016	0,019	596	1692
333463	0,047	0,066	0,008	0,029	896	1637
333465	0,037	0,06	0,016	0,017	911	1676
333466	0,038	0,088	0,017	0,02	667	1644
333468	0,04	0,083	0,014	0,026	920	1670
333469	0,041	0,054	0,012	0,026	860	1653
333470	0,047	0,051	0,009	0,019	650	1639
333471	0,037	0,073	0,015	0,018	1070	1683
333479	0,04	0,04	0,012	0,021	945	1640
333480	0,033	0,043	0,014	0,022	869	1650
333481	0,034	0,055	0,015	0,02	720	1651
333482	0,031	0,057	0,017	0,016	1101	1688
333483	0,051	0,076	0,014	0,021	571	1624
333484	0,04	0,072	0,009	0,016	680	1616
333485	0,037	0,06	0,012	0,015	970	1663
333486	0,041	0,047	0,012	0,021	790	1620
333487	0,04	0,067	0,012	0,015	800	1646
333488	0,041	0,049	0,012	0,017	1010	1641
333489	0,035	0,041	0,011	0,018	1108	1647
333490	0,043	0,051	0,011	0,017	840	1650
333491	0,041	0,058	0,016	0,014	1080	1707
3334999	0,043	0,045	0,008	0,013	734	1630
Н.д.	0,0492	0,0818	0,0212	0,0175	Н.д.	Н.д.
333500	0,042	0,055	0,013	0,012	895	1677
333501	0,05	0,079	0,022	0,026	642	1635
333502	0,04	0,065	0,014	0,014	640	1682
333503	0,045	0,081	0,018	0,019	665	1648
333504	0,039	0,07	0,012	0,014	736	1659
333505	0,052	0,083	0,014	0,014	690	1659
333506	0,08	0,078	0,015	0,025	Н.д.	1645
333508	0,062	0,072	0,011	0,017	508	1635
333509	0,044	0,045	0,013	0,021	Н.д.	1642
333510	0,043	0,057	0,017	0,017	1056	1673
333511	0,058	0,061	0,012	0,016	508	1650
333512	0,057	0,066	0,012	0,017	Н.д.	1642
Сумма	1,7382	2,5418	0,5272	0,7265	27491	62832

* — % масс.

Таблица 8.5

Основные параметры плавов в кислородном конвертере по традиционной технологии

№ плавки	Масса жидкого чугуна, кг	Масса легк. лома, кг	Масса тяж. лома, кг	Масса прочих видов лома, кг	Сумм. расход лома, кг	Температура чугуна, °С	Масса стали (без учета расхода ферро-сплавов), кг	Температура стали, °С	Выход жидкой стали, %	Основность шлака	(FeO), % мас.	Масса извести, кг	Масса доломита, кг	[C] в стали, % мас.
333472	285000	43000	37000	0	80000	1356	312900	1648	86,66	4,3	25,4	10000	3000	0,042
333473	280000	32000	48000	0	38000	1349	325100	1602	91,07	4,4	19,7	10000	3000	0,043
333474	275000	24000	41000	5000	70000	1371	317400	1684	91,72	4,5	22,8	12000	3000	0,043
333475	270000	35000	40000	0	75000	1360	301300	1680	88,21	4,3	27,7	9000	3000	0,041
333476	285000	20000	40000	10	70000	1308	338400	1658	94,91	6,8	28	11000	3000	0,061
333477	280000	35000	45000	0	80000	1333	349500	1653	96,56	4,9	31,4	12000	3000	0,045
333478	280000	34000	41000	0	375000	1351	331500	1649	94,06	2,9	12,5	8000	3000	0,043
333454	280000	55000	25000	0	80000	1370	310400	1618	87,53	4,3	23,2	8000	3000	0,052
333455	280000	35000	35000	10000	80000	1392	323900	1637	90,58	3,5	18,3	12000	3000	0,079
333456	280000	49000	31000	0	80000	1405	328600	1642	91,34	2,7	19,4	9000	3000	0,04
333457	280000	42000	28000	10000	80000	1401	325200	1641	91,41	3,7	14,7	10000	3000	0,04
333458	280000	54000	26000	0	80000	1387	317000	1648	89,08	4,2	19,2	12000	3000	0,062
333459	280000	48000	22000	10000	80000	1400	316500	1661	89,09	4,1	18,1	10000	3000	0,045
333460	280000	34000	41000	0	75000	1386	312200	1661	88,65	3,9	17,8	14000	3000	0,045
333461	280000	36000	44000	0	80000	1391	313200	1671	87,86	3,7	20,2	6000	3000	0,035
333464	280000	35000	45000	0	80000	1368	319600	1681	89,37	3,5	20,1	10000	3000	0,04
333467	280000	30000	50000	0	80000	1357	306100	1621	85,69	Н.д.	Н.д.	10000	3000	0,029
333492	285000	27000	38000	10000	75000	1340	313800	1679	87,71	3,7	23,6	9000	3000	0,044
333493	280000	60000	20000	0	80000	1353	317700	1643	89,09	4,6	30	11000	3000	0,04
333494	280000	38000	42000	0	80000	1379	313900	1680	87,63	4,8	23,6	11000	3000	0,043
333495	280000	34000	51000	0	85000	1383	331800	1681	91,25	4,9	17,9	12000	3000	0,05
333496	285000	10000	65000	0	75000	1377	319000	1687	87,94	4,8	17,7	12000	3000	0,04
333497	275000	40000	40000	0	80000	1350	306000	1628	86,8	5,3	32,5	11000	3000	0,043
333498	275000	55000	30000	0	85000	1377	306100	1660	86,25	Н.д.	Н.д.	10000	3000	0,041
313569	21000	49000	0	70000	1331	333200	333200	1633	92,21	6	22,4	13000	3000	0,051
313570	275000	41000	39000	0	80000	1382	308000	1663	87,56	4,5	20,8	12000	3000	0,056

Таблица 8.5 (продолжение)

№ плавки	Масса жидкого чугуна, кг	Масса легк. лома, кг	Масса тяж. лома, кг	Масса прочих видов лома, кг	Сумм. расход лома, кг	Температура чугуна, °С	Масса стали (без учета расхода ферро-сплавов), кг	Температура стали, °С	Выход жидкой стали, %	Основность шлака	(FeO), % мас.	Масса извести, кг	Масса доломита, кг	[C] в стали, % мас.
313571	285000	19000	51000	0	70000	1368	327900	1704	92,02	4,9	21,6	13000	3000	0,034
313572	275000	60000	20000	0	80000	1381	311900	1664	89,22	4	24,6	8000	3000	0,04
313573	275000	58000	22000	0	80000	1372	322700	1662	92,38	3,6	17,4	9000	3000	0,04
313574	285000	28000	42000	0	70000	1385	312000	1637	88,29	6,3	20	12000	3000	0,043
313576	285000	24000	46000	0	70000	1358	306900	1687	86,27	5,2	15,8	13000	3000	0,044
313582	285000	33000	37000	0	70000	1356	321800	1685	90,55	4,1	20,5	12000	3000	0,038
313596	275000	38000	47000	0	85000	1376	315800	1617	88,3	4,1	20,6	11000	3000	0,048
313580	285000	29000	41000	0	70000	1359	322700	1657	90,74	4,3	24,3	12000	3000	0,035
313581	280000	47000	33000	0	80000	1385	319900	1635	88,91	3,9	24,1	11000	3000	0,048
313610	280000	34000	46000	0	80000	1348	318400	1643	89,13	3,4	23,4	11000	3000	0,037
313611	275000	30000	45000	0	75000	1348	292400	1669	83,87	Н.д.	Н.д.	10000	3000	0,036
Сумма	10365000	1367000	1443000	550000	2865000	50593	11770810	61269	3309,9	148,1	739,3	396000	111000	1,636
Среднее	280135,1	36945,9	39000	14864,9	77432,4	1367,39	318130	1655,9	89,46	4,36	21,74	10702,7	3000	0,04

Таблица 8.6

Химический состав металла по окончании продувки на плавку
по традиционной технологии

№ плавки	C*	Mn*	P*	S*
333472	0,042	0,05	0,01	0,018
333473	0,043	0,07	0,01	0,018
333474	0,043	0,06	0,009	0,015
333475	0,041	0,07	0,012	0,021
333476	0,061	0,08	0,009	0,019
333477	0,045	0,05	0,01	0,015
333478	0,043	0,06	0,01	0,022
333454	0,052	0,07	0,01	0,025
333455	0,079	0,11	0,012	0,015
333456	0,04	0,09	0,02	0,026
333457	0,04	0,1	0,019	0,025
333458	0,062	0,1	0,012	0,018
333459	0,045	0,09	0,014	0,016
333460	0,045	0,11	0,013	0,015
333461	0,035	0,09	0,018	0,014
333464	0,04	0,09	0,017	0,017
333467	0,029	0,04	0,08	0,04
333492	0,044	0,06	0,015	0,023
333493	0,04	0,04	0,011	0,015
333494	0,043	0,05	0,01	0,013
333495	0,05	0,09	0,011	0,013
333496	0,04	0,09	0,012	0,013
333497	0,043	0,05	0,01	0,02
333498	0,041	0,04	0,007	0,013
313569	0,051	0,07	0,01	0,015
313570	0,056	0,06	0,01	0,018
313571	0,034	0,08	0,01	0,011
313572	0,04	0,05	0,011	0,025
313573	0,04	0,07	0,014	0,02
313574	0,043	0,09	0,009	0,024
313576	0,044	0,11	0,01	0,015
313582	0,038	0,07	0,011	0,016
313596	0,048	0,05	0,009	0,013
313580	0,035	0,1	0,01	0,018
313581	0,048	0,06	0,01	0,022
313610	0,037	0,08	0,011	0,017
313611	0,036	0,06	0,01	0,017
Сумма	1,636	2,7	0,496	0,68
Среднее	0,0442	0,0730	0,0134	0,0184

% масс.

Таблица 8.7

Сравнительная характеристика основных параметров конвертерных плавков с использованием в шихте синтикома и плавков из традиционной технологией

Наименование показателя	Единицы измерения	Опытно-промышленные плавки (А)	Плавки по базовой технологии (Б)	(А)-(Б)
Масса жидкого чугуна	кг	278040	280140	-2100
Масса легковесного лома	кг	29289,5	36945,9	-7656,4
Масса тяжеловесного лома	кг	20473,7	39000	-18526,3
Масса других видов металлошихты	кг	12500	14864,9	-25042,4
Суммарный расход лома	кг	52390	77432,5	-25,04
Масса синтикома	кг	25000	0	+25000
Расход извести	кг	9790	10700	-910
Расход доломита	кг	3000	3000	0
Температура стали	°C	1653,5	1655,9	-2,4
Содержание С в стали	% масс.	0,04	0,04	+0,0004
Содержание Мп в стали	% масс.	0,06	0,07	-0,0078
Содержание Р в стали	% масс.	0,0135	0,0134	+0,0001
Содержание S в стали	% масс.	0,0186	0,0184	+0,0002
Основность шлака	ед.	3,37	4,36	-0,99
Содержание (FeO) в шлаке	% масс.	22,12	21,74	+0,38
Выход стали с учетом расхода ферросплавов	%	90,57	89,46	+1,11

В приведенной таблице выход жидкой стали представлен с учетом расхода ферросплавов. Коэффициент определен по методике, принятой на заводе "Хута Катовице".

8.3. Анализ результатов исследований

Как показывают данные, приведенные в табл. 8.3 и 8.5, в среднем расход жидкого чугуна на плавках с использованием в шихте синтикома и при выплавке стали по традиционной технологии составил соответственно 278040 и 280140 кг на плавку. Следовательно, на опытно-промышленных плавках расход жидкого чугуна был на 2100 кг ниже по сравнению с данными текущего производства. Снижение доли жидкого чугуна на опытно-промышленных плавках произошло по причине замены в шихте стального лома синтикомом марки СК15, имеющем меньшую охлаждающую способность, чем лом. Поставленная партия синтикома содержала в себе приблизительно 13 % масс. окисленных железорудных окатышей. Охлаждающая способность данного материала несколько ниже охлаждающей способности лома, что косвенно подтверждается снижением расхода жидкого чугуна.

Одним из важнейших параметров выплавки стали является степень дефосфорации расплава. Как показывают данные, приведенные в табл. 8.4 и 8.6, среднее содержание фосфора на опытно-промышленных плавках составило ~0,0135%, а на плавках текущего производства ~0,0134 %. Сравнение усредненных величин содержания фосфора в выплавленной стали для двух массивов плавов указывает на их практическую идентичность ($\Delta[P] = 0,0001 \%$). Однако следует учитывать, что на опытных плавках с синтикомом исходное содержание фосфора в шихте было выше, чем на контрольных плавках со 100 % лома. В ходе работы установлено влияние последовательности загрузки комбинированной твердой металлошихты (стальной лом, синтиком) в рабочее пространство конвертера на содержание фосфора в расплаве. Как известно, для процесса дефосфорации необходимо наличие определенного количества монооксида железа для непосредственного окисления фосфора, так и для получения соединения $(\text{FeO})_3\text{P}_2\text{O}_5$. На традиционных плавках монооксид железа накапливается в шлаке в результате окисления стального лома, особенно легковесного, находящегося выше уровня, залитого в рабочее пространство конвертера чугуна. При замене стального лома на синтиком марки СК15 в количествах, равных или более 35000 кг на плавку, механизм образования оксидов железа изменяется. На это указывают данные плавки № 333501, когда материал был загружен в нижние слои металлозавалки. Оксиды железа из состава синтикома, находящегося на днище конвертера, практически не поступают в шлак, восстанавливаясь в нижних слоях образующейся ванны. В результате этого содержание (FeO) в шлаке при данном режиме загрузки синтикома значительно уменьшилось и составило всего 15,6 %. Это привело к увеличению содержания фосфора в металле до 0,022 %. При этом содержание фосфора в металле не повлияло даже на увеличение расхода извести с 8000 кг до 10000 кг по сравнению с другими плавками по массиву.

При плавлении синтикома в верхних слоях шихты на ранней стадии плавки должен образовываться высокоактивный жидкотекучий шлак, в котором с более высокими скоростями может происходить растворение CaO извести. Вследствие этого, а также из-за увеличения времени взаимодействия шлака и расплава (температура плавления основы синтикома 1150 – 1250°C) процесс дефосфорации ванны в случае подачи композиционного материала на слой стального лома протекает значительно быстрее и более полно.

Вышеизложенное объясняет получение практически одинакового содержания фосфора в металле по окончании продувки на опытно-промышленных плавках с использованием синтикома, содержащего более высокую начальную концентрацию фосфора и протекающих при пониженной основности шлака и несколько меньшем расходе шлакообразующих. Достигнутое содержание фосфора на уровне ~0,0135 % в выплавленной стали является технологически приемлемым.

Сравнение среднестатистических показателей двух массивов плавов указывает на увеличение выхода стали с 89,46 % по традиционной для завода

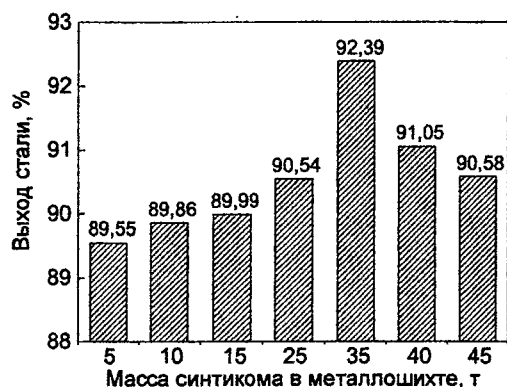


Рис.8.7. Изменение выхода жидкой стали в зависимости от массы синтикома в металлошихте.

технологии до 90,57 % по технологии с заменой части стального лома синтикомом марки СК15. На ряде плавков был достигнут весьма высокий выход — на уровне 94 %.

Увеличение выхода жидкой стали при использовании синтикома может быть объяснено с позиций снижения окисления железа при замене части стального лома (особенно легковесного) на композиционный материал. При этом увеличение выхода жидкой стали на опытно-промышленных плавках достигнуто при меньшем исходном содержании железа в металлошихте.

Ниже приведен расчет материального баланса железа для разных технологий с помощью Excel. При среднем составе шихты 278040 кг жидкого чугуна, 52390 кг стального лома и 25000 кг синтикома в ней содержится около 337107,99 кг железа. Это значение получено исходя из следующих соображений. Жидкий чугун содержит в среднем 4,64 % углерода, 0,309 % кремния, 0,143 % марганца, 0,098 % фосфора и 0,019 % серы. Содержание железа в чугуне данного состава равно $100 - (4,64 + 0,309 + 0,143 + 0,098 + 0,019) = 94,79\%$. Согласно данным табл.8.1, содержание $Fe_{\text{общ}}$ в синтикоме марки СК15 составляет 90,35 %. Количество железа, вносимое со стальным ломом, как правило, не превышает $100 - (0,99 + 1,75) = 97,26\%$ (0,99 % — сумма примесей C+Si+Mn+P+S; 1,75 % — загрязненность лома органическими веществами). Исходное содержание железа в шихте на традиционных плавках при среднем составе шихты 280140 кг жидкого чугуна и 77432,4 кг стального лома составляет 340866,55 кг, что на 3758,56 кг больше по сравнению с опытными плавками.

Увеличение выхода жидкой стали подтвердило результаты исследований физико-химических процессов, проходящих в синтикоме при его нагреве и плавлении. Как было показано в этих исследованиях, в синтикоме при этом наблюдается полное и высокоинтенсивное протекание реакций окисления

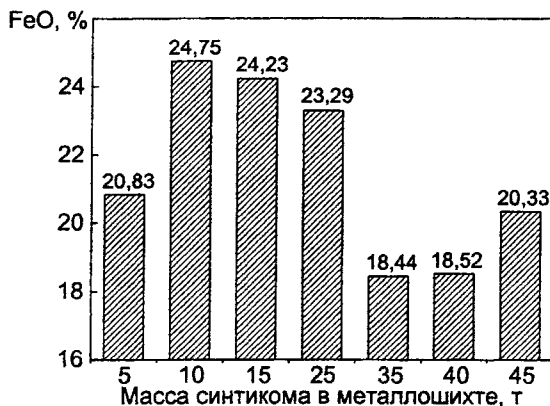


Рис.8.8. Изменение содержания монооксида железа в зависимости от массы синтикома в металлошихте.

углерода и других примесей матрицы и восстановления оксидов железа наполнителя. Результатом этого является прирост чистого первородного железа, отсутствие окисления железа и увеличение выхода железа.

Зависимость выхода жидкой стали от расхода синтикома на плавку и способа его загрузки в конвертер представлена на рис.8.7.

Данные рис.8.7 указывают на увеличение выхода жидкой стали при использовании синтикома, что напрямую связано со снижением доли стального лома в составе металлошихты. С увеличением содержания синтикома в составе металлозавалки и изменения режима загрузки выход железа вначале возрастает из-за снижения потерь железа, достигая максимума. Однако при увеличении количества синтикома на плавку свыше 35 т и сохранении режима загрузки, выход железа начинает падать, оставаясь однако на достаточно высоком уровне – 90,58 %.

Среднее содержание FeO в шлаке составило 21,74 %, а на опытно-промышленных — 22,12 %. При этом расход синтикома на плавку в среднем составил ~ 31%. Зависимость содержания монооксида железа в шлаке от расхода синтикома на плавку представлено на рис.8.8.

Содержание монооксида железа в шлаке при оптимальном режиме пихтообразования (расход синтикома ~50 % от массы твердой металлошихты) меньше, чем на традиционных плавках и составляет 18,5 %.

Средний расход кислорода при выплавке стали в 360 т конвертере с заменой части стального лома композиционным материалом составил согласно табл.8,3 — 17116,2 м³ на плавку. Данный показатель включает в себя не только расход кислорода на продувку плавов, но и количество кислорода, затраченное на додувку.

Согласно полученным данным расход кислорода на плавку изменялся в пределах от 16566 м³ до 17523 м³. Так, например, при массе синтикома

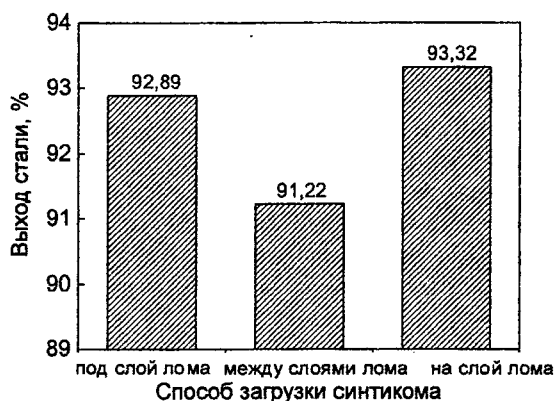


Рис.8.9. Изменение выхода стали в зависимости от способа загрузки синтикама.

5000 кг на плавку расход кислорода составил в среднем 17415 м^3 , а при массе синтикама 40000 кг — 17216 м^3 . Это указывает на то, что нет прямой зависимости между увеличением расхода кислорода и содержанием синтикама в шихте, а также свидетельствует об увеличении степени использования кислорода при работе на синтикоме.

Средний расход кислорода по всему массиву опытно-промышленных плавок на уровне $17116,2 \text{ м}^3$ и содержание кислорода в металле 808 ppm являются вполне приемлемыми величинами для конвертеров большой вместимости. При таком расходе кислорода и средней массе полученной стали около 321460 кг расход кислорода на 1000 кг стали составил $17116,2/321460 = 0,053 \text{ м}^3$ или $53 \text{ м}^3/\text{т}$ стали, что весьма близко к теоретическому расходу кислорода на окисление C, Si, Mn, P и Fe шихты в кислородном конвертере.

Как показывает практика работы конвертерных цехов России, средний удельный расход кислорода превышает существенно это значение.

На опытно-промышленных плавках произошло значительное снижение основности шлака в среднем с 4,36 до 3,37. Это может быть объяснено снижением расхода извести с 10,7 тонн до 9,8 тонн на плавку и более высоким содержанием кремния в синтикоме по сравнению со стальным ломом. Однако снижение основности шлака не повлияло на степень дефосфорации расплава. Содержание фосфора и серы на опытных плавках идентично их содержанию на традиционных плавках: фосфор на уровне — 0,013 %, сера — 0,019 %.

Данные по содержанию углерода в расплаве по окончании продувки для плавок с использованием в шихте синтикама СК15 и без него указывает на их идентичность. Так, на традиционных плавках эта величина составила $[C]=0,0446 \text{ %}$, а на опытно-промышленных — $[C]=0,0442 \text{ %}$, несмотря на повышенное содержание углерода в шихте по опытной технологии, обусловленное дополнительным количеством углерода, вносимого синтикомом. Это подтверждает результаты исследований кинетики обезуглеро-

живания слитка синтикома, а именно раннее и полное протекание процесса окисления углерода. Высокая скорость этого процесса исключает влияние обезуглероживания синтикома на длительность продувки.

Температура заливаемого в конвертер жидкого чугуна на опытных плавках была равна 1364,5°C, а по окончании продувки (первая проба) — 1653,5°C. Средние значения этих параметров по традиционной технологии составили соответственно 1367,4°C и 1655,9°C. Таким образом, при одинаковой средней температуре жидкого чугуна для двух массивов плавков ($\Delta T_1 = 2,9^\circ\text{C}$) получена практически идентичная средняя температура стали после окончания продувки ($\Delta T_2 = 2,4^\circ\text{C}$). Полученная средняя температура стали на плавках с заменой части стального лома синтикомом является технологически приемлемой с позиций ее разливки на УНРС.

Статистическая обработка данных промышленных испытаний указывает на высокую чистоту металла по содержанию примесей хрома, никеля, меди, а также мышьяка и олова (см. табл.8.8).

Таблица 8.8

Содержание примесей цветных металлов

Элементы, % масс.				
Cr	Ni	Cu	As	Sn
0,005 – 0,014	0,001 – 0,007	0,016 – 0,043	0,001 – 0,003	0,002 – 0,004

Уровень содержания примесей в пределах, указанных в табл.8.8, позволяет расширить сортамент выплавляемых сталей, в том числе организовать производство высококачественных конвертерных сталей категории ВОСВ на заводе “Хута Катовице”.

8.4. Оптимизация режима формирования комплексной металлозавалки

Основные технологические показатели выплавки стали в зависимости от способа загрузки синтикома приведены в табл.8.9 и на рис.8.9-8.10.

Таблица 8.9

Химический состав металла в зависимости от способа загрузки синтикома, % масс.

Способ загрузки	C	Mn	P	S
Под слой лома	0,05	0,079	0,022	0,026
Между слоями лома	0,043	0,07	0,016	0,017
На слой лома	0,043	0,065	0,012	0,013

Анализ этих результатов показывает, что с позиций повышения выхода стали режимы с загрузкой синтикома под стальной лом и на него обеспечивают значительное повышение данного показателя по сравнению с традиционным.

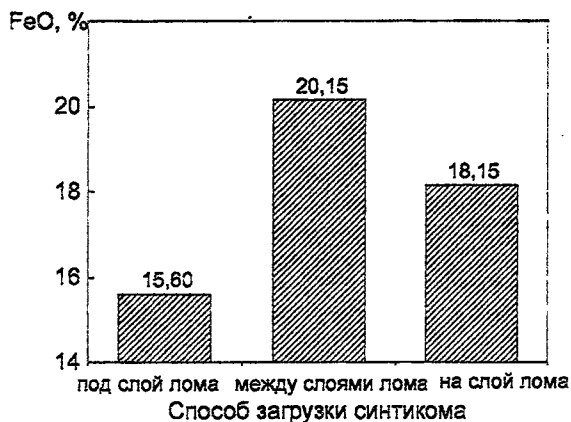


Рис.8.10. Изменение содержания монооксида железа в шлаке в зависимости от способа загрузки синтикома.

