



В. В. Павлов

НЕСООБРАЗНОСТИ МЕТАЛЛУРГИИ

Екатеринбург – 2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»



В. В. Павлов

НЕСООБРАЗНОСТИ МЕТАЛЛУРГИИ

Научная монография

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

Третье издание, переработанное
и дополненное

Екатеринбург – 2013

УДК 54
П 12

Рецензент: *А. Н. Смирнов*, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой химической технологии неметаллических материалов и физической химии МГТУ им. Г. И. Носова

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

Павлов В. В.

П 12 Несообразности металлургии: научная монография / В. В. Павлов; Урал. гос. горный университет. третье изд., переработанное и дополненное. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. 212 с.
ISBN 978-5-8019-0272-2

Рассмотрены несообразности доменного процесса и металлургического цикла – неполное сжигание топлива; опасно – капризный характер процесса, плохая управляемость; необходимость хорошо окускованного сырья; переуглероживание металла. Отмечено, что эти несообразности сложились в древности, и поддерживаются древней доменной идеологией. Несообразности можно устранить, если перейти от современной совместной продувки руды и топлива к их последовательной продувке, или к реакциям в пылегазовой взвеси.

Книга предназначена для научных сотрудников и аспирантов, а также для студентов.

Рис. 15. Табл. 3. Библиогр. 48 назв.

УДК 54

ISBN 978-5-8019-0272-2

© Уральский государственный
горный университет, 2008, 2011, 2013
© Павлов В. В., 2008, 2011, 2013

Научное издание

Валерий Васильевич Павлов

НЕСООБРАЗНОСТИ МЕТАЛЛУРГИИ

Научная монография

Третье издание, переработанное и дополненное

Редактор изд-ва *Л. Н. Авдеева*

Компьютерная верстка *Д. В. Благина, И. А. Крестьяниновой*

Дизайн обложки *И. А. Крестьяниновой*

Подписано в печать 28. 03.2013 г.

Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.

Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.

Печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 14,2. Тираж 150 экз. Заказ №

Издательство УГГУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета

в лаборатории множительной техники УГГУ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ	7
1.1. Причина несообразностей доменного процесса – древняя традиция совместной продувки кусков руды и топлива.....	7
1.2. Порок № 1 – неполное сжигание топлива.....	9
1.3. Теплотехника и термодинамика реакций.....	11
1.4. Методика оценки теплового баланса плавки.....	14
1.5. Усвоение в агрегате химической и физической энергии газов – важнейшее условие его эффективности.....	16
1.6. Возможности полного горения газов на разных стадиях восстановления железа.....	19
1.7. Плавка на железо.....	23
1.8. Порок № 2 – опасно-капризный, неустойчивый ход доменного процесса, плохая управляемость.....	27
1.9. Управляемость доменного процесса можно улучшить.....	30
1.10. Порок № 3 – необходимость окускования сырья, высокие требования к его физическим свойствам.....	33
1.11. Замена кокса угольной пылью при переходе к агрегату Угольный Мидрекс.....	35
1.12. Порок № 4 – плавление на слое кокса, переуглероживание металла, необходимость сталеплавильного передела.....	38
1.13. Достоинства доменного процесса. Альтернативные способы получения металла.....	40
1.14. Влияние доменной идеологии.....	44
1.15. Выводы к главе 1.....	49
ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ ПЫЛЕГАЗОВЫХ РЕАКЦИЙ И ФАКЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ	51
2.1. Известные инжекционные процессы.....	51
2.2. Движение частиц в пылегазовой взвеси.....	55
2.3. Вдувание концентрата.....	58
2.4. Возможные отрицательные последствия.....	62
2.5. Предельный случай – плавка чугуна из одного концентрата.....	67
2.6. Вдувание угольной пыли с порошком концентрата.....	69
2.7. Металлизация пылегазовой взвеси в рекуператоре. Получение порошка железа.....	71
2.8. Переплавка металлизированного концентрата в доменной печи.....	74
2.9. Скорость реакций.....	76
2.10. Металлизация в теплообменнике.....	78
2.11. Факельная плавка чугуна.....	80
2.12. Плавка стали из пылевидных материалов.....	83
2.13. Другие варианты плавки металлизированного концентрата. Химическая утилизация энергии отходящих газов.....	85