При подаче синтикома в нижние горизонты рабочего объема конвертера вносимые с ним оксиды железа полностью восстанавливаются до металлического железа, в результате чего их поступление в шлак отсутствует или сводится к минимуму. Это в свою очередь и объясняет повышение выхода стали. При данном режиме структура металлозавалки во многом соответствует традиционному технологическому режиму. В частности, над уровнем твердожидкой ванны образуется слой из кусков металлического лома. Соответственно, процесс “зажигания” плавки в этом случае сопровождается выносами и утаром железа в атмосферу. Сокращение содержания оксидов железа в шлаке при этом вызывает снижение его дефосфорирующей способности (см. табл.8.9).

Режим с загрузкой синтикома между слоями лома также обеспечивает высокие технологические показатели. Однако главным его недостатком является то, что загрузка всех компонентов металлошихты осуществляется в 3 приема, следовательно, увеличивается общее время технологического цикла. При этом физические свойства стального лома не постоянны и данный способ формирования металлозавалки не обеспечивает равномерной послойной структуры твердой части металлошихты. Ему также свойственны недостатки традиционного режима шихтообразования. Поэтому предпочтительным является загрузка синтикома поверх лома.

Кислородный конвертер не позволяет в реальном времени увидеть и оценить процесс формирования металлозавалки. Поэтому единственным доказательством того факта, что при использовании синтикома структура металлозавалки меняется в сравнение с традиционной, является показание положения фурмы в начальный момент плавки. Сравнение показаний высоты фурмы по традиционной технологии завода “Хута Катовице” и

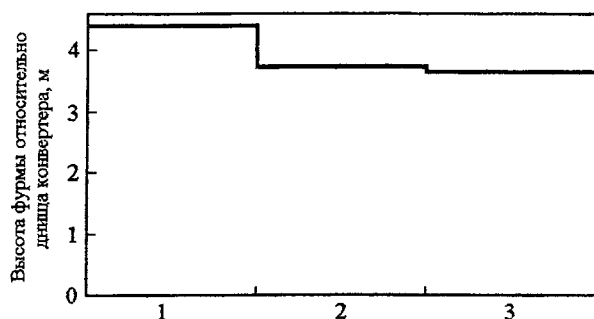


Рис.8.11. Изменение высоты фурмы для разных технологических режимов шихтообразования: 1 – традиционная технология; 2 – загрузка синтикома на днище конвертера; 3 – загрузка синтикома на слой лома.

опытным режимам формирования металлошихты на основе результатов физического моделирования для насыпной плотности 1000 кг/м^3 приведены в табл.8.10. Данные моделирования реального конвертера совпадают между собой и подтверждают, что использование синтикома уменьшает общую высоту слоя металлозавалки и снижают высоту расположения фурмы в начале продувки. Результаты исследований на модели с перерасчетом их на реальный конвертер представлен на рис. 8.11.

Таблица 8.10

Высота фурмы относительно дна конвертера

Технологический режим	Высота фурмы относительно дна конвертера	
	Модельная, мм	Реальная, м
Традиционная технология	110	4,4
Режим с загрузкой синтикома под слой лома	93,5	3,74
Режим с загрузкой синтикома на слой лома	91,5	3,65

Таким образом, опытно-промышленные исследования подтвердили выводы, сделанные в результате физического моделирования. Возможность снижения начальной высоты фурмы при использовании синтикома свидетельствует о снижении суммарной высоты металлошихты и уменьшении доли хаотично распределенных кусков стального лома над уровнем твердожидкой ванны.

8.5. Баланс железа при различных вариантах формирования металлозавалки

На основе массива данных, полученных в ходе промышленных исследований, проведен расчет баланса железа для традиционного

технологического режима и режима с использованием синтикома. Также проведен анализ баланса железа для режима с заменой 50 % металлолома на синтиком с его загрузкой на слой лома. Данный анализ позволил определить оптимальный режим формирования металлозавалки и показать, что состав и качественные характеристики металлошихты в значительной степени предопределяют технологические показатели конвертерной плавки, прежде всего, выход жидкой стали и воздействие на экосистему [4 – 6].

Конвертерная плавка неминуемо сопровождается потерей железа, которая составляет 5 % и более [7 – 12]. Объем потерь железа включает в себя ряд основных статей. Прежде всего, потеря железа в шлак в виде оксидов и королек, технологические потери, а также железо, уносимое газами в виде пыли. Последняя статья является самой неудовлетворительной с позиции экологии и технологических показателей выплавки стали (снижение выхода жидкой стали).

При обработке массива данных, средние расходы жидкого чугуна и стального лома на традиционной технологии составили соответственно 280140 кг и 77432 кг. Выход стали 318130 кг. Используя эти данные и результаты опытных плавов был составлен материальный баланс с использованием Excel, позволяющий определить потери железа.

Согласно балансу суммарное количество железа в металлозавалке составляет 340866,55 кг (95,33 %), потери железа — 23203,56 кг или 6,81% от суммарного количества железа в шихте, масса шлака равна 24448,78 кг или 6,84 % от массы металлозавалки. Результат баланса железа для действующей технологии приведен в табл.8.11. Статьи потерь железа приняты с учетом рекомендаций [3,12].

Таблица 8.11

Баланс железа

Приход железа			Расход железа		
Наименование статьи	Величина		Наименование статьи	Величина	
	кг	%		кг	%
Железо металлошихты (чугун, лом)	340866,55	100	Железо в стали	317662,99	93,19
			Железо шлака в виде оксидов железа	4145,83	1,22
			Железо шлака в виде королек	3408,66	1
			Железо, уносимое газами “в пыль”	12240,4	3,59
			Технологические потери	3408,67	1
Итого	340866,55	100	Итого	340866,55	100

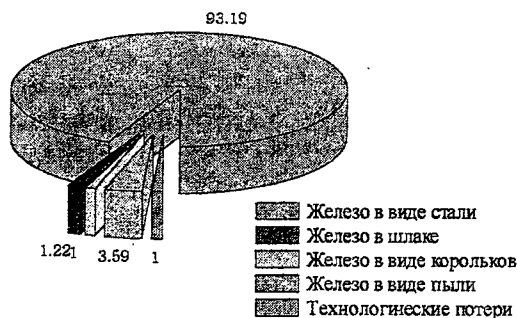


Рис.8.12. Баланс железа для традиционной конвертерной технологии.

Графически баланс железа для традиционной конвертерной технологии в условиях завода “Хута Катовице” представлен на рис.8.12.

По массиву опытно-промышленных плавов при замене стального лома на синтиком средний расход жидкого чугуна составлял 278040 кг, лома — 52390 кг, синтикома — 25000 кг. Выход стали 321460 кг. Для определения потерь железа составлен материальный баланс плавки.

Таблица 8.12

Баланс железа					
Приход железа			Расход железа		
Наименование статьи	Величина		Наименование статьи	Величина	
	кг	%		кг	%
Железо металлошхты (чугун, лом, синтиком)	337107,99	100	Железо в стали	321058,18	95,24
			Железо шлага в виде оксидов железа	4114,08	1,22
			Железо шлага в виде корольков*	3371,08	1
			Железо, уносимое газами “в пыль”	5193,57	1,54
			Технологические потери,	3371,08	1
Итого	337107,99	100	Итого	337107,99	100

*Примечание: в виду отсутствия полной информации о балансе железа, приведенные статьи потерь приняты согласно данным традиционной конвертерной технологии.

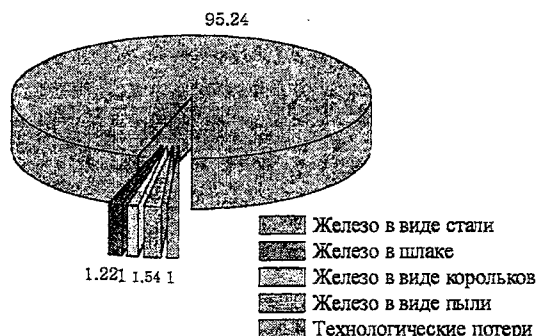


Рис.8.13. Баланс железа для опытно-промышленной технологии (по массиву плавов).

Согласно балансу суммарное количество железа в металлозавалке составляет 337107,99 кг (94,85 %), потери железа — 16049,81 кг или 4,76 % от суммарного количества железа в шихте, масса шлака равна 23844,79 кг или 6,71 % от массы металлозавалки. Результат баланса приведен в табл.8.12.

Графически баланс железа при опытно-промышленных испытаниях представлен на рис.8.13.

На опытно-промышленных плавках по технологии с заменой 50 % лома средний расход жидкого чугуна составлял 278000 кг, стального лома — 40000 кг, синтикома — 40000 кг. Выход жидкой стали 325540 кг. Для определения потерь железа для этого случая был составлен материальный баланс плавки. Проведенные ранее расчеты материально-тепловых балансов показали возможность замены до 50 % металлолома на синтиком без существенного изменения дутьевого режима традиционного технологического процесса. В связи с этим расход извести и доломита на плавку оставили практически постоянными.

Согласно балансу суммарное количество железа в металлозавалке составляет 338569,91 кг (94,57 %), потери железа — 13436,84 кг или 3,99 %, масса шлака равна 24108,16 кг или 6,73 % от массы металлозавалки. Результат баланса железа приведен в табл.8.13.

Графически баланс железа при опытно-промышленных испытаниях представлен на рис.8.14.

Сравнение балансов железа показывает, что при работе по технологии с синтикомом изначально содержание железа в шихте меньше в среднем на 3758,56 кг, однако при этом на выходе его содержание в стали выше на 3395,19 кг.

Таблица 8.13

Баланс железа

Приход железа			Расход железа		
Наименование статьи	Величина		Наименование статьи	Величина	
	кг	%		кг	%
Железо	338569,91	100	Железо в стали	325133,08	96,03
металлошихты (чугун, лом, синтиком)			Железо шлака в виде оксидов железа	3482,57	1,03
			Железо шлака в виде корольков*	3385,7	1
			Железо, уносимое газами "в пыль"	3182,87	0,94
			Технологические потери*	3385,69	1
Итого	337107,99	100	Итого	337107,99	100

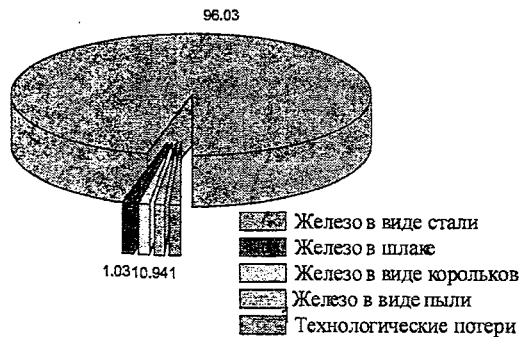


Рис.8.14. Баланс железа для опытно-промышленной технологии (с загрузкой синтикома на слой стального лома).

Как показывают диаграммы, приведенные на рис.8.12, 8.13, преимуществом технологии с применением композиционного материала является сокращение суммарных потерь железа на 2,05 % и, прежде всего, снижение потерь железа с пылью. При этом новый режим пиктообразования обеспечивает их снижение на 2,82% по сравнению с традиционной технологией (см. рис.8.14). Это указывает НАТО. Что использование синтикома взамен части лома создает более оптимальные физико-химические

условия для протекания основных конвертерных процессов и позволяет повысить показатели плавки.

Другие статьи потерь железа определяются технологическими режимами ведения конвертерной плавки и производственными возможностями цеха. При выполнении данного анализа они приняты постоянными величинами.

Проведем проверку адекватности расчетов суммарных потерь железа при выплавке стали в кислородном конвертере по традиционной технологии,

Масса металлозавалки составляет 35767,0 кг. Суммарное количество железа в шихте составляет 340866,55 кг. Выход жидкой стали 318130 кг или 88,97 %. Угар элементов в процессе плавки составляет $10 - 88,97 = 11,03 \%$, из которых 4,16 % масса окислившихся примесей (C, Si, Mn, P, S). Масса окислившегося железа $11,03 - 4,16 - 6,87$ или 23417,53 кг, что соответствует значению по балансу 23203,56 кг. Таким образом, прямая проверка потерь железа доказывает адекватность расчетов балансов, проведенных с помощью программы Excel.

В ходе проведенного исследования подтверждено, что состав, качественные характеристики металлошихты и режим формирования металлозавалки в значительной степени влияют на технологические показатели выплавки конвертерной стали. Использование синтикома взамен 50 % стального лома в 360 т конвертере способствует повышению выхода жидкой стали при изначально меньшем содержании железа в шихте с сохранением основных параметров дутьевого режима конвертерной плавки, а также снижению негативного воздействия на экологическую обстановку вокруг предприятия.

Выводы

1. Разработана оригинальная методика моделирования процесса формирования металлозавалки из различных видов металлошихты, включая синтиком. На основе ее предложен рациональный вариант загрузки синтикома в конвертер поверх лома.

2. На опытно-промышленных плавках в 360 т конвертере изучена технология конвертерной плавки с использованием в различных количествах синтикома марки СК15, произведенного российским ОАО "ЛМЗ "Свободный Сокол", и отличающегося пониженным содержанием серы и фосфора и относительно высоким содержанием углерода.

3. В ходе исследований синтиком использовали в комбинации с самыми различными видами металлошихты – от легковесного до тяжеловесного лома, значительно отличающихся друг от друга своими свойствами, при различном соотношении их долей в твердой металлозавалке. Показано, что качественные характеристики металлошихты, способ их загрузки и режим формирования металлозавалки предопределяют ход конвертерного процесса и основные технико-экономические показатели.

4. Синтиком может применяться в комбинации с различными шихтовыми материалами без каких-либо ограничений. Подтверждена технологичность материала, его пожаро- и взрывобезопасность.

5. Опробованы различные способы формирования твердой металлозавалки — с загрузкой материала синтиком на днище конвертера, в середину между слоями, лома, сверху — поверх лома. Установлено, что при доле синтика в составе металлошихты от 5 до 30 тонн на плавку или 6,25 – 37,5 % от массы твердых материалов — охладителей способ подачи материала не оказывает существенного влияния на технологические показатели выплавки стали ввиду его относительно малого процентного содержания. При доле синтика в твердой металлозавалке выше 45 % или 35000 кг начинается сказываться характер загрузки материала. Оптимальным для этих условий является режим формирования металлозавалки с загрузкой данного материала на слой стального лома. При этом значительно повышаются показатели плавки. Это подтверждает выводы о непосредственном влиянии состава и режима формирования металлозавалки на протекание основных процессов конвертерной плавки и ее технико-экономические показатели.

6. Отработаны технологические режимы ведения плавки с применением в составе твердой части металлозавалки до 50 % материала синтиком с сохранением основных параметров дутьевого режима. Эти данные подтвердили результаты расчетов материально-теплового баланса. Продувка ванны на всех опытно-промышленных плавках прошла спокойно без выбросов и всплесков.

7. Продолжительность продувки на опытно-промышленных плавках с применением нового материала в среднем составила 17,39 минут при расходе кислорода на плавку 17116 м³. Удельный расход кислорода в среднем составил 53 нм³/т.

8. На проведенных плавках достигнута необходимая степень дефосфорации расплава, что позволило получить стали со средним содержанием фосфора 0,0135 %. Обращает на себя внимание, что указанное значение получено при высоком содержании фосфора в исходном чугуна (0,10 – 0,105 %), и меньшей основности конечного шлака на сравнительных плавках (3,37 вместо 4,36).

9. Среднее содержание углерода в металле по окончании продувки при использовании синтика соответствовало значениям традиционных плавов — 0,04 – 0,05 %, несмотря на замену лома синтиком, основой которого служит передельный чугун. Этот факт имеет особое значение и подтверждает, что окисление углерода в синтике происходит со скоростью, не уступающей скорости обезуглероживания жидкого чугуна газообразным кислородом.

10. Несмотря на широкие пределы изменения расхода синтика 6,25 – 57,45 % или 5000 – 45000 кг на плавку, достигнуто стабильное содержание углерода (0,04 %) и необходимая температура стали (1653,5°C). Эти данные подтверждают, с одной стороны, равенство

охлаждающих эффектов стального лома и синтикома марки СК15, а с другой стороны указывают на полное восстановление оксидов железа в этом материале углеродом, кремнием, марганцем и фосфором независимо от его относительной доли в твердой металлозавалке.

11. Полученный металл по окончании продувки имеет высокую чистоту по содержанию Cu, Ni, Cr, а также As и Sn, что снимает ограничения с возможного марочного сортамента сталей на заводе "Хута Катовице", делая реальным производство листового проката, в том числе ВОСВ.

12. Средний выход жидкой стали на опытно-промышленных плавках увеличился с 89,46 до 90,57 % по сравнению с традиционными, что свидетельствует о значительном снижении степени окисления железа и его угара "в пыль" за счет использования синтикома в составе шихты кислородного конвертера.

13. Анализ баланса железа показал, что использование синтикома обеспечивает увеличение выхода стали при изначально меньшем содержании железа в металлошихте в среднем на 3758,56 кг (~1 %) от массы железа в металлошихте. Одним из преимуществ технологии с применением этого материала является сокращение суммарных потерь железа на 2,05 % и, прежде всего, снижение потерь железа с пылью. Режим с загрузкой синтикома на слой лома способствует снижению угара железа на 2,82 % по сравнению с традиционной технологией. Это указывает на то, что использование синтикома взамен части лома, при оптимальном режиме шихтообразования, создает благоприятные физико-химические условия для протекания основных процессов в конвертерной плавке и позволяет повысить показатели плавки, а также снизить нагрузку на экосистему.

14. Расход извести на плавку, несмотря на замену лома композиционным материалом, основу которого составляет передельный чугун, сократился с 10700 до 9800 кг без ухудшения процесса дефосфорации.

15. Опытно-промышленные испытания доказали влияние синтикома на формирование металлозавалки, а именно, что синтиком способствует снижению ее суммарной высоты и толщины слоя твердых охладителей над уровнем твердожидкой ванны. При работе по традиционной технологии в условиях конвертерного цеха завода "Хута Катовице" в момент зажигания плавки высота фурмы относительно днища конвертера составляет в среднем 4 – 4,4 м при насыпном весе лома менее 1000 кг/м³. При проведении опытно-промышленных испытаний для технологии с заменой 50 % лома на композиционный материал, высота фурмы относительно днища конвертера составляла в среднем 3,5 – 3,6 м, что полностью соответствовало результатам моделирования.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при оптимизации формирования металлозавалки, в том числе с использованием синтикома.

Литература

1. Дорофеев Г.А., Руднев С.В., Шахпазов Е.Х., Кашин В.И., Шеялович А.В. Моделирование процесса формирования твердой металлозавалки в кислородных конвертерах при использовании различных комбинаций шихтовых материалов. Труды восьмого международного конгресса сталеплавателей. Секция конвертерного производства стали. Н.Тагил, 18 – 22 октября 2004 г., с.116 – 119.
2. Дорофеев Г.А., Руднев С.В., Павлов В.В., Кашин В.И., Шеялович А.В. закономерности окисления примесей при нагреве и плавлении композиционных материалов типа Синтиком. Труды восьмого международного конгресса сталеплавателей. Н.Тагил, 18 – 22 октября 2004 г., с. 576 – 578.
3. Дорофеев Г.А., Гребенников В.С., Шеялович А.В., Ларин А.В. Получение комплексных синтетических материалов для сталеплавильного производства с использованием разливочной машины чугуна. Труды восьмого международного конгресса сталеплавателей. Н.Тагил, 18-22 октября 2004 г., с.610 – 611.
4. Шахпазов Е.Х., Дорофеев Г.А., Шеялович А.В., Руднев С.В. Влияние композиционных материалов класса Синтиком на потери железа при выплавке конвертерной стали. Металлург, 2005, № 7, с.34 – 35.
5. Шахпазов Е.Х., Шеялович А.В., Дорофеев Г.А. Влияние состава и качественных характеристик металлошихты на технологические показатели выплавки конвертерной стали. Металлург, 2005, № 9, с.47 – 48.
6. Шахпазов Е.Х., Шеялович А.В., Дорофеев Г.А. Влияние состава и качественных характеристик металлошихты на технологические показатели выплавки конвертерной стали. Металлург, 2005, № 9, с.47 – 48.
7. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Металлургия, 1974, 496 с.
8. Поживанов М.А., Шахпазов Е.Х., Свяжин А.Т. Выплавка стали для автолиста. М.: Интерконтакт, Наука, 2006. 166 с.
9. Немтинов А.А., Ордин В.Г., Зинченко С.Д. и др. 60 лет кислородно-конвертерному производству в России. Сб. статей. М.: Интерконтакт Наука. 2006, с.186 – 190.
10. Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х. 60 лет кислородно-конвертерному производству в России. Сб. статей. М.: Интерконтакт Наука, 2006, с.246 – 262.
11. Дорофеев Г.А., Шахпазов Е.Х. Проблемы черной металлургии и материаловедения, 2007, № 1, с.5 – 10.
12. Зинченко С.Д., Ефимов С.В., Краснов А.В. и др. Труды девятого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2007, с.171 – 178.

Применение синтикома в дуговых печах

9.1. Результаты исследований

Широкомасштабные промышленные испытания синтикома в качестве шихты электропечей проведены на ряде российских и зарубежных заводов: в электросталеплавильных цехах Узбекского металлургического завода, ОАО “Северсталь”, ОАО “Новолипецкий металлургический комбинат”, ОАО “НОСТА”, ОАО “Волгоградский завод “Красный Октябрь”, ОАО “Ижсталь”, ОАО “Волжский трубный завод”, “Белорусский металлургический завод”, “Молдавский металлургический завод”, завод фирмы “De Acero” в Монтеррее (Мексика), завод фирмы “Steel Dynamics Inc.” в Батлере (США), завод “Nucor Steel Crawfordsville” (США), завод “North Star Steel Texas” (США), заводы “Katovize”, “Zawercie”, “Ostrowiec”, “Estal Labedy”, “Huta Luccuni” (Польша), завод “Co Steel Raritan” (США), завод фирмы Киа-Стил (Корея), завод фирмы “Kroman” (Турция), электропечь ОАО “Тулачермет” и других. На большинстве предприятий синтиком применяли в шихте вместе со стальным ломом и чугуном — твердым и жидким, железом прямого восстановления для выплавки качественных сталей (листовых, трубных, кордовых и т.д.). Эти результаты частично вписаны в научно-технической литературе и защищены рядом патентов [1 – 22].

Как отмечено практически на всех заводах, применявших “классическую” технологию электроплавки (с относительно малыми расходами кислорода — не более 10 м^3 на тонну стали) — ОАО “ВТЗ”, ОАО “Ижсталь”, ОАО “Красный Октябрь”, “Островец” и т.д., ввод синтикома, содержащего около 20 % окатышей, в шихту для выплавки стали не приводит к увеличению периода плавления и обезуглероживания металла, несмотря на то, что доля синтикома в шихте достигала 20% и более от массы завалки. Использование синтикома позволяет ускорить дефосфорицию расплава, сформировать на ранних этапах плавки вспененный активный шлак, закрывающий дугу и обеспечивающий возможность повышения к.п.д. преобразования электроэнергии в тепло. Металл, получаемый с использованием в шихте синтикома, содержит меньше примесей цветных металлов (Cu, Sn, Ni и т.д.), чем металл, выплавляемый из 100 % лома. Исследования химического состава и свойств трубных сталей, выплавленных с применением синтикома на Волжском трубном заводе, проведенные “ВНИИГаз” и Институтом качественных сталей ГНЦ “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина”,

показали, что синтиком, используемый в шихте для выплавки сталей, направляемых на изготовление труб для нефте-газопроводов, обеспечивает повышение служебных свойств металла, особенно влияя на улучшение вязкости стали при низких температурах. Данные этих исследований позволили сопоставить синтиком со всем спектром применяемых в шихте электропечей материалов.

На основе этих данных "ВНИИгазом" было рекомендовано применять синтиком для получения сталей, из которых изготавливаются изделия "северного исполнения" для нефте-газопроводов.

Возможность раннего расплавления синтикома (температура плавления примерно 1150 – 1250°C) в сравнении со стальным ломом ($t_{\text{пл}}^{\circ} = 1480 - 1520^{\circ}\text{C}$), а также наличие в синтикоме легкоплавкой "пустой породы", выделение при плавлении пузырей СО позволяют сформировать на ранних этапах плавки вспененный жидкий шлак. Теория и практика электросталеплавления процесса показывают, что в случае работы с "открытой" дугой коэффициент использования энергии при передаче её от дуги к ванне составляет 36 – 40 %, а после погружения дуги в шлак этот коэффициент возрастает до 93 – 100%. Для сокращения потерь электроэнергии в современной технологии электроплавки предусматривается искусственное вспенивание шлака вдуванием в него угольного порошка либо извести, обеспечивающее "закрытие" дуги.

Синтиком, введенный в шихту электропечей, позволяет на ранних этапах плавки обеспечить повышение к.п.д. использования энергии в отличие от всех других видов металлошихты. Поэтому, несмотря на наличие в синтикоме оксидов железа, на восстановление которых до металлического железа необходима дополнительная энергия, замена синтикомом в шихте стального лома, как правило, обеспечивает снижение суммарного расхода электроэнергии на тонну стали. На ряде заводов (например, "Steel Dynamics Inc. – SDI") отмечено снижение расхода электроэнергии при замене синтикомом твердого чугуна, являющегося обычно одним из источников дополнительного тепла в электродуговых печах.