2.14. Плавление металлизированного порошка концентрата на огнеупорах рекуператора.....	88
2.15. Устранение всех четырех пороков домны.....	91
2.16. Поведение серы и фосфора.....	92
2.17. Выводы к главе 2.....	94
ГЛАВА 3. УСТРАНЕНИЕ НЕСООБРАЗНОСТЕЙ В ШАХТНОЙ ПЛАВКЕ. АГРЕГАТ «УГОЛЬНЫЙ МИДРЕКС».....	97
3.1. Агрегат «Угольный Мидрекс».....	97
3.2. Плавление спекающейся массы металлизированных окатышей.....	99
3.3. Схема зоны плавления.....	101
3.4. Возможные отрицательные последствия. Газопроницаемость зоны плавления.....	105
3.5. Плавка на железо и сталь.....	106
3.6. Дожигание газов.....	108
3.7. Возможности окислительной зоны дожигания газов.....	111
3.8. Почему не плавят сразу же окатыши в агрегатах типа «Мидрекс»..	113
3.9. Металлизация с дожиганием газов.....	114
3.10. Футеровка.....	117
3.11. Выносной горн-отстойник. О качестве получаемой стали.....	118
3.12. Перевод домны на последовательную продувку.....	121
3.13. Способы введения топлива непосредственно в зону горения, в факелы.....	123
3.14. Выводы к главе 3.....	127
ГЛАВА 4. ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПРОДУВКИ. ПРОДУВКА РАСПЛАВОВ.....	129
4.1. Обеспечение теплом ванны с расплавами. Отопление сталеплавильных агрегатов.....	129
4.2. Эффективное отопление невозможно при равновесии факела с углеродистым металлом.....	131
4.3. Возможности полного сжигания топлива в ванне с расплавами.....	132
4.4. Агрегат типа «Ромелт». Получение металла из руды в сталеплавильном агрегате.....	134
4.5. Другие возможности получения металла в конвертере.....	136
4.6. Выплавка других металлов.....	142
4.7. Другие процессы с пылегазовой взвесью в рекуператоре.....	146
4.8. Выводы к главе 4.....	149
ГЛАВА 5 (дополнительная). ТОЧНОЕ ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ И ЭЛЕМЕНТЫ ДРЕВНЕГО РЕМЕСЛА В МЕТАЛЛУРГИИ. ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ СЛОЖНОСТИ ВОПРОСА.....	150
5.1. Сведения из истории формирования металлургического цикла.....	150
5.2. Формирование доменной плавки.....	152
5.3. Формирование жесткоконсервативной идеологии, отторгающей любые изменения.....	153
5.4. Почему установилась плавка на коксовой насадке.....	157

5.5. Принцип «двухстадийный процесс наиболее эффективен».....	161
5.6. Принцип «доменный процесс незаменим!».....	163
5.7. Доменная идеология.....	166
5.8. Психологические сложности.....	167
5.9. Научные технологии и процессы древнего ремесла.	
Закономерности фундаментальные (точные) и нефундаментальные.....	170
5.10. Явления, не поддающиеся анализу методами точных наук.....	174
5.11. Революции в физике как ломки идеологии.....	177
5.12. Нефундаментальные явления сосредоточены в теории твердого тела.....	179
5.13. Квазикристаллические свойства жидкости и приемы улучшения металла.....	181
5.14. Термовременная обработка стали (ТВО).....	183
5.15. Различия в мышлении физхимика и доменщика.....	185
5.16. Особенности идеологических дискуссий.....	187
5.17. Формировании идеологии, ее устойчивость.....	188
5.18. Выводы к главе 5.....	192
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	193
ПРИЛОЖЕНИЕ	196
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	210

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данной работе основное внимание уделено возможностям совершенствования процесса в современных доменных печах.

Мы стремились возможно полнее обсудить положения этой работы с учеными – металлургами. Для нас очень полезны были беседы с академиком Ватолиным Н. А. и Смирновым Л. А., с профессорами Амдуром А. М., Апакашевым Р. А., Дмитриевым А. Н., Козиным В. З., Кравцом Б. Н., Окуновым А. И., Потаповым А. М., Пузановым В. П. и другими.

Обычно научно-технические вопросы излагаются строгим и «сухим» языком. В этой работе стиль изложения получился более эмоциональным, близким к стилю популярных или полемически – дискуссионных книг. Дело в том, что ряд разделов здесь излагаются по материалам прошедших дискуссий, часто очень оживленных, а также по материалам прочитанных лекций или докладов. В книге сохранены также элементы занимательного изложения, полезные в лекциях для студентов. Книга используется как учебное пособие.

К тому же потребовалось обсудить ломку устоявшейся доменной идеологии, психологические сложности такой ломки, которые не поддаются сухому изложению. Несообразности или пороки металлургического цикла в той или иной мере осознаются, но понять их вполне и устранить мешает устоявшаяся идеология. Вопросы научной идеологии обычно не затрагиваются в работах по металлургии; между тем здесь они очень важны, поэтому в книге им отведено сравнительно много места – последняя глава 5.