Повышение термического к.п.д. печи при использовании синтикома в шихте обусловлено не только ранним формированием вспененного шлака, но и ранним выделением монооксида углерода, которое происходит более равномерно, чем при использовании той же массы твердого чугуна. Это позволяет соответственно обеспечить более полное дожигание СО и несколько увеличить поступление тепла в печь от реакции дожигания [13].

Фактические результаты производственных плавов на ряде высоко-мощных современных электродуговых печей (120-т печь с системой "Данарк" Молдавского металлургического завода, 150-т печь конструкции "Фукс" завода "Steel Dynamics Inc.", США, 60-т печь с системой "Данарк" мексиканского завода "De Acego") [8,10] показывают, что замена синтикомом в шихте этих агрегатов части стального лома или твердого чугуна повышает выход годного (жидкой стали). Хотя теоретически содержание железа в

синтикоме всегда несколько ниже, чем в чугунах или стальном ломе из-за наличия в синтикоме определенных количеств кислорода (в оксидах) и “пустой породы” (в рудном компоненте), подтверждаемое официальными заводскими результатами увеличение выхода годного при использовании синтика в печах, работающих с большими расходами кислорода, указывает на то, что за счет раннего образования монооксида углерода при нагреве и плавлении синтика можно снизить потери железа, выносимого “пылью” при окислении лома вдуваемым кислородом. Образующийся СО в определенной степени предохраняет поверхность нагретых кусков лома от взаимодействия с кислородом и в то же время сгорает, обеспечивая дополнительный приток тепловой энергии в печь. На проведенных плавках с применением синтика другие параметры процесса (расход кислорода, доля оксидов железа в шлаке, температура расплава перед выпуском, время работы печи под током и т.п.) оставались практически такими же, как и на плавках с традиционным для этих заводов набором компонентов металлошихты.

По специально разработанной компьютерной программе расчетов сопряженного (материального и теплового) баланса электроплавки были сопоставлены среднестатистические производственные показатели серий плавки на “традиционной” шихте и на шихте с использованием синтика для ряда электропечей. Результаты этого сопоставления представлены в табл.9.1. Следует отметить, что первоначально завод “Steel Dynamics Inc.” (“SDI”) применял синтик, содержащий 15–17% наполнителя (окатышей ЛебГОКа), а в дальнейшем использовался синтик СК20 с 21,0–22,5% этого же наполнителя, что привело к увеличению “эндотермичности” материала и расхода электроэнергии.

Результаты расчетов сопряженного баланса серий промышленных плавки в современных электродуговых печах (табл.9.1) наглядно подтверждают положительное влияние ввода синтика в шихту на усвоение тепловой энергии. Из полученных на ряде заводов результатов следует, что для современных высокомоощных электропечей должен быть рекомендован синтик с долей наполнителя (оксидов железа) не выше 15–17%, поскольку “избыток” оксидов неизбежно требует увеличения расхода тепла на их восстановление, и эти дополнительные затраты не всегда компенсируются поступлением тепла дожигания и снижением потерь печи. По этой причине на заводе “SDI”, использовавшем в 1998–99 гг. для выплавки листовых сталей около 80 тыс. т синтика марки СК20, оптимальным вариантом шихтовки плавки с синтиком было принято применение смеси из синтика и твердого чугуна, т.е. фактически доля оксидов после разубоживания синтика чугуном снизилась до 13–15%. Первые серии плавки на “SDI”, когда твердый чугун в шихте полностью заменяли синтиком, содержащим около 15% окатышей, не только обеспечили снижение тепловых потерь печи (как следствие — и снижение расхода электроэнергии на тонну стали) по сравнению с “традиционной” шихтой

(86% лома + 14% твердого чугуна), но и привели к фактическому увеличению выхода годного (табл.9.1).

Необходимо указать, что для максимальной эффективности использования синтикома в электродуговых печах его следует размещать в шихте рациональным образом, учитывая особенности поведения материала при нагреве и плавлении. Выполненные серии опытно-промышленных плавков на "SDI" с загрузкой синтикома в различных слоях первой корзины шихты показали, что наилучшие результаты достигаются при вводе слоя синтикома в нижней части корзины на "подушке" из легковесного лома ("busheling" — по терминологии завода), над слоем синтикома при этом размещали слой вводимых с шихтой флюсов (извести). При загрузке синтикома в верхних слоях первой корзины шихты или в нижних слоях второй корзины (в подвалке) эффект снижения потерь тепла отсутствовал и расход электроэнергии возрастал. Часть синтикома (либо твердый чугун, если он применяется в шихте совместно с синтикомом) целесообразно вводить в верхних слоях второй корзины шихты. Это обеспечивает повышение углеродного потенциала ванны после завершения плавления всей массы шихты и способствует интенсификации кипения ванны, высокой скорости прогрева и рафинирования расплава на конечном этапе плавки. На заводах, где синтиком в современных электродуговых печах использовали без учета особенностей его поведения при плавке, то есть загружали нерациональным образом ("Co Steel Raritan" в США) не удалось выявить эффект положительного воздействия синтикома на энерготехнологические параметры процесса.

Для электродуговых печей, работающих с большими расходами вдуваемого кислорода, использующих в завалку вместе с шихтой кусковой науглероживатель (типа кокса), целесообразен синтиком, содержащий в наполнителе совместно с оксидами железа экзотермичные материалы (углерод, карбид кремния и т.п.). Такой синтиком может обеспечить дополнительное снижение расхода электроэнергии при выплавке стали в электропечах. В настоящее время выполнен комплекс теоретических и лабораторных исследований по этому варианту синтикома и проводятся подготовительные работы по изготовлению опытно-промышленных партий нового вида синтикома для последующей его поставки на электрометаллургические предприятия.

Таблица 9.1

Фактические (до косой черты) и расчетные (после косой черты) показатели материального и теплового балансов серии плавов в высокомоощных электропечах с использованием синтикама

Вариант шихты	Выход жидкого, %	Расход эл.энергии, кВтч/т	1*	FeO, %	2*	3*
SDI, 150-т печь						
Традиционная (86 % лома + 14 % твердого чугуна)	93,15/93,17	458,2/459	18,6/18,0	32,3/32	2,25	23,5
80 % лома + 20 % СК15	95,20/93,60	442,0/442	25,2/24,8	32,5/32	0,55	18,4
80 % лома + 20 % СК20	91,7/91,7	482,8/483	25,0/25,0	32,0/32	2,20	21,8
81,8 % лома + 8,5 % твердого чугуна + 9,7 % СК20	94,50/93,75	456,2/456	24,1/24	33,0/32	0,60	22,4
Де Асеро, 60-т печь*						
Традиционная (100 % лома)	90,00/90,10	403,8/404	20,6/20,0	30,8/31	6,00	19,4
85 % лома + 15 % СК20	90,50/90,60	416,4/17	24,1/24	32,3/33	3,30	17,9
Молдавский металлургический завод, 120-т печь**						
Традиционная (100 % лома)	92,00/92,04	431,6/431	12,6/12,6	29,3/29	4,70	20,0
80 % лома + 20 % СК15	93,05/93,10	420,2/420	14,6/14,5	27,1/27	1,60	18,2

* Выход жидкого не определяется, поэтому в расчете приняты потери металла на УНРС равными 3,2 % массы годного металла для всех плавов.

** Данные приведены на период проведения плавов с синтикомом (ноябрь-декабрь 1997 г.), потери жидкого метла на УНРС приняты для всех вариантов плавов равными 2,5 % массы годного металла.

1* — Расход карбюризатора и угольного порошка, кг/т.

2* — Угар Fe, потери в корольках и выносе, %.

3* — Тепловые потери печи, % к расходу тепла.

9.2. Влияние синтিকা на содержание примесей цветных металлов

Синтиком состоит из передельного чугуна или углеродистого полупродукта и твердого окислителя, относящихся к первородным материалам, имеющим известный состав, наследственность и происхождение. Это обеспечивает минимальное и стабильное содержание в синтикоме примесей цветных металлов и открывает возможность снижения загрязненности выплавляемого металла. Повышение чистоты высококачественных сталей (автолистовых, кордовых, трубных, в том числе для “северного” исполнения, конструкционных и т.д.) в результате применения синтিকা подтверждена многочисленными исследованиями, начатыми еще в 1992 г. на Узбекском и Белорусском металлургических заводах и продолжены на заводах России и зарубежных стран. Наиболее представительными из них являются испытания синтিকা на российских предприятия ОАО “ВТЗ”, ОАО “Северсталь”, ОАО “Носта” и зарубежных заводах “Киан-Стил” (Южная Корея), “Хута Заверче” (Польша), “Стил Дайнемикс” (США), Молдавском металлургическом заводе [9 – 16, 19 – 21].

Для трубного сортамента представляют интерес испытания синтিকা в 150 т электропечи ОАО “ВТЗ”. Всего было проведено 87 плавов при доле синтিকা в металлошихте 10 – 40 т. Партия синтিকা была изготовлена ОАО “Тулачермет”. В качестве исходных материалов использовался передельный чугун марки П1 и окатыши Михайловского ГОКа. Чугун имел следующий состав, масс. %: 4,5 С; 6,72 Si; 0,10 Mn; 0,04 P; 0,019 S; 0,01 Cr; 0,01 Cu и 0,016 Ti. Состав железорудного наполнителя, масс. %: $Fe_{общ}=63$; $FeO=2,06$; $SiO_2=7,6$; $Al_2O_3=0,1$; $CaO=2,7$; $P=0,014$; $S=0,009$. Относительная доля чугуна и железорудного наполнителя составляли соответственно 80 – 85 и 15 – 20 %. Средний расчетный химический состав этого синтিকা представлен ниже, масс. %:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti
3,71	0,59	0,08	0,033	0,016	0,008	0,013
Cu	Fe_2O_3	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
0,008	15,35	0,36	1,33	0,018	0,04	0,36

Этот состав синтিকা примерно отвечает марке СК20. Данные по изменению концентрации Ni и Cu в пробе по расплавлению металлошихты в зависимости от количества синтিকা на плавку в сравнении с плавками на 100 % лома приведены в табл.9.2.

При увеличении доли синтিকা в металлозавалке происходит закономерное снижение содержания цветных примесей в стали. Сталь, выплавленная с использованием синтিকা, по сравнению с обычными плавками содержала никеля, меди, хрома и олова на 0,12 – 0,24 % меньше. Наиболее заметно снижение содержания олова, которое упало в 3 – 4 раза. Вместе с тем, применение чистой первородной шихты как, например,

Таблица 9.2

Содержание примесей цветных металлов по расплавлению

Количество синтикома на плавку, т	Количество плавов	Концентрация элементов, масс. %	
		Никель	Медь
Без синтикома	26	0,13 – 0,30	0,19 – 0,31
		0,168	0,243
10	14	0,09 – 0,27	0,15 – 0,30
		0,15	0,23
20	13	0,10 – 0,19	0,17 – 0,31
		0,135	0,227
30	25	0,10 – 0,27	0,15 – 0,33
		0,139	0,225
40	2	0,12 – 0,15	0,23 – 0,27
		0,135	0,25

синтикома или чугуна либо того и другого вместе в количестве 10 – 30 т на плавку не всегда обеспечивает требуемого содержания меди и других примесей цветных металлов. Это связано с тем, что загрязненность лома достигает весьма больших значений. Поэтому только чистая шихта при большой доле ее 50 % и более в состоянии гарантировать достижение нужной чистоты стали по примесям цветных металлов.

На рис. 9.1 и рис. 9.2 приведены данные совместных с ОАО “Северсталь” и фирмой “Fuchs Technology” исследований по влиянию первородной шихты — синтикома и жидкого чугуна на содержание меди и никеля. Из рис. 9.1 и рис. 9.2 видно, что гарантированная чистота стали по этим элементам достигается лишь при доле первородной шихты в металлозавалке выше 35 – 40 %. Отсюда расход этой шихты на плавку для этой печи должен достигать 50 т.

При использовании 10 – 30 т синтикома концентрация меди в металле, не превышающая 0,30 %, достигались в 93 – 100 % случаев, а концентрация меди не более 0,25 % — в 72 – 76 % случаев.

При выплавке стали только на металлоломе соответствующие уровни содержания меди обеспечиваются в 86 и 66 % случаев.

Результаты проведенных плавов показывают, что в случае необходимости снижения остаточного содержания примесей цветных металлов в стали в среднем на каждые 5 % отн. следует увеличивать расход синтикома на плавку на 10 т.

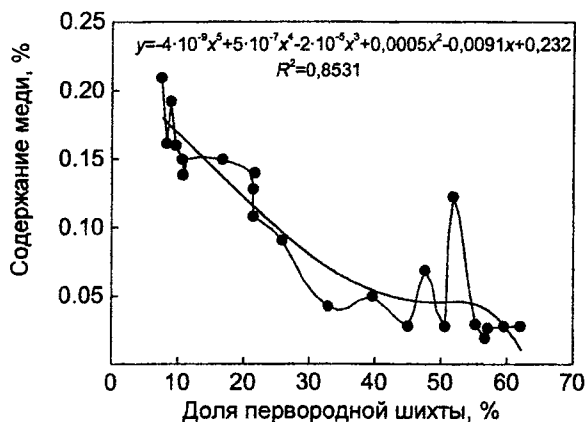


Рис. 9.1. Влияние доли первородной шихты на содержание меди в выплавляемой стали.

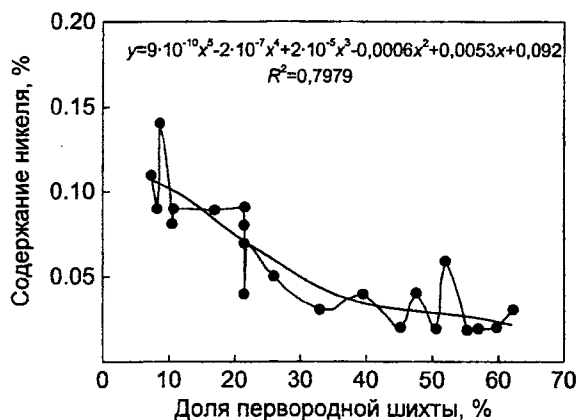


Рис. 9.2. Влияние доли первородной шихты на содержание никеля в выплавляемой стали.

По данным Молдавского металлургического завода использование синтикома в количестве 20 % от общего веса загружаемого на плавку металлолома способствует снижению содержания в стали никеля на 0,04 %, хрома на 0,03 %, меди на 0,10 % от среднестатистического за год. Эти и другие факторы позволили сделать выбор в пользу применения синтикома, отдав ему предпочтение перед передельным чугуном и металлизированными окатышами.

Данные 16 опытных плавов в 60 т электропечи корейского завода "Киа Стил" (г.Кунсан) с использованием синтикома марки СК17 производства ОАО "ЧМЗ", изготовленного из углеродистого полупродукта, также подтверждают повышение чистоты стали. В среднем концентрация меди снизилась с 0,20 до 0,16 %, никеля — с 0,093 до 0,075, олова — с 0,016 до 0,01 %.

Наиболее значительный объем исследований в этой области выполнен в Польше, особенно на металлургическом предприятии "Заверче" [19 – 21]. С целью выбора оптимального варианта шихты для выплавки стали в 145 т дуговой печи были опробованы все существующие виды материалов — чугун, металлизированные окатыши, синтиком производства ОАО "ЧМЗ" и металлолом в различной комбинации. Варианты шихтовки с распределением на группы приведены ниже:

А — 100 % лома, 420 плавов;

В — 100 % лома, 118 плавов;

С — 90 – 95 % лома и 5 – 10 % твердого чугуна, 108 плавов;

Д — 90 – 95 % лома + 5 – 10 % металлизированных окатышей, 215 плавов;

Е — 70 – 80 % лома + 20 – 30 % синтика, 20 плавов.

На рис. 9.3 представлены данные статистической обработки опытных и контрольных плавов по содержанию Cu, Ni, Cr и Zn в зависимости от структуры металлошихты. На рис. 9.4 приведены результаты относительного распределения Cu, Ni и Zn в стали при использовании в металлошихте синтика СК15П (группа Е) и металлизированных окатышей (группа Д) по отношению к твердому чугуну (группа С).

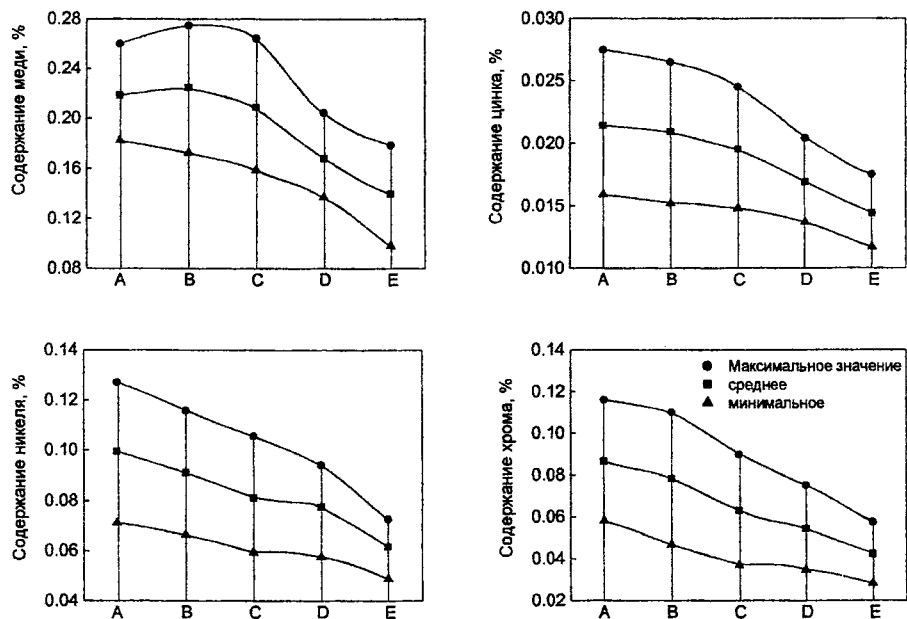


Рис. 9.3. Содержание Cu, Zn, Cr и Ni в стали в зависимости от состава шихты: А и Б — 100% стальной лом; С — стальной лом + твердый чугун; Д — стальной лом + металлизированные окатыши; Е — стальной лом + синтиком.

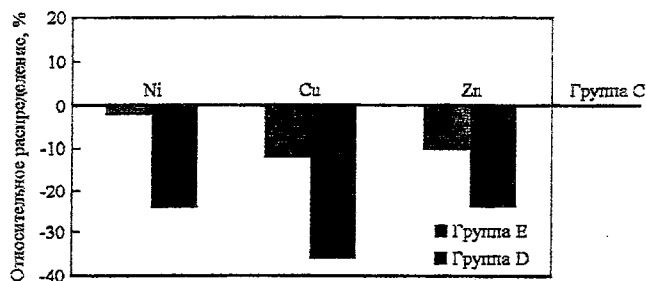


Рис. 9.4. Влияние состава шихты на относительное распределение Ni, Cu и Zn в стали (группа D и E по отношению к группе C).

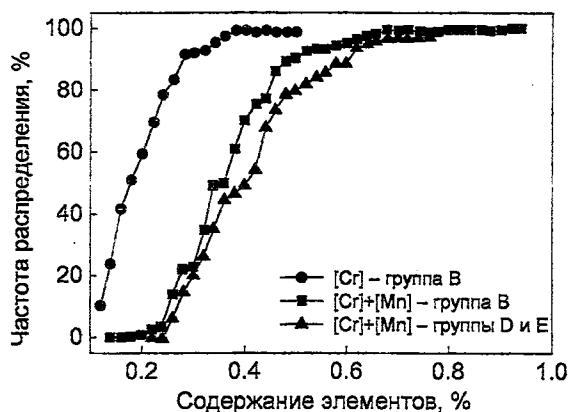


Рис. 9.5. Частотное распределение Cr и Mn в готовой стали по группам B, D и E.

Из этих данных следует, что применение в электроплавке первородных материалов — чугуна, окатышей, синтикома оказывает существенное влияние на содержание цветных металлов. При этом наибольший эффект достигается при использовании синтикома. Как показывает рис.9.5, где приведены данные о распределении Cr (вместе с Mn), замена лома синтикомом или окатышами снижает вдвое — с 20 до 10 % количество плавов, сопровождающихся определенными технологически трудностями, имея ввиду возрастание продолжительности плавов и другие проблемы.

На основании сравнения синтикома, металлизированных окатышей, чугуна и лома заводом сделан выбор в пользу синтикома. Решающее значение при этом, помимо чистоты стали, имела технологичность синтикома в сравнении с железом прямого восстановления и меньший удельный расход электроэнергии.

Изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что применение синтикома как первородной шихты обеспечивает снижение содержания примесей цветных металлов в стали. При этом синтиком не требует в отличие от железа прямого восстановления соблюдения дополнительных требований при его транспортировке, хранении и загрузке в электропечь.

9.3. Особенности окисления углерода

В исходном состоянии синтиком представляет собой тесную смесь оксидов железа и высокоуглеродистого сплава железа, имеющих весьма развитую поверхность контакта. Таким образом, еще на стадии изготовления материала в него заложены предпосылки для интенсивного взаимодействия кислорода оксидов железа и углерода, содержащего в металлической основе синтикома. Эти предпосылки реализуются после расплавления синтикома и превращения его компонентов в расплавленное состояние. Результатом этого является обезуглероживание синтикома и восстановление железа из его оксидов, протекающие параллельно и одновременно с нагревом и плавлением наружной поверхности композита. Эти факторы и, прежде всего, отсутствие первой стадии процесса окисления углерода в ванне – перехода кислорода из газовой фазы в шлак и металл, а также конденсированный характер окислителя – кислорода отличают механизм обезуглероживания синтикома от сталеплавильной ванны с продувкой ее газообразным кислородом. Это означает, что окисление углерода и других примесей чугуна синтикома происходит по одностадийной схеме, то есть прямое окисление углерода собственным кислородом, поступающим из оксидов железа [23, 24]. Как уже отмечалось выше, после расплавления железуглеродистая основа и оксиды железа синтикома превращаются в расплавленное состояние, образуя тесную смесь расплавов чугуна и оксидов железа. Эта смесь аналогична смеси, образующейся при продувке ванны газообразным кислородом в реакционной зоне конвертера. Эта схожесть указывает на то, что применение синтикома в электроплавке означает введение в нее элементов конвертирования, но в другой форме. Реакция между углеродом чугуна синтикома и конденсированным кислородом в отличие от окисления углерода газообразным кислородом носит эндотермический характер и протекает со значительными затратами энергии. Последнее сопровождается понижением температуры и уменьшением скорости реакции и наоборот. При этом независимо от того, достигнуто ли равновесие системы или система далека от равновесия, рост температуры ускоряет реакцию обезуглероживания синтикома и восстановления железа углеродом из его оксидов.

Результаты исследования поведения углерода при его нагреве и плавлении подробно изложены ранее в главе 3. Поэтому ограничимся иллюстрацией этого положения вкратце. На рис. 9.6 и представлен качественный характер влияния скорости нагрева синтикома на процесс обезуглероживания.

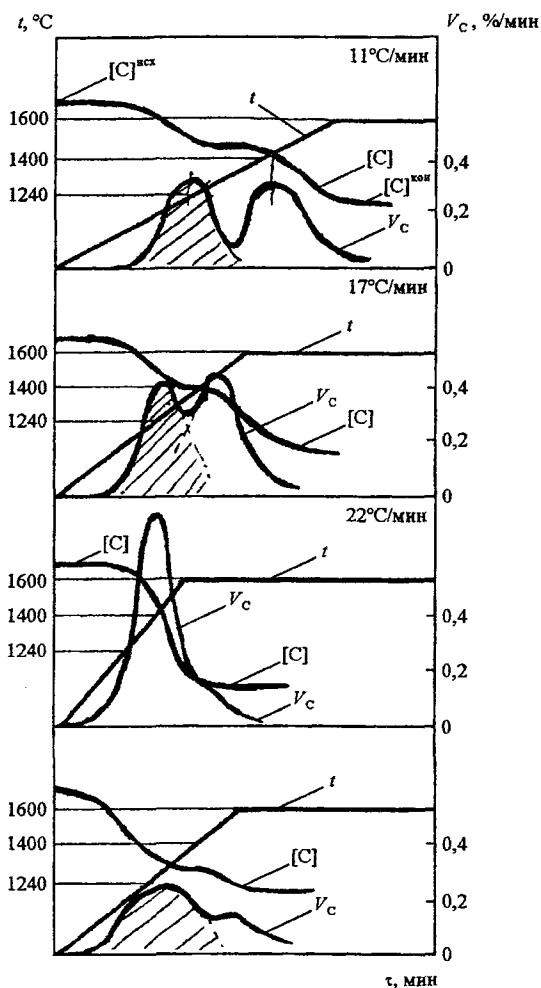


Рис. 9.6. Типичное изменение концентрации углерода ($[C]$, %) в синтикоме, скорости окисления углерода (V_c , %/мин) при различной скорости нагрева (t , °C/мин) (а, б, в) и желательный характер этих зависимостей (г).

Как показывают эти данные, с увеличением скорости нагрева с 11 до 22 °C/мин. и температуры максимум интенсивности окисления углерода резко возрастает — с 0,2 до 0,7 % C/мин. Одновременно с этим максимум скорости окисления углерода сдвигается влево в область более низких температур. Это означает, что обезуглероживание синтикома при возрастании темпа подвода тепла к нему усиливается. Следовательно, скорость окисления углерода синтикома определяется интенсивностью доставки тепла к поверхности слитков композита и температурой нагрева.

Дуговую электропечь отличает огромная неравномерность распределения энергии и тепловых потоков по объему рабочего пространства. В зоне горения дуг концентрация мощности и температуры достигают максимума. Далее за пределами дуг эти показатели постепенно снижаются, однако по-разному. В пределах зоны распада электродов имеет место снижение концентрации энергии и температуры до некоторого уровня, мало изменяющегося по ходу плавки. За внешними границами, расположенными за пределами зоны распада электродов и находящимися между этой зоной и стенами электропечи, равномерность распределения энергии и температур ухудшается. Тепловой поток по направлению от зоны электродов к стенам печи и температура резко падают. Соответственно этому скорость подвода тепла к металлошпигте, включая синтиком, а также температура изменяются, причем в широких пределах, и определяются в первую очередь местом расположения слитков синтикома в металлозавалке. Вследствие этого изменяется время нагрева кусков синтикома и температура их поверхности.

Представленные на рис. 9.6 экспериментальные данные характеризуют режим обезуглероживания синтикома в диапазоне скоростей нагрева $11 - 22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и более. Современные электропечи имеют более высокие скорости порядка $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Следствием этого, как это вытекает из рис. 9.6, является значительное увеличение максимума скорости на кривой окисления углерода. Более подробно эти вопросы представлены в работах [25 – 27]. При наличии в составе синтикома кислорода, равного или большего стехиометрической величины по реакции с углеродом, можно ожидать вследствие быстрого и раннего окисления углерода собственным кислородом получение из синтикома расплава с концентрацией углерода ниже $0,1\%$. В случае недостатка окислителя потребность в кислороде обеспечивается кислородом дутья и атмосферы печи. Следовательно, электропечи характеризуются высокими скоростями переноса тепла к шпигте, особенно в зоне горения дуг и зоне распада электродов, а также повышенными скоростями плавления и значительными температурами нагрева. Поэтому при плавлении синтикома в электропечи следует ожидать весьма интенсивного и полного протекания реакции окисления углерода кислородом оксидов железа и окислителя, поступающего извне.

Исходя из этого, следует обратить особое внимание на размещение слитков синтикома в металлозавалке и последовательность их загрузки. В случае попадания композита в центральную зону, расположенную под электродами и плавящимися непосредственно от энергии дуг, процесс окисления углерода в условиях интенсивного подвода энергии и высоких температур получает интенсивное развитие. При этом следует ожидать практически полного окисления углерода синтикома во время его плавления и отсутствия дополнительного прихода углерода в металлическую ванну.

Процесс быстрого окисления углерода синтикома способствуют также высокие степени перегрева высокоуглеродистой основы и твердого окислителя над линией ликвидуса. Минимальная температура плавления чугуна

составляет 1150°С, твердого окислителя синтикома примерно 1400°С. При температуре расплавления металлозавалки 1550°С минимальный перегрев составит: для жидкого чугуна — 400°С, для окислителя — 150°С. При столь огромных перегревах обеих жидких фаз, дополненных весьма развитой межфазной поверхностью, скорость взаимодействия углерода чугуна и кислорода оксидов железа в синтикоме достигает весьма больших значений. Это следует из уравнения Аррениуса, связывающее константу скорости химической реакции с температурой:

$$K_{\text{хим}} = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (9.1)$$

Компоненты синтикома — высокоуглеродистый сплав и оксиды железа после расплавления находятся в сильно перегретом состоянии, образуя жидкую гомогенную смесь. Согласно уравнения Аррениуса скорость реакций при этом резко возрастает. Одним из примеров этого является конвертерная ванна, в которой средняя по ванне скорость обезуглероживания примерно на два порядка выше, чем в мартеновской плавке. Это объясняется интенсивным подводом кислорода в металл, высокой скоростью образования оксидов и сильным перемешиванием жидкого чугуна и жидких оксидов железа. Если пересчитать среднюю скорость, отнесенную ко всей массе, на объем металла в реакционной зоне, масса которого на два порядка меньше, то истинная скорость обезуглероживания возрастет с 0,1–0,4 до 10–40 %С/мин.

По расчетам Е.А.Капустина самая высокая скорость взаимодействия оксидов железа с углеродом, растворенным в железе, достигается именно в реакционной зоне кислородного конвертера [25]. Она на два порядка превышает аналогичную реакцию в доменной и шахтной печах.

Кислородный потенциал расплавленных оксидов железа значительно превышает потенциал газообразного кислорода и во много раз больше, чем атмосфера печи. Этот факт часто упускают из виду. По расчетам М.Я.Меджибоксского [23] упругость диссоциации оксидов железа при температуре 1600°С, примерно отвечающей концу расплавления в электропечи, составляет $25 \cdot 10^5$ Па (25 атм.). В сочетании с развитой поверхностью раздела фаз это резко ускоряет поступление кислорода в металл и скорость взаимодействия углерода с оксидами железа. При высокой температуре металла даже ввод холодных, не говоря уже о нагретых либо расплавленных окислителях, может привести, как это известно из практики, к взрывообразному ходу обезуглероживания и последующим выбросам.

Возможность окисления углерода с чрезвычайно высокими скоростями, существенно превышающими их величину в конвертерной ванне, была подтверждена неоднократно. Так, в корольках металла в процессе их движения в шлаке скорость окисления углерода составляет 3,6 %С/мин, что на один порядок больше, чем в ванне конвертера. При струйном рафинировании чугуна кислородном по данным В.И.Явойского и сотру-

ников [25] скорость окисления достигала огромных значений – 900 % С/мин. Следовательно, скорость выгорания углерода в окислительной среде (кислороде) на три порядка больше, чем средняя скорость окисления углерода в объеме конвертерной ванны. Таким образом, весьма высокие скорости окисления углерода синтикома в процессе электроплавки являются ожидаемыми и находятся в полном соответствии с экспериментальными данными других исследователей.

Окисление углерода синтикома и выделение при этом СО оказывает ускоряющее влияние на окисление углерода металлической ванны. Это объясняется более ранним образованием шлака при применении синтикома и интенсивным перемешиванием металла и шлака, поскольку синтиком является материалом с высокой газотворной способностью, составляющей приблизительно 35 – 70 нм³ СО/т композита. Далее будет показано, что окисление углерода синтикома в период проплавания металлозавалки и выделение при этом большого количества монооксида углерода в сочетании с его более полным дожиганием в этот период открывает возможность лучшего использования потенциала углерода как дополнительного источника энергии.

Изложенное выше показывает, что синтиком обладает способностью к быстрому и раннему окислению углерода, входящего в его состав. Это значит, что, имея в исходном состоянии до 3,5 – 4,0 % углерода, синтиком по окончании полного расплавления будет содержать, если не принять мер, менее 0,10 % С. Из этого вытекает принципиальные отличия твердого чугуна от синтикома. Если первый после его расплавления сохраняет практически неизменным весь запас углерода и вносит его с собой в металлическую ванну, то синтиком, обладающий в отличие от чугуна способностью к удалению углерода из него в процессе расплавления, не вносит никакого дополнительного количества углерода в металл. Присущая синтикому способность быстро и полно освободиться от углерода еще в период плавания снимает все ограничения с возможной доли этого материала в шихте электропечей и в принципе позволяет работать с любым количеством синтикома в металлозавалке вплоть до 100 %, если это необходимо.

Остаточное содержание углерода в образующемся из синтикома металлическом расплаве поддается регулированию в широких пределах. Прежде всего, этим фактором может быть соотношение массовых долей чугуна и твердого окислителя в синтикоме и их состав, а также расположение синтикома в металлозавалке и режим его загрузки – в первой или второй бадье, снизу, в середине или поверх лома. Естественным регулятором режима поведения углерода являются также традиционные карбюризаторы – кокс, чугун, бой электродов и др., вводимые в шихту. Далее будет показано, что тенденция получения по расплавлению синтикома расплава с содержанием углерода менее 0,10 % не ограничивает сортамент выплавляемых сталей в отношении углерода. Используя регуляторы, упомянутые выше, можно

получать с использованием синтикома стали любого сортамента, включая высокоуглеродистые.

Выше речь шла о синтикоме стандартного состава, состоящего в базовом варианте из высокоуглеродистого сплава и твердого окислителя. Значительный интерес для электроплавки представляет синтиком, в состав которого дополнительно введен углеродсодержащий материал, например, в виде оксидоугольных брикетов, окатышей или просто углерода. "Углеродсодержащий" синтиком имеет преимущества в электроплавке по сравнению с обычным синтикомом, благодаря более высокому содержанию углерода и возможности регулирования его в широких пределах. Можно предполагать, что у этого вида синтикома имеются перспективы для широкого применения в электросталеплавильном производстве. Одним из основных преимуществ его является возможность обеспечения любого заданного содержания углерода в расплаве, образующемся из синтикома, и в металлической ванне.

Результаты апробации синтикома на заводах Steel Dynamiks Inc. (SDI), Nucor Steel Crafordsvill (NSC), Nort Star Steel Texas (NSST) подтвердили, что окисление углерода синтикома протекает весьма полно и обеспечивает получение низкого и стабильного содержания углерода в ванне в пределах 0,03 – 0,051 %. Так, при использовании синтикома в количестве 10 – 20 % от массы металлошихты и загрузке его в первую бадью содержание углерода на выпуске составило 0,029 % при изменении в пределах 0,026 – 0,040 %. При этом отмечено, что по мере увеличения расхода синтикома на плавку с 10 до 40 т содержание углерода в металле имело тенденцию к дальнейшему снижению.

Завод NSC оснащен 115 т дуговыми печами, использующими в период проведения испытаний карбид железа и твердый чугун соответственно в количествах 6,5 и 14 %. При полной замене твердого чугуна и части скрапа синтикомом с массой его 20 – 30 % от общей металлозавалки среднее содержание углерода на выпуске составило 0,038 % при изменении в пределах 0,03 – 0,05 %.

Интересные данные получены на 120 т электропечи завода NSST. На этом заводе весь твердый чугун был заменен синтикомом (22 %). Последний загружали в первую бадью — 12 % и вторую — 10 %. Использование синтикома вместо твердого чугуна снизило содержание углерода в среднем с 0,224 до 0,04 % при лучших основных показателях электроплавки.

Таким образом, опыт использования синтикома в электропечах в самых разных условиях шихтовки и др. параметров плавки подтвердил, что обезуглероживание синтикома происходит быстро и полно. Процесс окисления углерода в синтикоме ускоряет также обезуглероживание всей металлической ванны.

С позиций окисления углерода синтиком и твердый чугун являются абсолютно разными материалами. Первый из них при нагреве и расплавлении характеризуется весьма повышенной склонностью к обезуглероживанию и способностью к интенсификации этого процесса в сталеплавильной ванне.

Таблица 9.3

Концентрация углерода в металле по расплавлению

Количество синтикома на плавку, т	Количество плавов	Содержание углерода, масс. % вверх пределы изменения, внизу – среднее
Без синтикома	26	$\frac{0,12 - 1,12}{0,45}$
10	14	$\frac{0,06 - 0,82}{0,42}$
20	13	$\frac{0,11 - 0,74}{0,35}$
30	25	$\frac{0,11 - 0,91}{0,45}$
40	2	$\frac{0,59 - 0,87}{0,73}$

Чугун в отличие от синтикома сохраняет практически неизменным весь начальный запас углерода и вносит его в ванну, формирующуюся в результате расплавления исходной металлозавалки.

Применение синтикома, несмотря на его повышенную склонность к обезуглероживанию, позволяет получать в пробе по расплавлению шихты и более высокое содержание углерода вплоть до 0,73 %. В табл. 9.3 приведено содержание углерода в металле по расплавлению при испытании синтикома, содержащем 80 – 85 % чугуна и 15 – 20 % окисленных окатышей, в 150 т электропечах ОАО “ВТЗ”.

Результаты проведенных плавов свидетельствуют, что ввод синтикома в шихту несмотря на его склонность к обезуглероживанию, позволяет получить требуемое содержание углерода по окончании плавления металлошихты.

Особый интерес представляют плавки, проведенные в электродуговой шахтной печи ЭСПЦ ОАО “Северсталь” в сентябре – октябре 2002 г. специалистами ОАО “Северсталь”, ООО “НПМП Интермет-Сервис” и фирмы “Fuchs Technology”. Данная печь имеет шахтный подогреватель и работает с использованием в шихте жидкого передельного чугуна в количестве до 55 т на плавку. В этих опытах ставилась задача достижения максимально возможной доли первородных материалов, прежде всего, синтикома и жидкого чугуна. Естественно, что в этом случае содержание углерода в шихте получалось весьма высоким и достигало 2 % и более. Спецификой работы данной печи является использование жидкого чугуна, подогрев лома,

короткое время работы печи под током — порядка 30 мин, отсутствие возможности ввода в печь кускового науглероживателя, высокий расход кислорода на плавку. В опытах использовали синтиком марок СК19, состоящий из передельного чугуна и агломерата, производимых ОАО “Северсталь”. Согласно расчетам синтиком этого состава содержит избыточное количество углерода по отношению к кислороду. В результате расплавления этого композита образовавшийся металл должен содержать 0,8 – 1,0 % и вносить его в общую ванну. Однако проведенные плавки с использованием синтикома выявили в большинстве случаев пониженное содержание углерода в жидком металле — менее 0,10 %. При этом относительная доля высокоуглеродистых материалов в металлозавалке — синтикома и жидкого чугуна достигала 62,1 %. Эти данные окончательно подтвердили высокие скорости обезуглероживания синтикома и практически полное его окисление, а также влияние композита на окисление углерода в ванне. Поэтому синтиком, внося углерод в шихту, практически не вносит углерода в металл, полученный в результате проплавки исходной металлозавалки. Это принципиально отличает синтиком от чугуна.

Большой объем исследований выполнен на 120 т дуговой печи системы “Данарк” Молдавского металлургического завода. Всего было переработано 2000 т синтикома марки СК15 производства ОАО “Тулачермет”, содержащая в качестве окислителя железорудные окатыши. К сожалению, как показали дополнительные исследования, состав синтикома отличался большими колебаниями наполнителя в пределах от 7,5 до 27,2 %.

Количество синтикома на плавку варьировалось от 10 до 40 т. В последнем случае 30 т композита загружали в завалку, а 10 т — в первую подвалку. Среднее содержание углерода по расплавлению составило 0,059 % при вводе 20 т синтикома в завалку и 0,11 % при вводе 19 – 29 т синтикома в завалку и 10 – 11 т в подвалку. Среднее содержание углерода в текущих плавках на 100 % оказалось равным 0,09 %.

Полученные данные подтверждают высокую скорость обезуглероживания синтикома и получение практически одинакового содержания углерода в металле по расплавлению при работе на 100 % лома и работе с использованием в плавке до 40 т синтикома. Для сравнения были проведены две специальные плавки с содержанием в металлошихте вместо синтикома передельного чугуна в количестве 30 т на плавку (20 %). По расплавлению металл содержал в среднем 0,58 %, степень его окисления составила всего 60 %. Для удаления избыточного углерода потребовалось ввести в печь около 950 нм^3 кислорода и увеличить время работы печи под током на 9 – 10 мин. Это привело к увеличению расхода энергии на 85 кВтч/т годного металла, а также увеличению удельного расхода кислорода до 52,2 $\text{нм}^3/\text{т}$ против 40 $\text{нм}^3/\text{т}$ на рядовых плавках. Приведенные выше данные подтверждают преимущества синтикома перед чугуном в отношении поведения углерода в электроплавке.

Резюмируя особенности окисления углерода в материалах типа синтиком, приходим к выводу о том, что введение в состав чугуна на стадии

его изготовления твердого окислителя и превращение за счет этого твердого чугуна в композит принципиально изменяет механизм, термодинамику и кинетику окисления основной реакции — окисления углерода. С этих позиций синтиком, содержащий в исходном состоянии до 3,5–4 % углерода, после своего расплавления и окисления подавляющей части своего углерода, принципиально отличается от чугуна, являющегося по отношению к металлической ванне науглероживателем. Более того, интенсивное обезуглероживание, происходящее в синтикоме, затрагивает и реакцию окисления углерода в металлической ванне, ускоряя ее.

9.4. Механизм образования шлаков при переплаве синтикома

Слитки синтикома представляют собой законсервированные в твердом передельном чугуне или полупродукте включения твердого окислителя. В чугуне содержится примерно 4,2–4,5 % углерода, от 0,2 и выше кремния, от 0,3 до 0,9 % марганца. В наполнителе синтикома содержится как правило более 85 % (85–94 %) Fe_2O_3 , от 4,5 до 7,7 % SiO_2 , от 0,2 до 2,4 % CaO , а также другие примеси (Al_2O_3 , MgO и проч.), содержание которых определяется составом железной руды.

При нагреве синтикома выше 800 °C в твердом материале начинаются реакции между растворенными в чугуне кремнием, марганцем, углеродом и оксидами железа, содержащимися в наполнителе. Из-за отсутствия возможностей для удаления продуктов окисления из твердой фазы первоначально значительного развития эти реакции не получают. Лабораторные исследования показали, что только после достижения температуры 1150–1200 °C — температуры плавления металлической основы, реакции начинают идти с достаточно высокой скоростью (например, окисление углерода идет со скоростью 0,1–0,2 %/мин и более). При дальнейшем нагреве (после начала плавления окислителя при 1350–1400 °C) скорости реакций $[\text{Si}]+(\text{Fe}_2\text{O}_3) \rightarrow (\text{SiO}_2)+(\text{FeO})$; $[\text{Mn}]+(\text{Fe}_2\text{O}_3) \rightarrow (\text{MnO})+(\text{FeO})$; $[\text{C}]+(\text{Fe}_2\text{O}_3) \rightarrow \text{CO}+(\text{FeO})$ увеличиваются в несколько раз, а скорость обезуглероживания достигает 0,3 %/мин. и более. В результате интенсивного образования и выделения пузырей CO в синтикоме возникает плако-металлическая эмульсия. Следовательно, процессы расплавления, окисления примесей, восстановление железа при плавлении синтикома одновременно сопровождаются образованием шлаковой фазы с растворением в ней извести и остатков шлака от предыдущей плавки. Благодаря этому в синтикоме устраняется отставание процесса шлакообразования от рафинирования металла. Состав “первичного” шлака, образующегося из синтикома в сталеплавильном агрегате еще до начала плавления стального лома (1480–1530 °C), определяется соотношением между примесями “пустой породы” рудной части синтикома, наличием растворенных в чугуне кремния, марганца, фосфора и других элементов, а также большой скоростью

образования монооксида железа (FeO) в металлошихте в результате окисления железа. Содержание FeO в этом шлаке может достигать 40 %. Высокое содержание оксидов железа улучшает дефосфорацию жидкого металла, обеспечивает снижение содержания в расплаве марганца и кремния до величин менее 0,1 %. Одновременно с этим достигается высокая интенсивность растворения кусков извести и других шлакообразующих материалов. Это отличает синтиком от процессов переплава шихты из 100 % стального лома либо из 100 % чугуна. Образующийся при расплавлении синтикома активный "первичный" шлак, формирующийся еще при температурах до 1400 – 1450°С, позволяет в электродуговых печах обеспечить экранирование дуг ("открытая" дуга из-за высокого излучения приводит к тепловым потерям и интенсивному разрушению футеровки свода и стен), а в кислородных конвертерах обеспечивает ускоренное растворение извести с формированием шлака оптимального состава. По данным В.В.Рябова (ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат") замена синтиком лома в 160-тонных конвертерах привела к повышению средней стойкости футеровки конвертера 952 до 970 плавов. При этом средняя скорость износа футеровки уменьшилась с 1,11 до 0,7 мм за плавку, а количество операций торкретирования сократилось с 96 до 83 за кампанию конвертера. По данным Молдавского металлургического завода при замене синтиком 120-тонной дуговой электропечи расход электродов снизился с 2,35 до 2,23 кг/т, расход электроэнергии с 450 до 426 кВтч/т стали. Промышленные предприятия, на которых синтиком использовался в качестве одной из составляющих металлошихты, подтверждают, что его применение улучшает шлакообразование, несмотря на то, что режимы плавов на синтикоме пока не отработаны. Синтиком является новым и не до конца изученным шихтовым материалом, не раскрывшим полностью свой потенциал. Можно ожидать, что по мере накопления опыта его использования будут достигнуты лучшие результаты по сравнению с нынешним уровнем.

9.5. Влияние синтикома на удаление фосфора и серы

Одной из основных проблем при выплавке чистых сталей является дефосфорация металла, поскольку фосфор практически не удаляется при внепечной обработке. Аналогичным образом обстоит дело с удалением фосфора в процессе внедоменного рафинирования чугуна. Остаточное содержание фосфора для ряда марок сталей не должно превышать 0,015 – 0,020 %. С учетом внесения фосфора легирующими элементами и раскислителями концентрация фосфора в металле перед выпуском должна быть ниже 0,015 %. Передельный чугун и соответственно синтиком содержат в среднем 0,06 – 0,10 % фосфора. Поэтому синтиком наряду с чугуном является основным источником поступления фосфора в металл.

Обычный первичный шлак, образующийся в результате окисления части примесей чугуна и стального лома, имеет низкую основность, определяемую

преимущественно наличием в нем некоторого количества CaO , оставленного в печи шлаком предыдущей плавки. Присутствие в завалке чугуна, содержащего Si и Mn , вызывает снижение содержания FeO в шлаке из-за расходования на окисление этих примесей. В результате этого первичный шлак помимо его малой основности содержит пониженную концентрацию FeO в шлаке. Вместе взятые, эти факторы ограничивают дефосфорицию металлического расплава. Собственно этим объясняется наблюдаемый в практике работы факт получения в металле повышенного содержания фосфора при работе на шихте с повышенным содержанием жидкого и/или твердого чугуна.

В этом отношении синтиком, содержащий оксиды железа, превосходит чугун, обеспечивая получение в первичном шлаке более высокое содержание FeO . При расплавлении слитков синтикома происходит высвобождение части оксидов железа, не успевших вступить в реакцию с углеродом синтикома, особенно в начале плавления, когда ванна еще далека от полного расплавления. В результате этого оксиды железа поступают в шлак, увеличивая активность FeO в нем и ускоряя растворение извести. Кроме того, процесс дефосфорации в синтикоме происходит более эффективно, так как удельная реакционная поверхность в нем намного больше, чем на границе шлак-металл в сталеплавильной ванне. Работа с использованием в шихте синтикома обеспечивает ввод оксидов железа вглубь металлической шихты и формирующейся жидкой ванны. Это увеличивает поверхность и длительность контакта оксидов железа с расплавом и повышает степень дефосфорации по сравнению с чугуном. Дополнительным фактором, облегчающим дефосфорацию, является выделение монооксида углерода, перемешивание металла и шлака, вспенивание шлаковой фазы под влиянием газа и ранний сход шлака из печи. Этот факт был неоднократно отмечен при проведении плавов с использованием синтикома [11,12,16]. Вместе взятые, это обеспечивает лучшую дефосфорицию металла на ранних стадиях плавки и с более высокой эффективностью по сравнению с чугуном.

Следовательно, использование синтикома в шихте электропечей создают предпосылки для получения пониженных содержаний фосфора в металле перед выпуском.

Особо интересными с этих позиций представляют исследования по апробации синтикома в электропечах ОАО "Северсталь", применяющих жидкий чугун в качестве одной из составляющих металлозавалки. С учетом синтикома общая доля композита и жидкого чугуна во время опытов достигали больших значений, равных 22,1 – 62,1 %. Несмотря на это, на серии плавов с синтикомом среднее содержание фосфора составило 0,007 % при колебаниях от 0,005 до 0,015 %. На плавках без синтикома среднее содержание синтикома получилось равным 0,012 %.

Данные других исследований также подтверждают положительное влияние синтикома на удаление фосфора. В уже упомянутых работах на заводе SDI содержание фосфора в металле на выпуске составило в среднем

0,0044 %, на заводе NSST – 0,0048 %. На сравнительных плавках эти показатели составили 0,012 – 0,015 %. В условиях Молдавского металлургического завода содержание фосфора в стали, выплавленной на синтикоме, составило 0,0136 %. Это соответствует уровню контрольных плавков на ломе, хотя содержание фосфора в ломе обычно ниже чугуна и находится на уровне 0,04 %. Несмотря на увеличение в шихте доли синтикама, содержащего значительно большую концентрацию фосфора, концентрация фосфора не возросла и осталась на обычном уровне. Это указывает на то, что хотя синтиком и вносит с собой в шихту повышенное количество фосфора, однако он одновременно создает условия для улучшения дефосфорации. Поэтому проблема с фосфором при работе на синтикоме решается успешно.

Основным источником серы в металле являются шихтовые материалы, прежде всего лом, особенно копровый, могущий содержать 0,04 % серы и более. Чугун и синтиком, производимый на его основе, содержат менее 0,015 – 0,025 % серы. В современной практике удаление серы в сталеплавильных агрегатах происходит в относительно небольшой степени и осуществляется преимущественно при внепечной обработке стали. Поэтому ввод синтикама в шихту электропечи не может оказать существенного влияния на остаточное содержание серы.