Мы были бы рады получить критические замечания или отзывы на эту книгу по адресу: E-mail: pavlov405@rambler.ru. Электронный вариант книги размещен в Интернете по адресу: www.pavlovvalery.ru.

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1.1. Причина несообразностей доменного процесса – древняя традиция совместной продувки кусков руды и топлива

...прошлое, отдаленнейшее, глубочайшее, суровейшее
прошлое веет на нас и вспучивается в нас.

Ф. Ницше

В работе рассмотрены «несообразности» или «врожденные пороки» современного металлургического цикла. Из-за них рядовая сталь оказывается, например, в 2-3 раза дороже, чем получилась бы в цикле без несообразностей. Основной способ получения металла [1-17] вместе с его пороками сформировался в древности, в донаучную эпоху, как процесс древнего ремесла. Стихийное развитие металлургии на протяжении многих веков шло под воздействием различных исторических случайностей. Анализ истории металлургии убеждает нас в том, что при другом стечении обстоятельств мы могли бы получить в наследство от прошлого совсем другую металлургию.

В настоящее время основная масса черного металла (больше 90 %), получается доменным процессом, то есть *совместной продувкой кусков* кокса и рудной компоненты – окатышей или агломерата. Подобная ситуация и в пирометаллургическом получении ряда цветных металлов, так как многие агрегаты цветной металлургии создавались по образцу домен.

Около (5-7) % процентов черного металла получают продувкой окатышей природным газом в шахтных агрегатах типа «Мидрекс», «Хилл-3» и др. В принципе, известно много других, «альтернативных» способов получения черного металла, основанных на иных принципах, и быстро появляются новые способы, однако, их суммарный вклад в производство металла незначителен. Нет способов, которые могли бы в ближайшем будущем составить конкуренцию домнам в получении основной массы металла. И. П. Бардин отмечал, что даже критик доменного процесса С. Смит вынужден был признать домну единственным агрегатом, на котором может базироваться современная металлургия.

Доменный процесс определяет общий вид современного металлургического цикла, является структурообразующим или системообразующим элементом всего цикла. В этой книге рассматривается цикл до выпуска стали, до ее разливки.

Обсуждаемые несообразности цикла в основном порождены несообразностями доменного процесса, а именно, тем, что получение металла практически всегда мыслили как совместную продувку кусков руды и топлива при избытке топлива. Традицию смешивания кусков руды и топли-

ва ввели еще древние металлурги. При смешивании куски реагентов оказываются ближе друг к другу и облегчается диффузия восстановительных газов от кусков топлива к кускам руды. Но теперь хорошо известно, что нужную скорость процесса можно обеспечить и без смешивания руды с топливом, так, как это делается в агрегатах Мидрекс, Корекс и других.

В домне совмещены реакции горения топлива и восстановления железа. Но для реакций восстановления требуется восстановительная атмосфера, а для полного сжигания топлива – окислительная. Если эти процессы разделить, можно создать лучшие условия для того и другого.

Ряд несообразностей, вызванных *смешиванием кусков* руды и топлива, можно устранить, если перейти *от совместной продувки* топлива и рудной компоненты *к последовательной или отдельной* продувке, когда восстановление металла, горение твердого топлива и окончательное дожигание газов идут в разных зонах печи.

Перечислим обсуждаемые «несообразности» или «врожденные пороки» доменного процесса; эти термины мы заимствуем из [15, с. 247].

1) В домне топливо удаётся сжечь в основном лишь по первой стадии, до CO, но не до CO₂. Поэтому печь получает от горения топлива в 2-3 раза меньше тепла, чем при полном горении. Если добиться полного горения, то расчетный расход топлива будет меньше в 2-3 раза.

2) Так как все твердые реагенты смешаны, то почти нет или мало возможностей повлиять на соотношение основных реакций в домне. Окислительно-восстановительный потенциал газов, полноту горения и содержание углерода в металле приходится принимать такими, «какие уж сами получатся» в этой смеси реагентов. Поэтому доменная плавка остается опасно-капризным, часто непонятным и плохо управляемым процессом древнего ремесла, который «отторгает» почти любые усовершенствования и остается качественно неизменным многие столетия. Перечисленные параметры плавки можно оперативно регулировать, если все топливо вводить с дутьем в виде угольной пыли и варьировать соотношение топлива и дутья.