Вместе с тем, получение расплава с пониженным уровнем содержания серы всегда желательно, так как позволяет снизить расход реагентов в процессе внепечной обработки. Как уже упоминалось выше, применение синтикама ускоряет формирование шлака и улучшает его рафинирующие качества. Тем самым открываются возможности для некоторого удаления серы. Однако опытные плавки с синтикомом, проведенные на заводах различных стран и в условиях, весьма отличающимися друг от друга, не выявили значительного влияния синтикама на десульфурацию металла. Содержание серы на выпуске на разных заводах сохранялось на прежнем уровне либо понижалось, как на заводе NSST с 0,025 до 0,018 %. Пока можно лишь констатировать, что применение синтикама, во всяком случае, не ухудшает удаление серы. Предпосылкой для этого является более быстрое формирование активного шлака при работе электропечи с использованием синтикама.

9.6. Влияние синтикама на содержание азота в металле

Одновременное наличие в составе синтикама углерода и оксидов железа обеспечивают окисление углерода и образование монооксида углерода с самого начала плавления. Выделение CO вызывает кипение формирующегося жидкого металла и шлака и улучшает экранирование дуги. Благодаря этим факторам использование синтикама должно приводить к уменьшению концентрации азота.

Однако положительный эффект влияния синтикама в полной мере может проявиться лишь при условии, когда окисление углерода и кипение ванны

охватывает весь период плавки от плавления и нагрева сформировавшейся ванны до температуры выпуска [14]. Поэтому выбор марки синтикама, его доли в шихте, режима загрузки синтикама в печь, его расположение в металлозавалке, энергетические параметры периода плавления, количество науглероживателя и т.д. должны производиться с таким расчетом, чтобы обеспечить выделение СО на протяжении всей электроплавки – от момента начала проплавления металлозавалки до выпуска металла. Для достижения той цели следует обеспечить необходимый запас углерода в металле после расплавления.

Опытные плавки подтвердили позитивный характер влияния синтикама на содержание азота в металле. Применение синтикама в количестве более 10 т на плавку обеспечило во всех случаях без исключения выплавку сталей с содержанием азота менее 0,008 %, хотя достичь в проведенных плавках активного кипения ванны и ее деазотации не удалось. Для подтверждения приведем результаты опытных плавки с использованием синтикама. Так, на заводе NSC при вводе синтикама в металлозавалку в количестве 20 – 30 % содержание азота в металле перед выпуском в среднем составило 0,0078 %, на Молдавском металлургическом заводе при средней доле композита 20 % - 0,0077 в первой и 0,0080 % во второй пробе. Эти величины соответствуют в целом требованиям по содержанию азота в металле, однако эти результаты нельзя считать максимально возможными. Одним из возможных путей дальнейшего снижения концентрации азота в стали может быть ввод синтикама в ванну по ходу плавки. Это предложение было опробовано на мартеновской печи ОАО “ВМЗ”, где ввод материалов в печь по ходу доводки с помощью мульд в отличие от электропечи не представляет трудностей. Оказалось, что синтиком погружается на подину печи и практически сразу начинает генерировать СО, вызывая интенсивное кипение металла и шлака аналогично донной продувке и тем самым способствуя деазотации. Однако для использования этой возможности в электропечах необходимо внести в конструкцию некоторые изменения.

Другим возможным выходом из положения и обеспечения кипения металла в электропечи является увеличение размеров и массы слитков синтикама. Специальные исследования, в которых использовали слитки этого материала с увеличенной до 180 кг массой [1,4], подтвердили возможность пролонгирования времени плавления синтикама и кипения металлической ванны на протяжении жидкого периода плавки.

Таким образом, ввод синтикама в шихту обеспечивает кипение и рафинирование образующегося жидкого металла в период плавления. Это создает необходимые условия для борьбы с азотом, но недостаточные. Во избежание перехода азота в металл в период нагрева ванны и окислительный период ванна по расплавлению должна иметь запас углерода. Этот запас должен обеспечить непрерывное активное кипение металлической ванны в жидкий период электроплавки. Синтиком снижает концентрацию углерода по расплавлению металла при загрузке в первую бадью. Поэтому, если

необходимо снизить концентрацию азота в металле, необходимо изменить шихтовку плавки, загружая часть синтикама в печь со второй бадьей и увеличивая, тем самым, содержание углерода в металле по расплавлению. Другим приемом является ввод карбюризатора в печь либо использование углеродистого синтикама или смеси чугуна и синтикама.

9.7. Выход годного железа при использовании синтикама в металлошихте

При сопоставлении выхода железа из синтикама и чугуна необходимо учитывать весьма важное отличие этих материалов, которое в данном случае носит принципиальный характер. Первый из них в отличие от чугуна является композиционным материалом, состоящим из двух компонентов – чугуна и окислителя. Чугун же, являющийся основой синтикама, представляет собой однокомпонентный материал и выполняет роль металлической основы первого материала – синтикама. Поэтому чугун синтикама и просто чугун при равенстве масс композита и высокоуглеродистого сплава соотносятся как часть и целое. Исходя из этого, прямое сравнение 1 т синтикама любого состава и 1 т чугуна без учета этих особенностей является не полным, а в ряде случаев может привести к неточным выводам. Поясним это на примере. При разбавлении чугуна твердым окислителем, а именно это происходит при получении синтикама, концентрация ведущего компонента в композите — чугуна снижается в зависимости от марки синтикама на 5 – 25 %. Так, синтиком марки СК20, получаемый путем ввода в 1 т чугуна 250 кг твердого окислителя содержит 80 % чугуна, остальное – наполнитель. Поскольку основу наполнителя составляют оксиды железа, состоящие из железа и кислорода, то замещение части чугуна этим материалом автоматически вызывает снижение общего содержания железа в синтикоме по сравнению с твердым чугуном до уровня примерно 90 %. Некоторую роль в этом играют также примеси пустой породы, всегда присутствующие в том или ином количестве в твердом окислителе, за исключением прокатной окалины. Поэтому общее исходное содержание железа в 1 т синтикама всегда меньше и составляет примерно 860 – 910 кг/т. Отсюда следует, что оценку выхода жидкого железа из синтикама и шихты, включающей синтиком, необходимо производить с обязательным учетом исходной концентрации железа в композите. По отношению к лому это означает, что замена его синтиком должна производиться в примерном соотношении по массе 1:1,1 вместо 1:1.

Однако при оценке выхода жидкого железа на плавках с синтиком этот фактор не учитывался. Считали, что замена лома и чугуна синтиком должна производиться в соотношении по массе 1:1, хотя синтиком в исходном состоянии содержит меньше железа, чем эти материалы. Тем самым синтикому приписывали более высокое исходное содержание железа по сравнению с фактическим. Эти завышенные ожидания по содержанию железа и игнорирование факта более низкого общего содержания железа в синтикоме

по сравнению с ломом и чугуном вызвали искусственное занижение показателей выхода железа из синтикома. Поэтому данные о выходе железа из шихты при вводе в нее синтикома являются несколько заниженными. Это заведомо ставит синтиком в менее выгодное положение.

По расчетам замена 10 т стального лома 10 т синтикома должна приводить к снижению выхода жидкого металла примерно на 0,8 – 1,2 %. Для синтикома марки СК15 абсолютное снижение извлечения железа из синтикома для данного случая при полном восстановлении железа составляет с учетом окисления всех примесей чугуна синтикома ориентировочно 900 – 950 кг железа на 10 т материала или 9 – 9,5 %.

Необходимо отметить еще одно важное обстоятельство. Синтиком в отличие от чугуна содержит в своем составе значительное количество кислорода.

Для превращения 1 т чугуна в сталь требуется $47,5 \text{ нм}^3$ кислорода. Фактический расход кислорода выше и достигает 55 – 60 $\text{нм}^3/\text{т}$. Превращение 1 т чугуна в синтиком марки СК20 сопровождается вводом в чугун 250 кг твердого окислителя, содержащего 62,5 кг кислорода или $44,6 \text{ нм}^3 \text{O}_2$. Иными словами, в отличие от чугуна, для рафинирования которого в него нужно ввести кислород, синтиком марки СК20, полученный из 1 т чугуна и имеющий массу 1,25 т, уже содержит в своем составе необходимое количество кислорода. Разница заключается только в том, что в синтикоме кислород является конденсированной фазой, а для чугуна требуется газообразный кислород. Этот пример наглядно показывает, что нельзя сравнивать 1 т чугуна и 1 т синтикома, поскольку первый является частью второго и не содержит кислорода. Либо же, если в этом есть необходимость, следует учесть наличие в синтикоме кислорода и исключить его при оценке выхода железа из синтикома.

Следовательно, сопоставление выхода железа из 1 т чугуна и из 1 т синтикома должно производиться при условии обязательного учета содержания железа в этих материалах в исходном состоянии. Это означает, что оценка выхода железа из синтикома и чугуна либо лома должна базироваться на соотношении по массе 1,1:1, а не 1:1, как это наблюдается. При обработке результатов опытных плавов эти положения не были учтены, что привело к искусственному занижению показателя выхода железа из синтикома.

Помимо отмеченных выше различий, синтиком и чугун, отличаясь друг от друга по составу и свойствам, ведут себя по-разному во время плавки. С позиций рассматриваемого вопроса о выходе железа основным отличием в поведении синтикома от чугуна является окисление части углерода и всего кремния и марганца синтикома собственным кислородом в виде оксидов железа, введенных в его состав при получении. Благодаря этому процесс окисления примесей чугуна синтикома сопровождается значительно меньшим окислением железа либо даже полным его отсутствием, что зависит от состава композита.

Синтиком благодаря меньшему окислению железа в процессе плавки обеспечивает определенное снижение потерь железа на окисление. Эта своеобразная экономия железа повышает выход железа из синтикама. По своей величине снижение степени окисления железа может даже перекрыть потери на окисление железа, наблюдаемые в чугунах и которые достигают значительных размеров порядка 5 – 6 % [29,30].

По данным Немтинова А.А., Зинченко С.Д. и соавторов [29,30] при работе 375 т конвертеров на шихте из 80 % жидкого чугуна и 20 % лома общие потери железа достигают 12,07 % или 120,71 кг/т, а выход жидкого в лучшем случае составляет 89%. Из этого следует, что в процессе продувки физический угар железа чугуна достигает 6 %.

В отличие от чугуна в синтикоме углерод окисляется собственным кислородом с существенно меньшими потерями железа на окисление либо даже без окисления. Экономия железа в синтикоме при этом может достигнуть 5 %. Это значение заметно перекрывает меньшее содержание железа в 1 т синтикама в исходном виде и выравнивает выход железа из синтикама и чугуна. Таким образом, при сопоставлении выхода железа из синтикама и чугуна, помимо различия в исходном содержании железа, необходимо учитывать реальные потери железа, сопровождающие процесс выплавки стали из них. Подчеркнем еще раз, что окисление кремния, марганца и большей части углерода в синтикоме происходит за счет собственного кислорода, присутствующего в этом композите. Поэтому процесс окисления указанных элементов идет без дополнительного окисления железа кислородом либо с минимальными потерями железа. Благодаря этим факторам, синтиком, уступая чугуну по содержанию железа в исходном состоянии, но имея меньшие потери железа на окисление в процессе плавки, может иметь в конечном счете выход железа на уровне чугуна и выше в зависимости от режима электроплавки.

Благоприятное влияние на выход железа из шихты оказывает реакция между углеродом чугуна и оксидами железа, вызывающая образование газообразного продукта реакции в виде CO. Этот газ поступает в рабочее пространство печи, не занятое шихтой и дожигается с увеличением объема газов, вытесняя при этом из печи воздух, засасываемый в печь через неплотности, и создавая в ней избыточное давление газов. В результате этого окислительный потенциал атмосферы печи снижается.

Кроме того, часть кислорода, присутствующего всегда в атмосфере печи, расходуется на горение CO, что дополнительно снижает содержание кислорода в печных газах. Благодаря этому поверхность металлолома меньше окисляется, снижая тем самым угар железа.

Это снижение в зависимости от конкретных условий электроплавки может по своей величине достигать и перекрывать с избытком меньшее количество железа, вносимого синтикомом. Следовательно, с одной стороны, 1 т синтикама вносит железа меньше, чем 1 т лома, снижая тем самым его выход. С другой стороны, при замене части лома синтикомом потери железа

за счет окисления поверхности лома, как и потери железа в самом синтикоме при его плавлении, снижаются. По своей величине эти суммарные могут быть как меньше, так и больше количества железа, недополученного из синтикома. Поэтому в общем случае выход железа при работе электропечи на смеси синтикома и лома может быть как меньше, так и больше по сравнению с использованием в шихте 100 % лома. Это зависит в значительной степени от того, в какой степени удалось реализовать возможности синтикома.

Ниже приведены данные о влиянии состава металлошихты с различной долей в ней синтикома на выход жидкой стали, основанные на принципе, что 1 т синтикома независимо от его состава и общего содержания железа в нем должны заменять 1 т металлолома или твердого чугуна в соотношениях по массе 1:1. Некорректность этого подхода была показана выше. Результатом такого подхода к оценке выхода железа из синтикома является списание на него нехватки железа, обусловленное тем, что синтикому приписывается содержание железа, которого в действительности нет. Поэтому приводимые результаты по выходу жидкого являются заведомо заниженными по сравнению с действительными, поскольку не учитывают меньшего исходного содержания железа в синтикоме и присутствия в нем кислорода. Тем не менее они представляют значительный интерес и характеризуют влияние синтикома на выход железа.

Приведенные цифры не учитывают снижения степени окисления железа в самом синтикоме и металлоломе, плавящемся совместно с синтикомом и который снижает интенсивность окисления поверхности лома за счет выделения СО при плавлении композита. Аналогичным образом обстоят дела с результатами оценки выхода железа в электроплавке при работе печи с использованием синтикома. Тем не менее в большинстве случаев выход жидкой стали на опытных плавках, заведомо заниженный благодаря неточной методике расчета этого показателя, оказался выше, чем на контрольных плавках с шихтой из 100 % металлолома.

Так, для 120 т электропечи Молдавского металлургического завода с использованием в шихте 20 % синтикома марки СК15 средний выход годного по всему массиву составил 91,3 % против 89 – 89,5 % на сравнительных плавках со 100 % лома. При замене твердого чугуна и лома синтикомом в количестве 10 – 30 % от массы шихты в 150 т печи завода SDI выход жидкой стали не изменился и составил 93 %. Аналогичные результаты получены также в 120 т электропечи завода NSST при замене в шихте 20 т чугуна равным количеством синтикома. Выход годного с использованием синтикома не уменьшился и оказался равным 88 %.

Опытная партия синтикома марки СК15П, изготовленная ОАО "ЧМЗ", была опробована при выплавке стали в 60 т высокомошной печи завода "Киа Стил" (Южная Корея). Выход жидкой стали на опытных плавках со средним содержанием синтикома в металлозавалке 17 % по всему массиву плавки оказался равен 93,1 % против 93 % на контрольных плавках на шихте из

100 % лома. Исключением являются результаты, полученные при использовании синтикома совместно с карбидом железа на 115 т дуговой печи завода NSC. Расход синтикома на плавку достигал 20 – 30 % при доле карбида железа 6,5 %. Выход жидкого при этих условиях на опытных плавках снизился до 87,4 %. Причиной этого, на наш взгляд, являются особенности энерготехнологического режима плавки, независящие от исследователей. К ним относятся относительно малый удельный расход энергии на проплавление исходной металлозавалки (всего 163 кВтч/т шихты) и повышенная до 40 % доля тяжеловесной шихты, а также специфический характер карбида железа (порошок) и способа его подачи (вдувание в ванну).

Приведенные значения выхода жидкого железа, полученные на плавках с использованием синтикома самого различного состава, с различным расходом на плавку и в электропечах различной вместимости свидетельствуют о том, что снижения выхода железа при замене лома и твердого чугуна синтикоком не наблюдаются. Отметим еще раз, что эти данные получены исходя из допущения, что одна тонна синтикома должна заменять одну тонну лома, то есть в соотношении 1:1 вместо 1,1:1, как было показано выше. Следует признать, что имеющихся на сегодня данных недостаточно для оценки выхода жидкого железа при работе электропечи на разных видах металлошихты и их комбинации. Поэтому необходимы дальнейшие исследования.

Иллюстрацией этого являются результаты опытных плавки в 150 т электропечи завода SDI (США), приведенные в табл.9.4 и рис.9.7. Видно, что при использовании вместо чугуна синтикома марки СК17 в количестве 17 % выход жидкой стали снизился до 92,30 % вместо 94,82 % при работе на смеси 86 % лома и 14 % твердого чугуна. В 1 т используемого синтикома

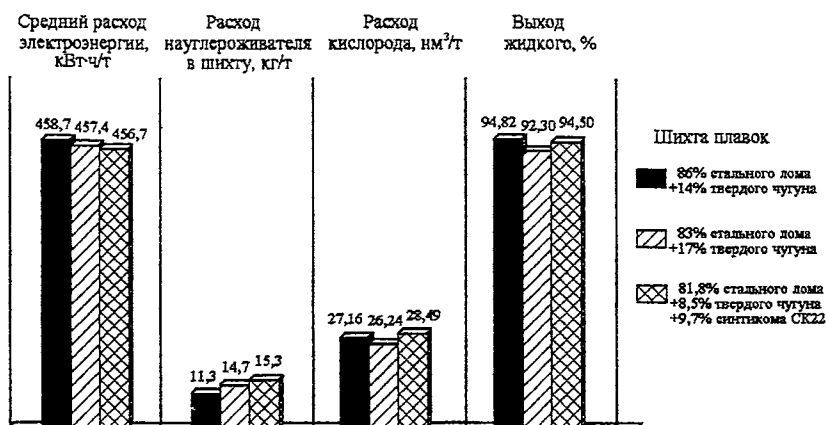


Рис. 9.7. Сопоставление основных параметров электроплавки стали на заводе "SDI".

содержится 830 кг чугуна и 170 кг твердого окислителя. Это дает 788,5 кг металлического и 112 кг окисленного железа, всего 900,7 кг на 1 т синтикома или 90,07 %. При 100 % извлечении железа из его оксидов, расчетный выход для варианта работы на смеси лома и синтикома в соотношении 83:17, равен:

$$94,82 \cdot 0,83 + 90,07 \cdot 0,17 = 78,370 + 15,31 = 94,01 \%.$$

Значение 94,82 % относится к выходу железа при работе печи на 86 % лома и 14 % чугуна. Следовательно, расчетные и полученные значения по выходу годного – соответственно 94,01 и 92,30 % заметно отличаются. Подойдем к этому вопросу с другой стороны и определим, а какой выход железа должен быть при работе на 83 % лома и 17 % синтикома СК17, если этот показатель на 86 % лома и 14 % чугуна достигал 94,82 %? Из соотношения $94,82 \cdot 0,83 + X \cdot 0,17 = 92,30$ получаем

$$X = \frac{92,30 - 78,70}{0,17} = \frac{13,6}{0,17} = 80\%$$

Следовательно, если признать показатель выхода жидкого при использовании в шихте 17 % синтикома и 83 % корректным и равным 92,30 %, то выход железа из синтикома должен составить 80 % или 800 кг железа вместо 900,7 кг/т синтикома. Это значение (800 кг) соответствует количеству железа, вносимого чугуном 1 т синтикома СК17. Некорректность полученных цифр является очевидной. Причины этого были изложены выше.

Таблица 9.4

Основные результаты плавки в 150-т электропечи завода «Steel Dynamics Inc.» (Батлер, штат Индиана) на различной шихте

Параметры плавки	1*	2*	3*
Количество анализируемых плавов	440	14	10
Время работы печи "под током", мин.	48,3	48,2	49,6
Расход нефтекокса в шихту, кг/метр.тн	11,3	14,7	15,3
Расход угольного порошка, кг/метр.тн	7,3	Н.д.	8,8
Расход кислорода, нм ³ /метр.тн	27,16	26,24	28,49
Содержание кислорода в стали, ррп	985	1096	1008
Содержание углерода в стали, ррп	29	28	27
Средний расход электроэнергии, кВтч/метр.тн	458,7	457,4	456,7
Средний выход стали, % от массы шихты	94,82	92,30	94,50

1* — 86% лома + 14% твердого чугуна ("традиционная" технология)

2* — 83% лома + 17% синтикома СК17 (апрель 1998 г.)

3* — 81,8% лома + 8,5 % твердого чугуна + 9,7% синтикома СК22 (сентябрь 1998 г.).

9.8. Влияние синтикама на расход электроэнергии

Рекомендуемые для использования в электропечах марки синтикама СК5, СК10 и СК15 обладают меньшим охлаждающим эффектом по сравнению со стальным ломом. Следовательно, применение этих композитов при выплавке стали требуют меньших энергозатрат. Поэтому замена в шихте части металлолома одинаковым количеством синтикама должна приводить к снижению расхода электроэнергии на выплавку стали. Фактические результаты плавов, проведенных с использованием в металлозавалке синтикама вместо части лома, подтверждают это. Ниже приведены сравнительные показатели плавов на заводе "Заверче" (Польша) с использованием в шихте синтикама, металлизированных окатышей, чугуна, горячебрикетированного железа и лома (табл.9.5). Из этих данных следует, что наилучшие результаты по расходу электроэнергии получены при работе печи с применением синтикама. Подтверждением этого служат опытные плавки в 80 т электропечи завода "Estal Labedy" (Польша). Замена твердого чугуна и чугунного боя равным количеством синтикама с расходом его на плавку 7 – 12 т сократила расход энергии с 443,3 до 425,7 кВтч/т.

Примерно такие же результаты получены при испытании синтикама в 60 т дуговой печи завода "Киа Стил" (Южная Корея), представленные в табл.9.6, а также на 120 т электропечи системы Данарк ММЗ (табл.9.7 и рис.9.8). Приведенные данные достаточно полно иллюстрируют, что применение синтикама, отвечающего требованиям электроплавки, а именно марок СК15, не говоря уже от СК10 и СК5, снижает расходы электроэнергии на выплавку стали.

Таблица 9.5

Основные технологические параметры плавов с применением различных видов шихты в 145-т электропечи «Huta Zawercie» (среднее значение)

Показатель	1*	2*	3*	4*
Время между выпусками, мин.	77,8	84,0	87,1	79,6
Продолжительность работы «под нагрузкой», мин.	56,7	57,6	57,6	56,9
Расход кислорода, м ³ /т стали	28,8	28,3	33,5	30,8
Расход природного газа, м ³ /т стали	5,05	5,09	5,43	5,08
Расход электроэнергии, кВтч/т стали	439,0	448,8	471,2	440,8

1* — 100 % стального лома.

2* — 83 % стального лома + 12% металлизированных окатышей + 5% твердого чугуна

3* — 78,8 % стального лома + 16,2% брикетов железа + 5% твердого чугуна.

4* — 81,5 % стального лома + 18,5% синтикама СК15.

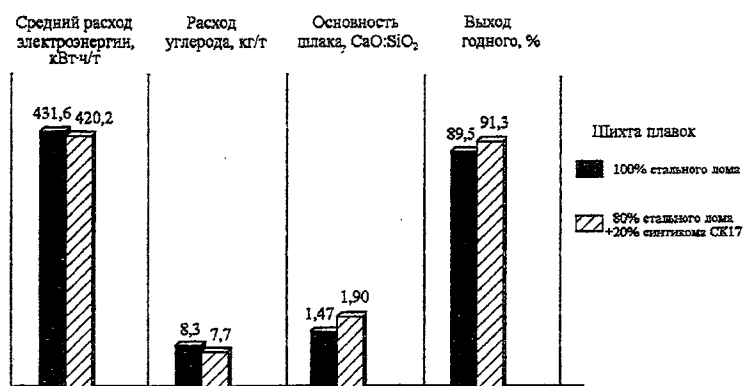


Рис. 9.8. Сравнительные показатели электроплавки на 100% лома и смеси 80% лома и 20% синтикома ММЗ.

Таблица 9.6

Основные результаты испытаний синтикома на заводе «Киа-Стил»

Тип технологии	Вид металлошхиты	1*	Выход жидкой стали, %	Расход на 1 т стали		Расход углерода (кокса) на плавку, нм ³
				Электро-энергия, кВтч	Газооб-разный кислород, кг	
Стандартная технология	100 % стального лома	50-55	93,0	435-440	37-39	1600-1800
Киастил	80-89 % лома и 20-11 % синтикома СК15П	50	93,1	397	29	1212
Лучшие результаты опытных плавов	80,4 % лома и 19,6 % синтикома	45	94,5	355,2	26	1005

1* — Средняя продолжительность плавки под током, мин.

Таблица 9.7

Результаты применения синтикома в 120-тн электропечи системы «Данарк»
Молдавского металлургического завода

Параметры плавки	Состав шихты 100 % ст.лома («традиционная» технология)	80 % лома + 20 % синтикома СК15
Количество анализируемых плавков	90	46
Время работы печи «подтоком», мин.	51,0	51,3
Расход науглероживателя и угольного порошка, кг/т	8,3	7,7
Основность шлага ($\text{CaO}:\text{SiO}_2$)	1,47	1,90
Доля общего железа в шлаке	22,8	18,1
Расход электроэнергии, кВтч/т стали	431,6	420,2
Выход годного, % от массы шихты	89,5	91,3

В тех же случаях, когда в электропечах использовали синтиком марок СК20 и СК25, обладающих повышенным охлаждающим эффектом и предназначенных для охлаждения конвертерной плавки, удельный расход электроэнергии возрастал. Примером этого являются плавки на заводе SDI. На этом заводе вначале была опробована опытная партия синтикома марки СК15 производства ОАО «Тулачермет», показавшая хорошие результаты. При замене твердого чугуна, обращаем еще раз внимание именно чугуна, а не лома, синтикомом этой марки, удельный расход электроэнергии снизился при одновременном сокращении времени работы печи под током. На основе этих данных была заказана промышленная партия синтикома. В отличие от первой она содержала почти в 1,5 раза больше твердого окислителя. Ее марку условно можно отнести к СК21,5 – СК23. Согласно расчетам затраты электроэнергии на получение стали из 1 т этого материала выше аналогичного показателя для СК15 в 1,25 раза. Поэтому удельные затраты электроэнергии возросли.