3) Чтобы сохранять высокие показатели доменного процесса, приходится увеличивать работу подготовки сырья, применять хорошо окускованное сырье, использовать дорогие сорта топлива и руды. Если отладить получение металла из угольной пыли и порошка концентрата, то при прочих равных условиях чугун будет примерно вдвое дешевле.

4) Чтобы устранить «перебор» домны, переуглероживание металла, приходится выполнять сталеплавильный передел, который обычно дороже самого доменного процесса.

Цель книги – показать, что вполне реально устранение перечисленных «пороков», если преодолеть давление древней устоявшейся доменной идеологии. Цель данной главы 1 – анализ перечисленных несообразностей

металлургии и тех причин, по которым они сложились и сохраняются столетиями. Цель глав 2-4 – обсуждение способов устранения этих несообразностей. Иногда считают, что в подобных случаях важны лишь конкретные предлагаемые решения, а не обсуждение причин сложившихся пороков; можно не рассматривать те аргументы и те рассуждения, которые приводят к итоговым решениям. При таком подходе можно сразу переходить здесь к главам 2-4.

1.2. Порок № 1 – неполное сжигание топлива

Химики часто минимизируют энергозатраты с точностью до процента. У доменщиков больше половины энергии улетает в трубу, и никто об этом не вспоминает.

Из дискуссии

Пороком № 1 можно считать большие потери химической энергии топлива, неполное его сжигание в доменной печи. Газообразные продукты горения вплоть до колошника контактируют с коксом, горение всюду идет при избытке топлива, в восстановительной атмосфере, как в газогенераторе. Поэтому кокс удаётся сжечь в основном лишь до монооксида СО, но не до СО₂. Но теплота горения углерода по первой стадии, до СО, составляет лишь 110 кДж/моль, тогда как полное горение углерода до СО₂ дает 390 кДж/моль. Если углерод горит лишь до СО, лишь по первой стадии, то выделяется только 28 % полной теплоты горения до СО₂ ($110/390 = 0,28$). Еще меньше доля тепловыделения на первой стадии горения для углеводородной части топлива. Природный газ (СН₄) в присутствии углерода горит лишь до СО и Н₂, и выделяет на этой первой стадии горения лишь 4 % тепла полного горения. В целом доменная печь из-за неполного сжигания топлива получает в 2-3 раза меньше тепла, чем было бы при полном горении (подробнее см. приложение). Тепловой «коэффициент полезного действия» (КПД) домны составляет лишь 30-50 %. Больше половины энергии топлива в домне «улетает в трубу», в колошник, из-за неполного горения.

Далее, в доменной печи приходится применять дорогой кокс, а не уголь, из-за того, что здесь требуется организовать горение кусков топлива, смешанных с кусками рудной компоненты. Кокс в 2-6 раз дороже угля. Два отмеченных порока вместе делают тепло горения топлива в домне примерно в 10 раз дороже (так как $(2-3) \times (2-6) \approx 10$) по сравнению с паровым котлом, угольной топкой, рекуператором, то есть по сравнению с такими агрегатами, где, во-первых, топливо сгорает практически полностью, до СО₂, и, во-вторых, где используется сравнительно дешевый уголь, но не кокс. Еще дороже тепло в сталеплавильных агрегатах.

Тепло горения топлива в доменной печи оплачивается, грубо говоря, **в десятикратном размере**. Если бы топливо сжигалось отдельно от руды, в своей зоне, то физические свойства его были бы несущественны, и можно было бы вместо кокса применять кусковой уголь или угольную пыль. В зоне рудной компоненты отходящие газы можно дожигать полностью до CO_2 дополнительным дутьем. Тепло горения топлива при этом было бы **ординарным**, оплачивалось бы почти в однократном, а не в десятикратном размере.

Если, например, воздух поступает в доменную печь с температурой $1200\text{ }^\circ\text{C}$, газообразные продукты отходят в колошник при $200\text{ }^\circ\text{C}$, полученный металл выдается с температурой $1400\text{ }^\circ\text{C}$, то расчетный расход углерода получается равным 200 кг на тонну железа при горении до CO_2 и 600 кг/т при горении до CO (подробнее см. приложение, расчеты 1, 2). К этим значениям нужно добавить еще примерно 40 кг/т на науглероживание металла.

Расчетный расход углерода $600 + 40 = 640\text{ кг/т}$ при горении только до CO несколько больше обычного расхода топлива в домне. При обычном горении в домне на $\frac{1}{4}$ до CO_2 и на $\frac{3}{4}$ до CO по расчету получается расход $400 + 40 = 440\text{ кг/т}$. Это примерно равно или несколько меньше реальных показателей хороших печей вследствие того, что некоторые потери тепла не учитываются.