Испытания синтикома марки СК19 в электродуговой шахтной печи ОАО «Северсталь» также подтвердили, что замена в шихте лома синтикомом марки СК19, имеющем повышенную охлаждающую способность, увеличивает расход электроэнергии на выплавку стали. Таким образом, для применения в электропечах рекомендуется синтиком марок СК5, СК10 и СК15, позволяющий снизить энергозатраты на выплавку стали по сравнению с металлоломом и твердым чугуном при доле последнего в шихте 10 %.

9.9. Газотворная способность синтикома и особенности дожигаания СО до СО₂ при его использовании

В табл. 9.8 приведен химсостав обычного синтикома марок СК5 – СК30 и синтикома с дополнительным содержанием углерода марок СК5У – СК30У. Для приведенного состава материалов расчетным путем определено количество монооксида углерода, выделяющегося при окислении углерода собственным кислородом оксидов железа и количество монооксида углерода, образующегося при полном окислении всего углерода кислородом оксидов железа и кислородом, поступающим извне (дутья и атмосферы). Последний случай отвечает стехиометрическому соотношению $C/O = 0,75$. Результаты расчеты приведены в табл. 9.9. Из этих расчетов следует, что газотворная способность синтикома марок СК5 – СК25 изменяется в пределах 20 – 59 нм³/т при окислении части углерода собственным кислородом и возрастает до 74 – 98 нм³/т при окислении всего углерода синтикома собственным кислородом и кислородом, поступившим из газовой фазы. Для углеродистого синтикома марок СК5У – СК25У эти показатели изменяются в диапазоне 20 – 85 и 80 – 98 нм³/т соответственно. Из этих расчетов следует, что синтиком обладает высокой газотворной способностью, приближающейся к чугуну. Однако между ними в этом отношении существует принципиальное различие.

В отличие от чугуна окисление углерода синтикома, образование СО и поступление в рабочее пространство происходит с момента начала плавления и продолжается весь период плавления, когда в печи имеется большое количество твердой шихты. Это обеспечивает более эффективное использование энергии дожигаания. При выплавке стали в дуговой печи по традиционной технологии основное количество углерода, в том числе чугуна, окисляется в жидкий период плавки. Поэтому пик газовыделения при использовании твердого чугуна приходится на жидкие периоды плавки, а не на период плавления. В этом и состоит различие между чугуном и синтикомом, который сдвигает окисление углерода и выделение СО на период плавления.

В конце плавления и окислительный период ванна является жидкой, и покрыта слоем малотеплопроводного шлака. В результате этого степень дожигаания снижается и обычно не превышает 40 – 60 %. Степень использования тепла дожигаания также невелика и составляет 40 – 60 %. Общая результирующая эффективность дожигаания в лучших случаях не превышает 30 – 40 %. В силу этих причин при окислении углерода ванны получает всего 2,6 – 2,8 кВтч/кг углерода.

Непрерывное и относительно равномерное выделение СО при окислении углерода синтикома на протяжении всего периода плавления коренным образом изменяет условия дожигаания СО до СО₂ и передачи этого тепла твердому лому. При этом достигается совмещение выделения СО и его горения в слое твердой шихты с передачей тепла окружающей среде, возрастает длительность пребывания газов в печи, уменьшается скорость фильтрации

Таблица 9.8

Химический состав синтикома

Марка синти- кома	Выход синтикома из 1 т чугуна, кг	чугун	Содержание исходных компонентов, % (масс.)						
			в том числе		оксиды железа	в том числе		пустая порода	углерод содержащий материал
			железо	углерод		железо	кислород		
СК5	1052,63	95	91,01	3,99	4,67	3,27	1,40	0,33	-
СК5У	1052,63	95	91,01	3,99	4,67	3,27	1,40	-	0,33
СК10	1111,1	90	86,22	3,78	9,34	6,54	2,80	0,66	-
СК10У	1111,1	90	86,22	3,78	9,34	6,54	2,80	-	0,66
СК15	1176,5	85	81,43	3,57	14,0	9,81	4,20	1,00	-
СК15У	1176,5	85	81,43	3,57	14,0	9,81	4,20	-	1,00
СК20	1250,0	80	76,69	3,36	18,68	13,08	5,60	1,33	-
СК20У	1250,0	80	76,69	3,36	18,68	13,08	5,60	-	1,32
СК25	1333,3	75	71,85	3,15	23,35	16,34	7,00	1,67	-
СК25У	1333,3	75	71,85	3,15	23,35	16,34	7,00	-	1,65
СК30	1428,6	70	67,06	2,94	28,02	19,61	8,41	2,0	-
СК30У	1428,6	70	67,06	2,94	28,02	19,61	8,41	-	1,98

Таблица 9.9

Количество монооксида углерода, выделившегося на 1 т синтикома различного состава при окислении углерода оксидами железа и кислородом дутья

Марка синтикома	Содержание компонентов в металлургической основе синтикома, кг/т		Содержание минеральных компонентов в синтикоме, кг/т				Общее количество углерода в синтикоме, кг/т			Количество кислорода в синтикоме, кг/т			Соотношение углерод-кислород	Количество CO, выделившегося при окислении углерода синтикома собственным кислородом из Fe ₂ O ₃ , м ³ /т	Общее количество CO, выделившегося при полном окислении углерода кислородом Fe ₂ O ₃ и кислородом дутья при IC=0,75, м ³ /т
	железо	углерод	оксидного материала	в том числе:			Общее	Окислившегося при плавлении	Оставшегося не окисленным	Общее	Израсходовано на окисление углерода	Оставшегося неиспользованным			
				оксида железа	Пустой породы	Углеродного материала									
СК5	910,1	39,9	50	46,67	3,33	-	39,9	10,53	29,37	14	14	0	2,85	19,63	74,37
СК5У	910,1	39,9	50	46,67	-	3,33/2,83	42,73	10,53	32,20	14	14	0	3,05	19,63	79,65
СК10	862,2	37,8	100	93,33	6,67	-	37,8	21,05	16,75	28	28	0	1,35	39,24	70,46
СК10У	862,2	37,8	100	93,33	-	6,67/5,67	43,47	21,05	22,42	28	28	0	1,55	39,24	81,03
СК15	814,3	35,7	150	140,0	10,0	-	35,70	31,58	4,12	42	42	0	0,85	58,86	66,54
СК15У	814,3	35,7	150	140,0	-	10/8,50	44,20	31,58	12,65	42	42	0	1,05	58,86	82,39
СК20	766,4	33,6	200	186,47	13,34	-	33,6	33,6	0	56	44,69	11,31	0,60	62,63	78,47
СК20У	766,4	33,6	200	186,47	-	13,34/11,34	44,94	42,11	2,83	56	56	0	0,80	78,49	83,77
СК25	718,5	31,5	250	233,33	16,67	-	31,5	31,5	0	70	41,90	28,10	0,45	58,72	98,10
СК25У	718,5	31,5	250	233,33	-	16,67/14,17	45,67	45,67	0	70	60,74	9,26	0,65	85,13	98,11
СК30	670,6	29,4	300	280,0	20,0	-	29,4	29,4	0	84	39,1	44,9	0,35	54,80	117,73
СК30У	670,6	29,4	300	280,0	-	20,0/17,0	46,4	46,4	0	84	61,71	22,29	0,55	86,49	117,73

газов, снижается подсос воздуха в печь, предотвращается обратный переход диоксида углерода в монооксид в результате взаимодействия с металлической ванной и шлаком, сокращается окисление железа шихты и т.д. Дожигание в объеме шихты позволяет обеспечить повышение степени дожигания СО до CO_2 до 90 – 100 % и степени передачи этого тепла ванне до 60 – 85%. Примем, что при окислении 1 кг углерода до СО выделяется энергии 3 кВтч/кг, при дожигании углерода до CO_2 – 10 кВтч/кг. Для этого случая окисление 1 кг углерода синтикома может дать снижение расхода электроэнергии на величину $(1 \cdot 0,10 \cdot 3 + 1 \cdot 0,9 \cdot 10) \cdot 0,6 = 7,2$ кВтч/кг углерода.

Для дуговой печи, работающей по традиционной технологии со степенью дожигания СО до CO_2 не выше 40 % эффективность окисления 1 кг углерода до СО и CO_2 при той же величине использования тепла 0,6 не превысит $(1 \cdot 0,6 \cdot 3 + 1 \cdot 0,4 \cdot 10) \cdot 0,6 = 3,48$ кВтч/кг углерода.

Следовательно, заложенная в синтиком способность к окислению углерода в период плавления принципиально изменяет условия дожигания СО и передачи этого тепла материалам, находящимся в печи, сдвигая этот процесс жидкого периода электроплавки на период проплавления металлозавалки. В результате открывается возможность получения дополнительного количества энергии от сжигания СО до CO_2 . Для реализации этих возможностей плавление металлошихты, содержащей синтиком, должно сопровождаться подачей газообразного кислорода в количестве, необходимом для полного дожигания СО до CO_2 , а также мерами по предотвращению подсоса воздуха в печь. К сожалению, во время испытаний синтикома эти возможности не были реализованы в достаточной степени.

Выше речь шла о синтикоме, содержащего высокоуглеродистую металлическую основу и твердый окислитель, процесс расплавления которого сопровождается выделением СО, его дожиганием и поступлением тепла дожигания в шихту и жидкий металл. Дожигание СО до CO_2 отличает более высокая эффективность по сравнению с чугуном, при использовании которого окисление углерода и дожигание СО происходят при жидком состоянии ванны, что снижает эффективность дожигания. С этих позиций представляется целесообразным применение в электроплавке углеродистого синтикома, содержащего дополнительное количество углерода (табл. 9.1 и 9.2). Равномерное окисление углерода в синтикоме и выделение СО в процессе проплавления синтикома носят непрерывный характер и происходят в течение всего времени плавления металлошихты. Это исключает пиковые газовыделения, улучшает условия дожигания СО до CO_2 , обеспечивает сохранение постоянного положительного давления в печи, снижает подсосы воздуха в печь и общее количество отходящих газов. В свою очередь, данные факторы также способствуют повышению эффективности дожигания при использовании синтикома.

Ниже рассмотрено влияние воздуха, засасываемого в рабочее пространство печи, на эффективность дожигания. По данным [13] в 120-т электропечи “ММЗ” за плавку выделяется 30 – 45 тысяч м^3 отходящих газов.

Средняя масса шихты плавок 131,2 т. "Стандартная" шихтовка плавок — 100 % стального лома (0,4 % С). В шихте используется науглероживатель (кокс) в количестве более 700 кг на плавку. В печь вдувается угольный порошок (1200 кг на плавку). В печи полностью сгорает природный газ (850 м³ на плавку). Помимо этого происходит частичное окисление углерода электродов печи (180 кг на плавку). Поэтому суммарно окислится не менее 2500 кг углерода и "сгорит" 850 м³ CH₄, образуя часть отходящих газов (CO, CO₂, H₂O). Для окисления примесей, углерода, сжигания природного газа в печь вдувают кислород, но, помимо, этого кислорода расходуется и кислород воздуха, поступающего в печь через технологические отверстия (отверстия свода, рабочее окно).

При полном сгорании CH₄ за плавку образуется 1700 м³ паров H₂O и 850 м³ CO₂. При окислении 60 % углерода до CO и 40 % углерода до CO₂ за плавку выделится 2800 м³ CO и 1870 м³ CO₂. Следовательно, суммарный объем отходящих газов теоретически за плавку должен составить 7220 м³. Но фактически из печи уходит не менее 30000 м³ газа. Это означает, что не менее 22800 м³ (за плавку) является "балластным" газом (просасываемым воздухом).

По данным Лозина Г.А. состав газов, выходящих по ходу плавки, изменяется в следующих пределах: 15 – 25 % CO; 5 – 11 % CO₂, 0,5 – 35 % H₂O 3,5 – 10 % O₂; 61 – 72 N₂. Это указывает, что степень усвоения кислорода составляет не выше 85 % (часть кислорода не усваивается, не используется для дожигания CO), а доля атмосферного воздуха в материальном и тепловом балансах плавки составляет не менее 75 %.

Температура покидающих печь газов составляет от 600 до 1500 °С. По данным других источников температура может достигать 1300 °С. Для расчетной оценки примем, что средняя температура отходящих газов 1400 °С. При общем объеме газов 30000 м³ их нагрев до 1400 °С требует затрат тепловой энергии 63,5 ГДж (17,6 МВтч) за плавку.

От сжигания CH₄, окисления 60 % углерода до CO, а 40 % углерода до CO₂, теоретически в систему печи поступит 80,7 ГДж (22,4 МВтч) тепловой энергии. Если учесть необходимые затраты тепла на нагрев отходящих газов, то на нагрев шлака, металла, футеровки и системы охлаждения печи остается 17,2 МДж (4,8 МВтч) тепла (40 кВтч/т стали). Для окисления CO до CO₂ с 40 до 60 % потребуется теоретически дополнительно ≈ 470 м³ кислорода. При степени усвоения кислорода ≈ 85 % из атмосферы на дожигание потребуется 550 м³ атмосферного кислорода, совместно с которым в печь дополнительно поступит около 2050 м³ азота. Это означает, что общий объем отходящих газов возрастет не менее, чем на 2130 м³ (2050 м³ азота и 80 м³ неусвоенного кислорода) а масса отходящих газов увеличится не менее, чем на 3,35 т.

Реакция дополнительного дожигания (с 40 % до 60 % CO до CO₂) вносит в систему ≈ 11,7 ГДж (3,2 МВтч) тепловой энергии, то есть общее поступление в систему тепла (от сгорания CH₄, окисления углерода и дожигания 60 % CO

до CO_2) для этой печи возрастет до 92,4 ГДж (25,6 МВт·ч). Из них на обеспечение энтальпии отходящих газов будет затрачено 67,0 ГДж (18,6 МВт·ч), а для нагрева футеровки, шлака, металла, системы охлаждения будет израсходовано 25,2 ГДж (7,0 МВт·ч) или при массе выплавляемой стали 120 т 58,3 кВт·ч/т стали.

Таким образом, увеличение степени дожига CO до CO_2 с 40 до 60 % в современных электродуговых печах за счет воздуха, поступающего в печь, значительно снижают экономию тепла – примерно до 18,3 кВтч тепловой энергии на 1 т стали. Поэтому при изменении состава шихты (увеличении расхода в шихте углеродосодержащих материалов – синтикома, чугуна и т.п.) необходимо стремиться к уменьшению объема “балластных” газов. Для синтикома решение этой задачи достигается достаточно просто, поскольку выделение CO и его дожигание осуществляются в период плавления, когда пространство печи заполнено твердой шихтой и образующемся расплавом металла, что повышает давление газов в печи и снижает подсос воздуха в печь по сравнению с жидкими периодами плавки. Это в дополнение к отмеченным выше преимуществам синтикома добавляет ему дополнительное преимущество, а именно: увеличение степени использования тепла дожига за счет снижения потерь энергии с балластными газами. Иными словами, окисление углерода синтикома в период плавления и выделение при этом CO изменяет качественно условия дожига CO до CO_2 , повышая тем самым эффективность этого процесса и в целом углерода как энергетика.

Изложенное выше свидетельствует, что превращение твердого чугуна в синтиком придает ему целый ряд новых свойств, которые заранее программируются вместе с поведением синтикома в электродуговой печи. Можно ожидать, что этот принцип позволит обеспечить в ближайшей перспективе часть потребностей электросталеплавильного производства в высококачественной металлошихте. Полученные при испытании синтикома в электроплавке результаты далеки от возможных, так как синтиком сравнительно новый материал. Поэтому его потенциальные возможности не могли быть полностью раскрыты. С этих позиций большие перспективы представляет углеродистый синтиком, содержащий в качестве наполнителя рудоугольные брикеты или окатыши. С теоретических позиций (при определенном соотношении в наполнителе углерода и оксидов железа) это может обеспечить запас законсервированного химического тепла в синтикоме выше, чем в твердом чугуне. Снижение у потребителей синтикома затрат на шихту и энергоресурсы для производства качественной стали подтверждают перспективность использования синтикома в электросталеплавильном производстве.

Приведенные результаты будут неполными, если не подчеркнуть еще раз особенность материалов типа синтиком. После ввода синтикома в шихту электродуговой печи компоненты синтикома – высокоуглеродистый сплав в виде чугуна либо углеродистого полупродукта и твердый окислитель, состоящий в основном из оксидов железа, превращаются в расплавленное

состояние. В результате этого формируется гомогенная тесная смесь высокоуглеродистого расплава и расплава оксидов железа, аналогичная смеси, образующейся в конвертере в зоне вдувания кислорода в ванну (реакционной зоне). Следовательно, в исходном состоянии синтиком представляет собой как бы фрагмент, отобранный из реакционной зоны конвертера и подвергнутый охлаждению. Процессы окисления – восстановления, протекающие в этой смеси, как в конвертере, так и электродуговой печи, по своей физико-химической природе одинаковы.

Таким образом, синтиком, введенный в электропечь в твердом состоянии, в процессе расплавления металлопихты превращается в подобие смеси жидкого чугуна или полупродукта, возникающей в кислородных конвертерах. Отсюда следует, что применение синтикома в электропечах представляет собой введение в технологию электроплавки элементов конвертирования, сближая электропечь с конвертерным процессом.

Литература

1. Дорофеев Г.А., Уткин Ю.В., Афонин С.З. Труды третьего конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1996, с. 32 – 37.
2. Дорофеев Г.А., Уткин Ю.В., Афонин С.З. Труды третьего конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1996, с.32 – 37.
3. Дорофеев Г.А., Уткин Ю.В., Тамбовский В.И. и др. Черная металлургия. Бюлл. НТИ «Черметинформация». Вып.1, 1996, с.35 – 41.
4. Дорофеев Г.А. Металлург, 1999, № 4, с.27 – 29.
5. Khranstalev V.A., Semenov R.O. Steel Technology Int. November, 1999. Eng.
6. Sizing Up Synticom. 33 Metalproducing. May, 1996. p.78-Eng.
7. Dorofeev G.A., Afonin S.Z. Steel Times Int. Vol.23, № 6, 1999, p.32-34. – Eng.
8. Дорофеев Г.А., Афонин С.З. Труды пятого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1999, с.25 – 30.
9. Чумаков С.М., Югов П.И. Сталь, 1999, № 10, с.18 – 22.
10. Афонин С.З., Дорофеев Г.А., Родионов А.В., Подколзин Е.Ю. Белитченко А.К., Богданов Н.А., Кутаков А.В. Труды пятого конгресса сталеплавателей. – М.: Черметинформация, 1999, с.207 – 209.
11. Дорофеев Г.А., Тамбовский В.И., Родионов А.В., Уилсон Т. Труды пятого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1999, с.209 – 210.
12. Дорофеев Г.А., Матвеев Л.З., Афонин С.З., Чумаков С.М. Сталь. 2001, № 3, с.28 – 32.
13. Кутаков А.В., Деревянченко И.В., Гоменюк В.А. и др. Труды пятого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 1999, с.210 – 215.
14. Дорофеев Г.А., Тамбовский В.И., Родионов А.В., Мезенцев Е.С. Известия ТулГУ. Серия: металлургия, экология, физика. Выпуск 1. Тула, 2000, с.59 – 64.
15. Дорофеев Г.А., Мартынов О.В., Руднев С.В. Известия ТулГУ. Серия: металлургия, экология, физика. Выпуск 2. Тула. 2002, с.90 – 98.
16. Мэйсон Г., Уилсон Э., Дорофеев Г.А., Родионов А.В. Труды шестого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2001, с.234 – 235.
17. Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х. 60 лет кислородно-конвертерному процессу производства стали в России. Сб. статей. М.: Интерконтакт Науки, 2006, с.2346 – 262.
18. Дорофеев Г.А., Шахпазов Е.Х. Проблемы черной металлургии и материаловедения, 2007, № 1, с.5 – 10.
19. Шивка И., Дегра В., Борда А., Новосельски Ч., Кужак Р.: Effective Reducing of Undesired Non-Ferrous Metals Concentration in Steel by Adding Special Materials to the Remelting Scrap, Book of Proceed, 4th ASM Inter. Conf. a Exhib. On The Recycling of the Metals, Vienna – июнь 1999, стр.333.
20. Борда А., Гжелло И., Шивка И., Дегра В., Свяжин А.Г.: Technologicko-ekonomicka problematika vyroby oceli v navaznosti. EOP-panova pec-kontiliti. Sbor.12 konf.elektr.a.mim.zprac.oceli, Roznov, (Czech Rep), kveten, 1991, стр.138.

21. Дерга В., Щивка И., Свяжин А.Г., Борда А., Ротарски М., Гжелю И.: Rozvoj technologie vyroby hlubokotaznych oceli vyuzitim peci UHP, Sbor XIII konf.elektr.a.mim.zprac.oceli, Roznov (Czech Rep.), kveten 1997, с.86.
22. Патенты РФ №№ 2075515, 2075513, 2092570, 2088672, 2086664, 2103379, 2092574, 2094481, 2102497, 2055907, 2051972, 2051973, 2051979, 2087545 и др. Авт. Дорофеев Г.А., Афонин С.З., Шахпазов Е.Х., Шевелев Л.Н. и др.
23. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. Киев, Донецк: Виша школа, 1986, 280 с.
24. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Металлургия, 1974, 496 с.
25. Капустин Е.А. Сталь, 1998, № 8, с.77 – 81.
26. Дорофеев Г.А., Матвеев Л.З., Григорян В.А., Павлов А.В. Труды шестого конгресса сталеплавильщиков. М.: Черметинформация, 2001, с.229 – 234.
27. Дорофеев Г.А., Руднев С.В., Павлов А.В. и др. Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков. М.: Черметинформация, 2003, с.321 – 322.
28. Дорофеев Г.А., Руднев С.В., Павлов А.В. и др. Труды восьмого конгресса сталеплавильщиков. М.: Черметинформация, 2003, с.576 – 578.
29. Немтинов А.А., Ордин В.Г., Зинченко С.Д. и др. 60 лет кислородно-конвертерному процессу производства стали в России. Сб.статей. М.: Интерконтакт наука. 2006, с.178 – 212.
30. Зинченко С.Д., Ефимов С.В., Краснов А.В. и др. Труды девятого конгресса сталеплавильщиков. М.: Черметинформация, 2007, с.171 – 178.
31. Кутаков А.В., Дервянченко И.В., Гоменюк В.А. и др. Труды пятого конгресса сталеплавильщиков. М.: Черметинформация.

Экологические аспекты производства и применения синтикома*

10.1. Снижение удельных показателей загрязнения воздуха в доменном производстве

При производстве композиционных материалов типа синтиком происходит снижение расхода кокса на тонну железа. Величина этого снижения, зависящая от марки производимого материала, представлена в табл.10.1.

Таблица 10.1

Влияние состава синтикома на выход железа и расход кокса

Показатели	Вид материала					
	Чугун	СК10	СК15	СК20	СК25	СК30
Выход продукта на 1 т чугуна, т	1	1,2	1,176	1,25	1,33	1,429
Содержание железа, %	94,20	91,40	90,01	88,6	87,21	85,79
Количество железа, приходящееся на 1 т чугуна, т	0,942	1,015	1,059	1,108	1,162	1,226
Удельный расход кокса на 1 т железа, кг/т	0,631	0,585	0,562	0,537	0,511	0,485
Снижение удельного расхода кокса, кг/т железа	0	-46	-69	-94	-120	-146
то же, %	0	-7,24	-11,01	-14,94	-18,96	-23,16

Снижение удельного расхода кокса при производстве тонны железа в доменном цикле приведет к соответствующему снижению удельных показателей образования вредных веществ в доменном производстве в целом.

Введение железосодержащих добавок в чугун, на стадии его разлива в мушкетеры и получения синтикома, связано с определенным объемом работ по доставке и перевалке добавок непосредственно в зону разливочных машин, что неизбежно вызывает появление выделений. Расчет выделений выполнен в соответствии с "Методическим пособием по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов" по формуле:

* В выполнении работы принимали участие Кузнецов В.В. и Краснов О.Б.

$$Q = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_7 \cdot G \cdot B \cdot 1000000 / 3600, \text{ г/с}$$

где k_1 — весовая доля пылевой фракции в материале; k_2 — доля пыли (от всей массы пыли), переходящей в аэрозоль; k_3 — коэффициент, учитывающий местные метеоусловия; k_4 — коэффициент, учитывающий степень защищенности узла от внешних воздействий; k_5 — коэффициент, учитывающий влажность материала; k_7 — коэффициент, учитывающий крупность материала; G — суммарное количество перерабатываемого материала, т/ч; B — коэффициент, учитывающий высоту пересыпки материала.

Выгрузка окатышей из вагона на склад

Расчет валовых выбросов выполнен при следующих исходных данных:

Крупность материала, мм	(10)	тогда $k_7 = 0,5$
Влажность материала, %	(0)	тогда $k_5 = 1$
Скорость ветра, м/с	(0,5)	тогда $k_3 = 1$
Пересып	открыт с 1 стороны	тогда $k_4 = 0,1$
Высота пересыпа, м	(2)	тогда $B = 0,7$

Результаты расчетов представлены в табл.10.2.

Таблица 10.2

Результаты расчета

Вид материала	Количество, т/год	Значение параметров			Выбросы т/год
		K_1	K_2	q'	
Окатыши	0,25	0,05	0,02	0,002	8,8Е-06

Загрузка окатышей в бункер

Расчет валовых выбросов выполнен при следующих исходных данных:

Крупность материала, мм	(10)	тогда $k_7 = 0,5$
Влажность материала, %	(0)	тогда $k_5 = 1$
Скорость ветра, м/с	(0,5)	тогда $k_3 = 1$
Пересып	открыт с 1 стороны	тогда $k_4 = 0,1$
Высота пересыпа, м	(1)	тогда $B = 0,5$

Результаты расчетов представлены в табл.10.3.

Таблица 10.3

Результаты расчета

Вид материала	Количество, т/год	Значение параметров			Выбросы т/год
		K_1	K_2	q'	
Окатыши	0,25	0,05	0,02	0,002	6,3Е-06

Дополнительные выделения пыли от погрузочно-разгрузочных работ с сырьевыми материалами (в данном примере окатыши) при изготовлении различных марок синтикома составят (табл.10.4):

Таблица 10.4

Выделение пыли

Показатели	Вид материала					
	Чугун	СК10	СК15	СК20	СК25	СК30
Количество добавляемого железосодержащего сырья на 1 т чугуна, т	0	0,111	0,176	0,250	0,33	0,429
Дополнительные выделения пыли на 1 т железа, кг	0	0,006	0,010	0,014	0,018	0,023

Таким образом, итоговое снижение выделений загрязняющих веществ в доменном производстве и по металлургическому предприятию в целом составят:

Таблица 10.5

Количество удельных выделений

Показатели	Вид материала					
	Чугун	СК10	СК15	СК20	СК25	СК30
Снижение удельных выделений в доменном производстве, %	0	4,87	8,70	12,69	16,77	21,02
Снижение удельных выделений в целом по предприятию, %	0	0,73	1,30	1,90	2,52	3,15

Снижение удельного потребления кокса при производстве чугуна повлечет за собой неизбежное снижение образования шлака. Так уменьшение расхода кокса на 10 кг/т ведет к снижению выхода шлака из печи примерно на 1,5 кг/т чугуна. Следствием этого является уменьшение выделений сернистых соединений при выпуске, транспортировании и переработке доменных шлаков. Экологический эффект рассчитан исходя из образования 0,327 т шлака при производстве 1 т чугуна и представлен в табл. 10.6.

Таблица 10.6

Экологический эффект использования синтикома различных марок

Показатели	Вид материала					
	Чугун	СК10	СК15	СК20	СК25	СК30
Образование шлака на 1 т железа	0,347	0,343	0,339	0,335	0,331	0,328
Снижение образования шлака кг/т железа	0	-4,6	-8,1	-11,8	-15,7	-19,6
Снижение выделений соединений серы от доменного шлака %	0	-1,312	-2,340	-3,413	-4,509	-5,655

Весьма перспективным моментом, с точки зрения снижения воздействия на окружающую природную среду, является использование в качестве железосодержащей добавки шламов аглодоменного производства, при одновременном исключении их из повторного применения в процессе производства агломерата. Доля шлама, который вводится в сырьевые материалы аглофабрик, составляет примерно 4 – 6 %. При этом только половина шлама переходит в конечный продукт – агломерат.

Оставшаяся часть в виде пылевидного пустого балласта транспортируется практически по всему агломерационному тракту – от хвостовых частей агломашин до загрузочных аппаратов доменных печей. Это приводит к увеличению пылеобразования при транспортировке и перевалке агломерата, повышенному выносу пыли из печи и чрезмерной запыленности доменного газа. Два последних момента существенно сказываются на технологии ведения доменного процесса и как следствие приводят к снижению его эффективности.

Примерное количество железорудного сырья и флюсов, необходимое для производства 1 т агломерата составляет:

$$1 : 0,64 = 1,562 \text{ т};$$

где 0,64 — коэффициент выхода агломерата.

Тогда количество “пылящего” шламового балласта в 1 т агломерата составит: $1,562 : (1 + 5 : 100) \cdot 5 : 100 \cdot (1 - 0,5) = 0,0372 \text{ т}$; где 5 — содержание шлама аглодоменного производства в сырье, %; 0,5 — доля шлама, переходящая в агломерат.

Пылеобразование при выполнении перевалочных и погрузочно-разгрузочных работ сыпучих материалов зависит от их фракционного состава. Так для “товарного” агломерата с размером кусков до 100 мм значение коэффициента, учитывающего размеры частиц, равно 0,2, а для пылевого балласта присутствующего в агломерате вследствие использования шлама при размере частиц до 0,5 мм этот показатель равен 1. Таким образом, интенсивность пылеобразования от шламового балласта в 5 раз больше чем от равного количества агломерата. Следовательно, доля пыли выделяющейся от агломерата и обусловленной повторным использованием шлама в общем пылевыделении аглопотока от аглофабрики до доменных печей составит:

$$0,0372 \cdot 5 : (1 - 0,0372 + 0,037205) \cdot 100 = 16,16 \text{ \%}.$$

Количество пыли образовавшейся на протяжении аглопотока составляет примерно половину от пылевывделений при производстве агломерата, на которое в свою очередь приходится более 90 % общего выделения пыли на предприятии. Тогда снижение выделений пыли при изъятии шламов аглодоменного производства из аглошихты составит:

$$16,16 \cdot 0,5 \cdot 0,9 = 7,27 \text{ \%}.$$

Общее снижение выделений загрязняющих веществ металлургического предприятия при этом составит:

$$7,27 \cdot 0,2 = 1,45 \%,$$

где 0,2 — примерная доля выделений пыли в общем количестве образовавшихся загрязняющих веществ.

В абсолютных величинах для металлургического предприятия с валовым образованием загрязняющих веществ порядка 100 тыс. тонн в год снижение образования пыли составит 1450 тонн в год.

Таким образом, производство композиционных материалов типа синтиком приведет к снижению удельных показателей загрязнения атмосферного воздуха от 5 до 20 % в доменном производстве или соответственно от 0,7 до 4,5 % в целом по металлургическому предприятию.

Кроме того, в данном расчете не учтено снижение нагрузки на природную среду связанное с сокращением потребления воды на мокрую очистку и размещение шламов, улучшение эксплуатации пылегазоочистного оборудования и связанное с этим снижение энергопотребления, а также киотская составляющая.

В современных условиях последняя является решающим фактором экологического и экономического преимущества композиционных материалов типа синтиком перед чугуном.

Л.Н. Шевелевым выполнены расчеты объема выбросов парниковых газов при производстве твердого чугуна и синтикома марки СК15 на основе методики определения эмиссии парниковых газов в черной металлургии России, разработанной ИЭ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина» [1]. Результаты представлены ниже.

Таблица 10.7

Снижение выбросов при замене твердого чугуна синтикомом

Расход	Выбросы парниковых газов, т/т		Снижение выбросов парниковых газов, т/т
	Твердый чугун	Синтиком	
Агломерат	$1,304 \cdot 0,208 = 0,271$	$1,304 \cdot 0,85 \cdot 0,208 = 0,230$	
Жидкий чугун	$1,00 \cdot 1,897 = 1,897$	$1,0 \cdot 0,85 \cdot 1,397 = 1,613$	
Дутье	$2,396 \cdot 0,072 = 0,172$	$2,396 \cdot 0,85 \cdot 0,072 = 0,147$	
Итого	2,340	1,990	-0,350

Согласно этим данным снижение выбросов газов при производстве синтикома вместо твердого чугуна составляет 0,35 т/т композита. В расчете на 1,0 млн. т синтикома это дает сокращение выбросов на 350 000 т/год или в расчете на 5 лет 1750000 т. Откуда сумма выручки от продажи этих снижений на углеродном рынке России и за рубежом составит: $1750000 \cdot 10 \text{ долл./т} = 17,5 \text{ млн. долл.}$

В свете Киотского протокола данное преимущество синтикома приобретает особое значение.

10.2. Влияние синтикама на окисление железа во время расплавления металлозавалки

Рассмотрим этот вопрос на примере кислородно-конвертерного процесса. При использовании металлолома расплавление той части его, которая выступает над поверхностью твердожидкой ванны, образуемой расплавом чугуна и погруженным в него металлоломом, осуществляется за счет тепла, выделяемого при окислении железа газообразным кислородом. Это сопровождается значительным угаром железа, составляющим по меньшей мере 20 % или 200 кг/т скрапа (при окислении железа до Fe_2O_3). Часть образующихся оксидов железа переходит в шлак, а часть их теряется в виде пыли с отходящими газами. При общем суммарном количестве пыли 20 кг/т стали потери с отходящими газами составляют 100 кг/т металлолома. Сопоставление этих цифр позволяет сделать вывод о том, что при расплавлении лома примерно 50 % окислившегося железа уносится с отходящим дымом, а оставшиеся 50 % переходит в шлак. При этом степень использования кислорода, исходя из баланса его поступления и расходования, составляет ~40 %. Неиспользованный кислород уходит из полости конвертера, унося с собой частицы окислившегося железа.

При загрузке синтикама поверх металлолома синтиком уплотняет слой скрапа, погружая его более полно в толщу жидкого чугуна, что уменьшает или вообще исключает контакт поверхности скрапа со вдуваемым кислородом. Кроме того, синтиком на поверхности твердожидкой ванны образует слой, защищающий смесь твердого скрапа и жидкого чугуна от прямого воздействия струй кислорода на металлическую ванну, состоящую из смеси жидкого чугуна и погруженного в него лома.

Расположение синтикама на поверхности ванны обеспечивает предварительный подогрев его жидким расплавленным чугуном и начало взаимодействия вдуваемого кислорода преимущественно с синтикомом, а не с металлоломом, как это имеет место в плавке на ломе. В результате реакции между газообразным кислородом и наружной поверхностью чушек композита последний начинает плавиться за счет тепла окисления железа, углерода, кремния, марганца и фосфора. При этом количество выделяющегося тепла существенно превышает этот показатель для лома, содержащем по сравнению с металлической матрицей синтикама (чугуном) значительно меньшее количество примесей (примерно на порядок). В сочетании с пониженной температурой плавления синтикама это ускоряет расплавление синтикама и другой металлошихты.

Оксиды железа, входящие в состав синтикама, в процессе окисления железа металлической матрицы также расплавляются, образуя на поверхности плавящихся чушек синтикама жидкую смесь чугуна и оксидов. Это резко ускоряет эндотермическую реакцию окисления углерода кислородом оксидов железа, понижая температуру в зоне их взаимодействия. Выделяющийся при этом продукт реакции — CO интенсивно перемешивает

жидкую пленку, состоящую из расплава чугуна и оксидов железа. Вследствие этого ускоряется поглощение газообразного кислорода плавящейся поверхностью чушек синтикома, нагрев и расплавление их. Одновременно с этим усиливают стекание пленки жидкого металла, их срыв кислородным потоком и поступление капелек жидкого железа и его оксидов в слой металлозавалки. Перевод режима течения пленок расплава из ламинарного в турбулентный режим одновременно интенсифицирует доставку газообразного кислорода из объема газового потока к поверхности "чушек" синтикома. Это ускоряет расплавление наружных частей синтикома и передачу тепла внутрь "чушек" композита. Вместе взятое, это улучшает тепломассообмен потоков кислорода с синтикомом и ломом и снижает локальные температуры на реакционной поверхности.

Образующийся монооксид углерода инжестируется потоками кислорода и дожигается до CO_2 . Тепло дожигания передается окружающей твердой шихте и поверхности ванны, покрытой "чущками" синтикома и выступающими над ванной кусками лома. Это оказывает дополнительное позитивное влияние на нагрев и расплавление всего синтикома и лома и металлической ванны в целом.

Интенсивное перемешивание пленки жидкого расплава металла на границе синтиком и понижение температуры в зоне контакта кислорода с наружными частями плавящихся кусков синтикома и лома уменьшает количество плавильной пыли и угар железа. Кроме того, капельки образовавшегося жидкого металла стекают вниз и понижают температуру поверхности в зоне реакции синтикома с кислородом.

Подчеркнем еще раз то обстоятельство, что окисление части углерода синтикома происходит за счет конденсированного кислорода, поступающего из оксидов железа. Эта реакция носит в отличие от окисления углерода газообразным кислородом эндотермический характер. Поэтому ее протекание понижает температуру в зоне реакции кислорода с металлической матрицей синтикома. Снижение температуры в этой зоне уменьшает степень испарения железа и его оксидов и повышает выход жидкого железа из синтикома. Расплавление металлолома в объеме металлической ванны при использовании синтикома протекает за счет тепла, выделяющегося при окислении углерода и других примесей жидкого чугуна и твердого чугуна синтикома. Таким образом, механизм плавления металлолома в обычной конвертерной плавке и при работе на синтикоме принципиально отличается. В первом случае лом плавится непосредственно за счет тепла окисления железа газообразным кислородом. Во втором – плавление осуществляется внутри металлозавалки за счет тепла окисления примесей чугуна синтикома и жидкого чугуна при отсутствии или минимальном контакте газообразного кислорода с металлоломом. Кроме того, в последнем случае газообразный кислород реагирует с ломом, предварительно подогретым за счет тепла, поступившего в металлозавалку за счет опережающего плавления синтикома

по сравнению с ломом. Естественно, это снижает потери железа с отходящим дымом и ускоряет расплавление металлолома в конвертере.

При работе электропечи с использованием вместо части металлолома синтикама последний опережает расплавление лома, поскольку температура плавления металлической основы синтикама — высокоуглеродистого расплава намного ниже лома и может достигать 350°C . Это ускоряет образование жидкого расплава и металлической ванны на подине печи, а также формирование шлака. Непрерывное образование СО обеспечивает перемешивание образующегося металла и шлака и интенсифицирует теплообмен в рабочем пространстве, позволяя повысить эффективность передачи тепла из дуги в расплав. Благодаря этому уменьшается окисление железа.

Газотворная способность синтикама обеспечивает непрерывное образование и поступление в рабочее пространство электропечи в период проплавания металлозавалки заполнения шихтой значительных количеств монооксида углерода — в среднем $40 - 50 \text{ м}^3$ на 1 т синтикама и более. Дожигание СО до CO_2 в наиболее напряженный в тепловом отношении период плавки — плавление приводит к повышению температуры и более равномерному распределению тепла в печи, заполненной нерасплавленным ломом и жидким металлом в центре печи. В результате этого достигается более эффективное использование тепла отходящих газов и всей энергии в целом.

Следовательно, применение синтикама в электроплавке обеспечивает выделение и горение монооксида углерода с начала плавки и в максимальной степени увеличивает продолжительность пребывания технологических газов в печи. Иными словами, трансформация чугуна в синтикоме снимает ограничения с процесса дожигания СО до CO_2 , свойственные ему на стадии жидкой ванны. Повышение степени дожигания и эффективности передачи этой энергии сопровождается уменьшением степени окисления железа металлошихты и ванны. Последнее связано с тем, что при применении синтикама снижается окислительный потенциал атмосферы печи.

Таким образом, синтиком обеспечивает более высокое использование потенциала углерода как энергоносителя. В этом отношении синтиком обладает несомненными преимуществами перед чугуном. Таким образом, в экологическом отношении синтиком превосходит твердый чугун.

10.3. Энергозатраты на производство синтикама

Значительный интерес представляет сравнение энергозатрат на производство металлизированных окатышей и синтикама. Выполненные нами расчеты показали, что удельные расходы энергии при получении синтикама и металлизированных окатышей примерно одинаковы и составляют $0,58 - 0,62$ тонн условного топлива на 1 т материала. Из расчета следует, что преобразование чугуна в синтиком за счет ввода в чугун твердого окислителя сокращает энергозатраты. Это обстоятельство объясняется тем, что в синтикоме углерод, кремний, марганец металлической основы — чугуна

получают возможности для более полного использования своего восстановительного потенциала. За счет этого происходит восстановление железа железорудного наполнителя синтикома и снижение удельного расхода энергии на 1 т железа. Помимо этого, синтиком марок СК10 и СК15, используемый в электропечах, требует на свое расплавление меньшего количества электроэнергии, поскольку обладает меньшим охлаждающим эффектом. Кроме того, в отличие от металлизированных окатышей, плавящихся в шлаке, синтиком расплавляется подобно лому в результате непосредственного воздействия электрических дуг, то есть с более высоким тепловым к.п.д. Вследствие этого энергозатраты на проплавление синтикома указанных марок меньше, чем железа прямого восстановления.

Таким образом, энергозатраты как на производство синтикома, так его расплавление в дуговых печах меньше по сравнению с металлизированными окатышами.

Литература

1. Шевелев Л.Н.. Методические основы инвентаризации парниковых газов в черной металлургии России. Металлург, 2007, № 3, с.32.

Экономическая эффективность синтикама

11.1. Экономическая эффективность производства синтикама в доменном производстве

В результате промышленных испытаний в 1993 – 2005 гг. было произведено и использовано около 1000 тыс. т синтикама, получен большой банк данных, исследование и анализ которых позволяет выявить экономическую эффективность производства и потребления синтикама различных марок в разных сталеплавильных агрегатах [1].

Затраты на производство синтикама в доменном цехе определяются, исходя из их уровня на производство чугуна с учетом расхода железорудного наполнителя и увеличения за счет этого объема производства синтикама по сравнению с чугуном. В зависимости от марки синтикама расход железорудного наполнителя обычно составляет 10 – 25%. Для расчета себестоимости синтикама было принято усредненное значение 20 %, при этом производство товарной продукции на 1 т чугуна увеличивается в 1,2 раза. Обратно пропорционально уменьшаются условно-постоянные затраты на производство синтикама по сравнению с чугуном, то есть в 1,2 раза.

Расчет “себестоимость, баланс железа и прибыль” 1 т чугуна и синтикама представлен в табл.11.1.

11.2. Эффективность применения синтикама в сталеплавильном производстве

В стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2015 года в разделе 5 “Важнейшие инвестиционные проекты и комплекс обеспечивающих мероприятий” выделены важнейшие инновационные проекты и научно-исследовательские разработки, рекомендуемые к реализации в период до 2015 года. В них отмечен комплекс работ, направленных на расширение производства и использования синтикама.

Применение синтикама при выплавке стали позволяет обеспечить требуемую чистоту металла по содержанию примесей цветных металлов, фосфора и азота, улучшить за счет этого марочный сортамент выплавляемых сталей и повысить их физико-механические свойства.

Таблица 11.1

**Себестоимость баланс железа и прибыль 1 т чугуна
и синтикома в доменном цехе**

Виды затрат на 1 т продукции	Чугун			Синтиком СК20			к чугуну	
	расход,	цена,	сумма,	расход,	цена,	сумма,	+, -,	в
	т/т	руб./т	руб./т	т/т	руб./т	руб./т	руб./т	% %
Себестоимость:								
Железорудн.								
продукция	1,515	2500	3788	1,212	2500	3030	-758	-76
Наполнитель (с уч.потерь 5%)	—	—	—	0,210	2500	525	+525	+5,3
Кокс	0,480	7200	3456	0,384	7200	2765	-691	-6,9
Расходы								
по переделу	—	—	2886	—	—	2230	-656	-6,6
Отходы и побочн.	—	—	283	—	—	226	+57	+0,5
Продукты (-)								
Итого			9847			8324	-1523	-15,3
Разливка чугуна			103			142	+39	+0,4
Всего затрат			9950			8466	-1484*)	-14,9

*) 1484 р/т — снижение в основном за счет кокса (-691 р.) и по переделу (-656 р.).

Виды затрат на 1 т продукции	Чугун			Синтиком СК20			к чугуну	
	расход,	Сод.	Итого	расход,	Сод.	Итого	(+, -),	в % %
	т/т	Fe, %	Fe, т/т	т/т	Fe, %	Fe, т/т	Fe, т/т	
Баланс железа:								
Жел.рудн.	1,515	65,6	0,994	1,212	65,6	0,795	-0,199	-21,1
продукция								
Потери Fe (5,2 %)	—	—	0,052			0,041	+0,011	+1,1
Итого Fe в 1 т	—	—	—	0,21	65,6	0,138	+0,138	+14,7
продукции								
Всего Fe в 1 т			0,942	—	—	0,892	-0,050	-5,3/94,7
продукции								
Экономика:								
			Сумма,			Сумма,	+, -	в % %
			р./т			р./т	р./т	
Себестоимость 1 т Fe			10563			9491	-1072	-10,1
Проект прибыли			739			1811	+1072	+145,1
на 1 т Fe								
Проект цены на 1 т Fe			11302			11302		
Проект цены на								
1 т продукции			10646			10646		
Проект прибыли			696			2180	+1484	213,2
на 1 т продукции								
Рентабельность, %			7,0			25,8	+18,8	

Для кислородно-конвертерного процесса преобразование чугуна в синтиком снимает полностью все ограничения, накладываемые технологией этого процесса на применение твердого чугуна и позволяют заменить весь лом и твердый чугун в металлозавалке конвертеров синтикомом. Исследования на ОАО "Северсталь", выполненные С.Д.Зинченко и соавторами, показали, что в 375 т конвертерах, использующих в качестве охладителя примерно 110 т металлолома, расход твердого чугуна на плавку не может превышать 20 т [2]. Следовательно, степень замены лома в конвертерах твердым чугуном ограничена пределом 18 % от массы лома или 5 % от общей массы металлозавалки, включая жидкий чугун.

В отличие от этого доля синтикома не имеет ограничений и может достигать 100 % по отношению к металлолому и 30 % к суммарной массе металлопихты. Это открывает возможность полного вывода лома из пихты конвертеров и возможность их работы на 100 % чистой первородной пихты, состоящей из жидкого чугуна и синтикома, металлическая основа которого имеет состав, одинаковый с жидким чугуном. Синтиком в зависимости от ситуации может использоваться вместе с ломом, повышая тем самым гибкость технологического процесса.

Не меньшее, если не большее значение, имеет синтиком для электросталеплавленного производства, позволяя в отличие от твердого и жидкого чугуна работать электродуговой печи с любым содержанием его в металлопихте вплоть до 100 %, если это вызывается необходимостью. Благодаря этому в электропечах можно повысить долю первородной пихты до уровня кислородно-конвертерного процесса. Это обеспечивает возможность выплавки в электропечах сталей самого ответственного сортамента, не уступающего конвертерам, повышая конкурентоспособность электросталеплавленного производства. Положительное влияние синтикома на чистоту, качество и сортамент выплавляемых сталей в конвертерах и электродуговых печах, а также возможность работы сталеплавленных агрегатов с полной заменой лома и твердого чугуна синтикомом не исчерпывает всех технологических и экономических преимуществ применения синтикома. К ним следует добавить снижение расхода энергии, сокращение утара железа, повышение выхода железа, экономию кислорода, лучшую экологию и т.д. Вместе взятое, это открывает значительные перспективы для производства и применения синтетических композиционных материалов типа синтиком при выплавке стали.

11.3. Определение себестоимости, цены и прибыли от производства и реализации различных марок синтикома

Учитывая разнообразные запросы потребителей, разработан синтиком различных марок в зависимости от содержания железорудного наполнителя: СК10, СК15, СК20, СК25 (соотношение наполнителя к чугуну: СК10 10:90;

СК15 15:85; СК20 20:80; СК25 25:75). Химический состав синтикома различных марок приведен в табл.11.2. Ниже приведены результаты расчетов основных экономических показателей для этих марок.

Таблица 11.2

Химический состав синтикома различных марок, масс.%

Содержание элементов	СК10	СК15	СК20
Железо (общее)	90,8 – 93,8	89,0 – 92,0	87,2 – 90,2
Железо (металлическое)	83,5 – 89,2	78,7 – 84,4	74,0 – 79,5
Fe ₂ O ₃	5,9 – 10,4	9,9 – 14,5	13,8 – 18,6
FeO	0,3 – 0,6	0,5 – 0,8	0,7 – 1,0
C	2,9 – 3,7	2,8 – 3,5	2,6 – 3,3

Учитывая сложность учета затрат и определения эффекта по маркам синтикома, расчеты их себестоимости, цен и прибыли определяли на основе методики, разработанной на базе проведенных технико-экономических расчетов по многим металлургическим предприятиям России и зарубежья. Выведена формула себестоимости синтикома ($C_{СК}$), исходя из себестоимости чугуна, преобразуемого в синтиком:

$$C_{СК} = C_{чуг}(D_{чуг} + 0,21 D_{нап} + 0,0063),$$

где $C_{чуг}$ — себестоимость чугуна; $D_{чуг}$ — доля чугуна в синтикоме; $D_{нап}$ — доля наполнителя в синтикоме; 0,21 — коэффициент, учитывающий цену наполнителей 20% от себестоимости чугуна и потери наполнителей 5%; 0,0063 — коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на действующей разливочной машине чугуна, связанные с производством синтикома.

Исходя из данных табл.11.1, определяется себестоимость синтикома СК20 по формуле:

$$C_{СК20} = 9950 - (0,80 + 0,21 \cdot 0,20 + 0,0063) = 8466 \text{ руб./т}$$

В данном случае результаты расчета себестоимости калькуляционным методом и по универсальной формуле совпадают.

Цена синтикома ($\Pi_{СК20}$) в данном случае принимается с учетом его технологических свойств на уровне цены чугуна, то есть 10646 руб.

$$\Pi_{СК20} = 10646 \text{ руб.}$$

Таким образом, прибыль на 1 т синтикома всегда будет выше прибыли на 1 т чугуна, используемого для производства синтикома

$$\Pi_{СК20} = \Pi_{СК20} - C_{СК20} = 10646 - 8466 = 2180 \text{ руб./т}$$

Прибыль на 1 т чугуна в аналогичных условиях производства составит 696 руб.

Отмечая высокую экономическую эффективность доменного производства при изготовлении синтикома, следует обратить внимание на формулу повышения прибыли от преобразования 1 т чугуна в синтиком

$$\Pi_{СК/т\ чут} = \Pi_{СК} \times K_{\text{вых.СК/т чут}} = \Pi_{СК} : D_{\text{чут}},$$

где $\Pi_{СК/т\ чут}$ — прибыль на 1 т чугуна, преобразованного в синтиком; $\Pi_{СК}$ — прибыль на 1 т синтикома; $K_{\text{вых.СК/т чут}}$ — коэффициент выхода синтикома на 1 т чугуна; $D_{\text{чут}}$ — доля чугуна в синтикоме.

Прибыль на 1 т чугуна, преобразованного в синтиком СК20, составит 2725 руб, что в 3,9 раз выше прибыли от товарного чугуна:

$$\Pi_{СК/т\ чут} = 2180 : 0,8 = 2725 \text{ руб.}$$

Аналогичные показатели экономической эффективности по каждой марке синтикома с корректировкой на долю наполнителя представлены на рис.11.1 – 11.3 (на рис.11.3 экономические показатели рассчитаны в соответствии с разработанной методикой).

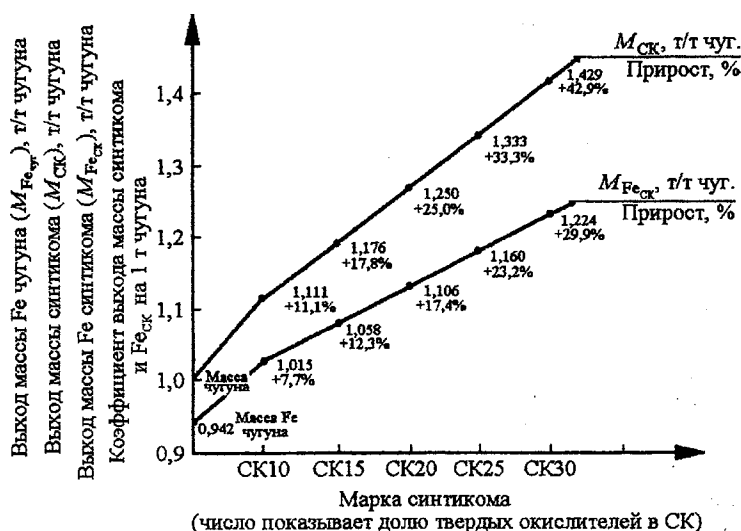


Рис. 11.1. Динамика выхода массы синтикома с использованием для его производства 1 т жидкого передельного чугуна и твердых окислителей (окатышей окисленных, агломерата, железной руды и др.) по маркам СК (синтикома).

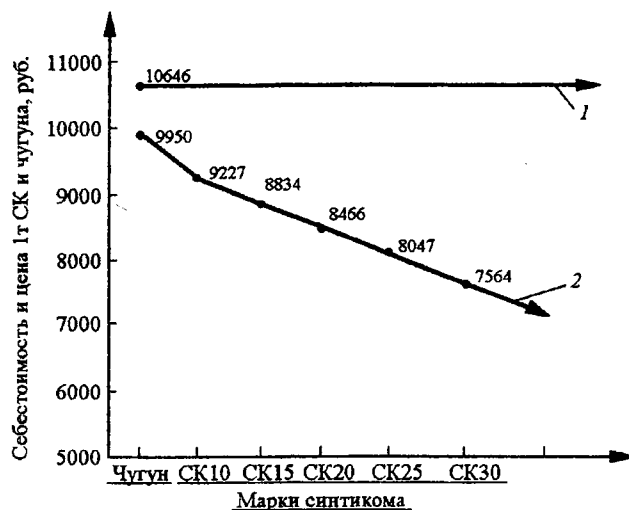


Рис. 11.2. Динамика себестоимости и цены (франко-завод), руб., 1 т синтикома в сравнении с этими показателями 1 т передельного чугуна: 1 — цена синтикома; 2 — себестоимость синтикома. Цена и себестоимость передельного чугуна предприятия-производителя синтикома приняты 10646 и 9950 руб. соответственно.

Выводы

Анализ экономических показателей производства и реализации синтикома основных марок (СК10, СК15, СК20, СК25, СК30) позволяет сделать следующие выводы:

Организация производства новой композиционной шихты — синтикома на действующих мощностях доменного цеха обеспечивает:

— увеличение выхода новой металлошихты на 11,1 % при производстве СК10 и на 42,9 % при производстве СК30;

— снижение себестоимости обратно пропорционально доле наполнителя, то есть чем больше доля наполнителя, тем ниже себестоимость синтикома (с 7,3 на СК10 до 23,1 % на СК30);

— увеличение прибыли на 1 т чугуна, преобразованного в синтиком, пропорционально доле наполнителя (с 880 руб. на 1 т чугуна, преобразованного в СК10, до 3580 руб. на 1 т чугуна, преобразованного в СК30);

— снижение экологической нагрузки на 1 т новой металлошихты пропорционально коэффициенту выхода синтиком на 1 т чугуна, так как весь прирост шихты обеспечивается без дополнительного расхода кокса, природного газа, кислорода, дутья и других энергоресурсов.

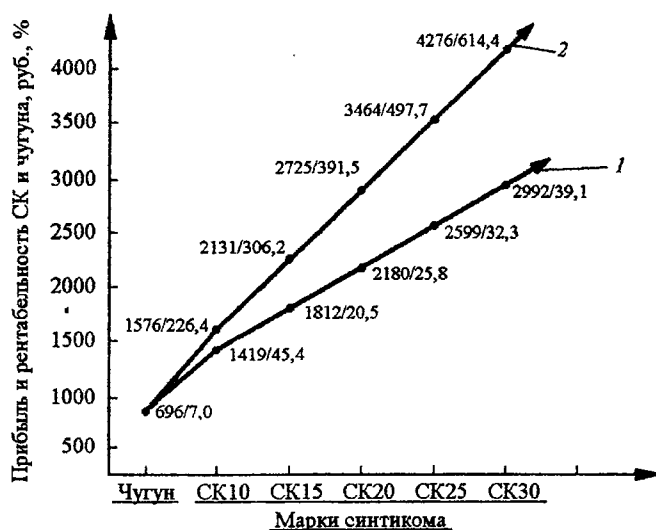


Рис. 11.3. Динамика прибыли и рентабельности синтикама в сравнении с показателями по чугуна, а также прибыли от преобразования 1 т чугуна в синтиком: 1 — прибыль на 1 т синтикама и рентабельность (отношение прибыли к себестоимости чугуна и синтикама); цифры у кривой: в числителе — прибыль, руб.; в знаменателе — рентабельность, %; 2 — прибыль от преобразования 1 т чугуна в синтиком, руб. (числитель), отношение этой прибыли к прибыли на 1 т чугуна, % (знаменатель).

Потребность в качественной металлошихте опережает фактические возможности обеспечения металлургии России и зарубежных стран (особенно с ростом удельного веса электросталеплавильного производства), что создает предпосылки для значительного прироста продукции доменного производства — изготовления новой металлошихты — Синтиком®.

Окупаемость капитальных вложений в организацию производства синтикама на действующих разливочных машинах чугуна составляет 4 – 6 мес.

Вышеперечисленные факторы обеспечивают синтикому высокую конкурентоспособность на российском и зарубежном рынках.

Литература

1. Дорофеев Г.А., Шевелев Л.Н., Совков Д.А. М.: Черметинформация, Бюлл. Черная металлургия, № 6, 2001, с.58 – 65.
2. Зинченко С.Д., Ефимов С.В., Краснов А.В. и др. Труды девятого конгресса сталеплавильщиков. М.: Черметинформация, 2007, с.171 – 178.

Направления физико-химических исследований и совершенствования синтикома

12.1. Состояние вопроса

Дальнейшее развитие и совершенствование композиционных материалов типа синтиком в значительной мере определяется состоянием физико-химических исследований процессов, протекающих в этом материале.

В настоящее время сталеплавильщики используют три основных вида металлошихты — металлолом, чугуны и металлизированное железо. Металлолом, являясь самым дешевым видом шихты, одновременно и самый загрязненный по вредным примесям, особенно по цветным металлам, удаление которых в ходе плавки экономически невыгодно или просто невозможно. Доля собственного качественного оборотного лома в связи с переходом на непрерывную разливку стали резко снизилась. Кроме того, физические свойства лома, в частности, насыпная плотность его, ухудшалась. К этому добавился дефицит лома. Поэтому металлолом начинает терять свои позиции.

Ведение плавки на 100 % чугуна в завалке технологически и экономически нерационально, вероятно, для всех основных видов сталеплавильных агрегатов. Металлизированный полупродукт (окатыши, брикеты), хотя и отличаются чистотой по вредным примесям, изначально дороже чугуна и более энергоемок. Вместе с ограниченными масштабами их производства это сужает область их использования сталями ответственного назначения. Изложенные факторы делают чрезвычайно актуальными создание новых видов массовой и качественной металлошихты, в том числе материалов типа синтиком.

Главным преимуществом синтикома как нового материала от других видов металлошихты является раннее (еще в твердом состоянии) начало взаимодействия углерода и оксидов железа и его завершение к моменту расплавления шихты. Это позволяет совместить обезуглероживание шихты с ее плавлением и получать дополнительное количество нового железа. Синтиком является первородной шихтой, что делает его аналогом металлизо-

ванных окатышей и брикетов, но обладает лучшими металлургическими свойствами, а главное дешевле продуктов прямого восстановления железа. Стоимость синтикома, естественно меньше стоимости чугуна, из которого он изготовлен. Кроме того, в отличие от него применение синтикома в качестве металлошихты не приводит к увеличению длительности плавки. Синтиком также оказывает положительное влияние на технологию выплавки стали. Данные факторы делают синтиком лучшей шихтой для сталеплавильных агрегатов.

Промышленное производство синтикома снижает остроту проблемы с качественной шихтой для сталеплавильного передела, улучшает технологию выплавки стали и способствует повышению качества выплавляемой стали.

При использовании синтикома дополнительно получается 6 – 15 % нового железа из железорудного наполнителя данной шихты. Это позволяет либо произвести больше стали при прежнем техногенном воздействии на окружающую среду, либо улучшить экологию в местах расположения металлургического производства при сохранении прежнего объема производства стали за счет сокращения производства чугуна.

По результатам экспериментов с образцами синтикома точно известного состава можно считать установленными следующие особенности протекания процессов при переплаве синтикома.

Углерод синтикома начинает окисляться очень рано — уже с 700°C. До 1150°C взаимодействие углерода и кислорода идет в твердофазном режиме с лимитированием процесса косвенного восстановления оксидов железа реакцией газификации. В результате окисления кремния чугуна на поверхности окатышей возникает пленка кремнезема, замедляющая процесс окисления углерода чугуна. При 1150 – 1200°C плавится чугун синтикома, снимая диффузионные затруднения в доставке реагентов в зону реакции, процесс переходит в режим жидкофазного окисления углерода чугуна кислородом твердых окатышей с новым ускорением процесса обезуглероживания. Скорость окисления углерода при этом достигает колоссальных значений — 0,3 – 0,6 %/мин. и более, превышающих даже скорость окисления углерода в кислородном конвертере.

Наличие первого и второго периодов окисления углерода (окисление углерода твердого и жидкого чугуна кислородом твердых окатышей) — отличительная черта синтикома как нового шихтового материала. При этом окисляется до 30 % от общего количества углерода чугуна (при обычном варианте синтикома). Пространственная структура материала при этом в основном сохраняется, обеспечивая большую удельную поверхность реагирования и, следовательно, большие скорости обезуглероживания при низких температурах.

При дальнейшем повышении температуры происходит разделение металлической и неметаллической составляющих синтикома по плотности, особенно с плавлением оксидной составляющей шихты. При этом скорость окисления углерода снова падает. Новое повышение скорости обезугле-

роживания происходит при 1600 – 1620°C после формирования жидко-подвижного железистого шлака. Процесс обезуглероживания в этот момент развивается чрезвычайно сильно, приобретая самоускоряющийся характер.

Варьирование доли окатышей в составе синтикома от 15 % до 30 % по массе показало, что введение 15 % окатышей недостаточно для окисления углерода. При 30 % окатышей они в условиях опытов полностью не успевают прореагировать с чугуном из-за выбрасывания из реакционной зоны шлаковой фазы. Для окисленных окатышей оптимум находится в пределах 20 – 25 %, когда остаточный углерод в металле составляет 1 – 1,5 %, а количество остаточного шлака на поверхности металла менее 2 %.

Увеличение скорости нагрева уменьшает относительную долю углерода, окислившегося в результате твердофазных реакций, соответственно увеличивая долю и скорость обезуглероживания при взаимодействии жидких фаз.

Влияние концентрации кремния на процесс обезуглероживания двояко. Высокие концентрации кремния в чугуне (2 %) приводят к возникновению пленок SiO_2 на поверхности твердых окатышей в температурной зоне твердофазных реакций, что тормозит процесс окисления углерода в этот самый ценный с точки зрения сталеплавильной технологии момент. Практически полное отсутствие кремния в составе чугуна (<0,1 %) устраняет этот минимум на кривой обезуглероживания, но снижает долю углерода, окислившегося в зоне низких температур (вероятно, из-за уменьшения термодинамической активности углерода, вызванной уменьшением концентрации кремния в составе чугуна). Перенос окисления основной части углерода чугуна из зоны твердофазных реакций в область жидкофазного взаимодействия приводит к весьма высокой интенсивности кипения микрованны, образуемой синтикомом. Наличие пустой породы (SiO_2) в окатышах Михайловского ГОКа несколько смягчает неконтролируемое вскипание ванны. Использование же чистых по кремнезему окатышей Лебединского ГОКа ведет к еще большей скорости обезуглероживания при высоких температурах, вплоть до взрывного его характера. Исходя из этого, наиболее подходящим материалов для производства синтикома на настоящее время является перedefельный чугун.

Отдельная проблема — поведение вредных примесей при переплаве синтикома. Установлено, что происходит устойчивое удаление фосфора (наилучший результат — с 0,1 до 0,05 %) и серы (в среднем с 0,03 до 0,02 %) при переплаве композита. Классические условия удаления этих элементов требуют наличия высокоосновного шлака. В случае переплава обычного варианта синтикома известь в системе отсутствует. Возникающая шлаковая фаза — силикатный высокожелезистый шлак — обладает, как известно, весьма низкой фосфор- и серопоглолительной способностью, что не позволяет полностью объяснить наблюдаемый эффект рафинирования переходом данных примесей в шлак. Возможен и другой механизм самопроизвольного рафинирования синтикома от фосфора и серы, а именно газовая дефосфорация и десульфурация. Если удаление серы из шлака в газ хорошо

известно из практики ЭШП, то газовая дефосфорация значительно менее изученный и доказанный процесс.

В процессе изучения этого материала было установлено, что синтиком представляет весьма необычный с металлургической точки зрения физико-химический объект. Протекающие в нем процессы в ряде случаев нельзя объяснить с позиций обычной равновесной термодинамики, имеют место много новых эффектов и явлений, требующих дальнейшего изучения.

12.2. Направления дальнейших исследований

Следует продолжить исследования свойств и технологии использования синтикома базового варианта (передельный чугун и твердый окислитель). Знание закономерностей обезуглероживания, удаления других примесей, механизма плавления и т.д. — основа не только рационального использования синтикома, но и дальнейшего совершенствования как самого материала, так и технологии его передела на сталь.

Имеющиеся сейчас результаты исследований носят большей частью предварительный характер, очерчивая возможные границы варьирования параметров синтикома. Получение количественных зависимостей позволит точно регулировать скорость обезуглероживания материала; остаточное содержание углерода в металлической ванне по окончании периода плавления; концентрации вредных примесей в получающемся металле; массу получающего при плавлении композита шлака, а также другие параметры в зависимости от технологических задач. Такой подход может сделать синтиком весьма универсальным металлическим материалов с широкими функциональными возможностями.

Простой путь ускорения окисления углерода композиционного материала при низких температурах — уменьшение среднего диаметра размера частиц твердого окислителя до 10 мм и менее. В этом случае возникающие пленки кремнезема на поверхности окатышей будут иметь меньшую толщину и, следовательно, меньше тормозить массоперенос реагентов. Уменьшить толщину пленки оксида кремния можно и уменьшая содержание кремния в чугуне и пустой кремнистой породы в окисленных окатышах. Это позволит заранее задавать скорость окисления углерода в синтикоме и содержание углерода по расплавлению.

Перспективно применение в составе синтикома офлюсованных окатышей с повышенной до 2 и более основностью. Образование высокоосновного шлака при применении синтикома с "обычными" окатышами Михайловского ГОКа (основность 0,3 – 0,4) происходит после нагрева до температур выше 1400 °С, когда начинают плавиться сами окатыши. Вытекающий кремнисто-железистый шлак ассимилирует известь завалки и создает условия для дефосфорации металла шлаком. Ускорить этот процесс и позволяет офлюсование окатышей. Кроме того, наличие флюса в составе твердого окислителя способствует растворению пленок кремнезема и зерен

гематита при более низких температурах, ускоряя с увеличением его количества окисления углерода, удаляемого в первый период плавления синтикома. Возможно также введение в состав окатышей и других типов флюсов, более эффективных, чем оксид кальция.

Необходим систематический анализ потребительских свойств синтикома. Пока же даже характеристики композита, в том числе как шихтового материала, до конца не определены. Поэтому необходимо научное доказательное определение параметров, характеризующих потребительские свойства синтикома, их численных значений.

Потребительские свойства этого материала можно предварительно охарактеризовать следующими основными параметрами:

1) количеством углерода, окислившегося в первый период за счет твердых окатышей;

2) средней и максимальной скоростями окисления углерода за первый период плавления синтикома;

3) максимальной скоростью окисления углерода синтикома, которую желательно нормировать;

4) выход металла и шлака из одной тонны синтикома.

Необходимо разработать методики и аппаратуру для определения свойств синтикома, стандартизовать и сертифицировать их.

Особого внимания заслуживает изучение механизма самопроизвольного удаления фосфора и серы, а возможно, и других вредных примесей (мышьяка, цветных металлов) в ходе нагрева и расплавления синтикома. Имеющиеся сейчас предварительные данные показывают, что этот процесс получает довольно большое развитие при нагреве и плавлении композита. Решение данной задачи требует использование прецизионной техники анализа шлаковой и металлической фаз, непрерывного контроля отходящих газов по фосфору, сере и другим элементам современными спектральными методами.

При плавлении синтикома часть углерода чугуна расходуется на восстановление входящих в его состав оксидов железа, сопровождающееся затратами внешнего тепла и снижением концентрации углерода. Потери углерода на реакцию восстановления железа можно устранить, если дополнительно ввести в состав синтикома углеродсодержащие материалы. Одновременно с этим достигается повышение энергетического потенциала синтикома. При надлежащей организации дожигания CO до CO₂ и передаче этого тепла окружающим материалам расход тепла на расплавление синтикома может снизиться до уровня 130 – 200 кВтч/т композита. Это значение примерно отвечает твердому чугуну для случая окисления углерода и других примесей газообразным кислородом. Помимо прочего, углеродистый синтиком обеспечивает получение заданного содержания углерода в металле по расплавлению ванны и открывает возможность регламентации окисления углерода в более широких пределах. Благодаря этому гарантируется перемешивание и кипение ванны на протяжении всей плавки от начала плавления и до выпуска стали и снижение азота в стали.

Принципиальным является изучение вопросов предварительного (перед сталеплавильным переделом) обезуглероживания самого синтикама. Это направление по значимости следовало бы поставить на первое место излагаемого исследовательского ряда.

Принимая во внимание сложное положение в РФ с ферросплавами, точнее с огромной их стоимостью, весьма актуальны и перспективы исследования по применению технологии синтикама для прямого легирования стали. Используя для его изготовления природнолегированные окатыши или другие аналогичные наполнители, можно осуществить выплавку низколегированных сталей и обойти проблемы, связанные с использованием природнолегированных руд в классической технологической цепочке.

Это направление требует комплексного рассмотрения многих физико-химических и технологических аспектов проблемы. Один из возможных вариантов включает использование хром- и никельсодержащих руд. Обычное использование их в шихте доменной печи позволяет полностью перевести хром и никель в чугун, однако дальнейший окислительный передел такого чугуна на сталь приводит к образованию гетерогенных хромсодержащих шлаков, затрудняющих ведение плавки и ведущий к потере большей части хрома чугуна. За счет изначального тесного переплетения компонентов синтикама между собой и бурного перемешивания их газообразными продуктами реакций можно прогнозировать существенно большее извлечение хрома из руды. Дополнительное офлюсование природнолегированных окатышей известью и (или) иными эффективными флюсами улучшит условия восстановления ценных легирующих компонентов окатышей углеродом чугуна.

Это же относится и к ванадийсодержащим железным рудам Качканарского месторождения и других аналогичных месторождений Урала.

Появление синтикама частично снимает проблемы с обеспечением электропечей шихтой известного состава и свойств. Однако чрезмерное количество выделяющихся при его переплаве газов ограничивает долю синтикама в шихте существующих электропечей примерно половиной от массы завалки. Предварительное обезуглероживание синтикама позволит убрать из него избыточные количества углерода и окислителей, оставив только необходимые с точки зрения перемешивания ванны и образования пенистого шлака их концентрации. Таким путем легко достигнуть 100 % использования синтикама в шихте любых электропечей.

Как показали эксперименты, возможно полное предварительное обезуглероживание синтикама. Это превращает его в точный аналог металлизированных брикетов и окатышей, но существенно более дешевый. Естественно, что такая шихта может использоваться и для индукционных печей, где условия взаимодействия между металлом и шлаком неблагоприятны и оксиды железа в случае использования обычного синтикама полностью не восстанавливаются.

Данное направление основывается на экспериментальном факте очень раннего температурного начала окисления углерода синтикома с 700 – 750°C. Причем при 1000 – 1100°C скорость окисления углерода уже сопоставима со скоростью окисления углерода в электродуговой печи. Если поддерживать постоянными такие температурные условия, то можно ожидать продолжения обезуглероживания синтикома за счет твердофазных реакций. Конечно, скорость обезуглероживания по ходу процесса будет падать, но увеличивая межфазную поверхность (твердые окислители, меньшего, чем стандартный, диаметра), флюсуя окатыши и т.д. можно поддерживать ее на достаточном уровне. Прервав процесс обезуглероживания, можно будет получать синтиком с пониженными и регулируемым содержанием углерода и высокой степенью металлизации.

Необходимо подчеркнуть, что дополнительным преимуществом такого процесса является полезное использование тепла жидкого чугуна, которое при изготовлении классического синтикома как и чушкового чугуна теряется. Это — один из главных аргументов критиков изготовления и применения синтикома. В предлагаемом процессе тепло жидкого чугуна расходуется на нагрев окислителей до температуры реакции, а также нагрев изложницы и теплопотери с поверхности чушек синтикома. Первая статья расхода тепла — полезная. Если изготовить вместо разливочной машины чугуна единый специализированный разливочно-нагревательный агрегат, то и естественный нагрев изложниц — полезная статья теплового баланса процесса. Подходящий материал для изложниц в этом случае является карбид кремния, изделия из которого стойки к окислению, по термостойкости не уступают чугуну, относительно дешевы и широко представлены на внутреннем рынке.

Вышеизложенные направления научных исследований носят конкретный характер. Вместе с ними нужно развивать и другие научные направления по синтикому. К их числу относятся влияние технологии синтикома на структуру и свойства получающихся металлических и шлаковых фаз, структурных превращений в них, поверхностные явления на границах раздела твердые-твердые, твердые-жидкие, жидкие-жидкие металл и шлак, скорости реакций металл-шлак и другие фундаментальные вопросы как классической термодинамики, так и термодинамики необратимых процессов.

Необходимо решать и общие металлургические вопросы применения синтикома как прогноз и поведение газов, неметаллических включений, иных примесей, установление связей между технологией использования синтикома и служебными свойствами готового металла.



Шахпазов Евгений Христофорович родился 19 марта 1950 года. Окончил Московский институт стали и сплавов (металлургия черных металлов). Доктор технических наук, профессор, лауреат премии Совета Министров СССР и дважды премии Правительства РФ. Автор более 160 научных работ и 22 патентов. Генеральный директор ФГУП ЦНИИчермет им.И.П.Бардина.

Дорофеев Генрих Алексеевич родился 1 июня 1937 г. Окончил Metallургический институт в г. Мариуполь (металлургия черных металлов). Кандидат технических наук, доцент, лауреат премии Правительства РФ, обладатель ряда российских и зарубежных наград. Автор более 200 научных работ и 50 патентов. Генеральный директор ООО «НППМ Интермет-Сервис».