По данным [8, с. 242] о соотношении CO и CO_2 в колошниковых газах доля получаемого полного тепла горения α :

$$\alpha = (0,28 \cdot \% \text{CO} + \% \text{CO}_2) / (\% \text{CO} + \% \text{CO}_2),$$

которое дает печи горение углерода, получается от 36 до 57 %.

Тип чугуна	CO_2 [8], %	CO [8], %	Доля получаемого полного тепла горения α , %
Передельный	12-18	24-30	52-57
Литейный	8-14	28-32	44-50
Ферросплавы	4-8	31-35	36-41

Еще меньшую долю α возможного тепла дает печи горение углеводородной части топлива (подробнее см. приложение, расчеты 1-14).

В данной книге предлагается раздельная продувка топлива и окатышей: в частности, предлагается сверху загружать лишь окатыши, а все топливо вводить снизу за счет вдувания угольной пыли. В таком агрегате «Угольный Мидрекс» на второй части пути печные газы будут двигаться уже в слое одних лишь железорудных окатышей, без контакта с кусками топлива, и, следовательно, эти газы можно дожигать подачей дополнительного дутья. Гематитовые руды сами способны при достаточно высокой температуре окислять отходящие газы практически полностью до CO_2 ,

если они не смешаны с кусками топлива. Можно получить в 2-3 раза большую теплоту сгорания топлива, если дожигание газов вести в окислительной зоне, где нет топлива. Это можно сделать при отдельной продувке, когда реакции горения топлива и восстановления окислов железа разделены, идут в разных зонах и не мешают друг другу.

Даже в простейших бытовых печах можно регулировать коэффициент избытка или недостатка воздуха при горении, если изменять приток воздуха. В домне горение всегда идет при большом избытке горячего топлива, при недостатке воздуха, и поэтому идет лишь до СО. Если же все топливо вдувается снизу в виде угольной пыли, то можно варьировать соотношение вдуваемой пыли и дутья, варьировать коэффициент избытка или недостатка воздуха. Тем самым можно в широких пределах варьировать тепловыделение, корректировать температуру горна и при необходимости быстро купировать начинающиеся перегревы или переохлаждения горна. В агрегатах Мидрекс или Хилл-3 почти нет тех многочисленных расстройств хода печи, которые «держат в страхе» доменщиков. Очевидно, не будет этих расстройств и в предлагаемом агрегате «угольный Мидрекс».

Еще хуже ситуация в современных способах нагревания жидкого металла за счет горения топлива, в отоплении ванны с металлургическими расплавами. Здесь еще больше потери тепла, так как не только горение неполное, но еще и газы уходят очень горячими и уносят много тепла. При дутье кислородом из 28 % тепла горения до СО примерно 19 % теряется в виде физического тепла отходящих газов, а ванна получает лишь $28 - 19 = 9$ % полного тепла горения углерода (см. приложение). Практически сейчас не удастся эффективно нагревать жидкий металл за счет горения топлива. В электропечи жидкий металл нагревается за счет дорогой электроэнергии, в кислородном конвертере – за счет горения железа и легирующих примесей. Если металл получают из руды в ванне с расплавами, то расход топлива оказывается примерно ещё вдвое больше, чем в домне.

1.3. Теплотехника и термодинамика реакций

Теплотехникой занимается одна кафедра, термодинамикой горения другая, их взаимодействием не занимается никто.

Из дискуссии

Часто неправильно считают, что полнота горения газов в домне не существенна, так как полученные колошниковые газы удастся дожигать в других агрегатах, но при этом упускается из виду тот факт, что в домне теряется тепло, оплачиваемое **десятикратно**, а при дожигании газа приобретает **ординарное** тепло. Специалисты доменного процесса больше

внимания уделяют экономии не *химического*, а более понятного *физического тепла* газов; идет настойчивая борьба за каждые 10 °С повышения температуры дутья и понижения температуры отходящих газов. Температура дутья уже достигает 1200-1300 °С, планируется температура 1400 °С. С другой стороны, температура колошниковых газов понижается до 150-200 °С. Увеличивается приход тепла в горн с горячим дутьем и с горячей шихтой, нагретой отходящими газами. В этом отношении доменный процесс доведен до весьма высоких показателей. С горячим дутьем доменная печь часто получает больше тепла, чем от горения топлива (расчёт 1 приложения).

Однако потери химического тепла из-за неполного горения, которые часто остаются неосознанными, намного больше, чем достигаемая здесь экономия физического тепла газов. Теоретическая температура горения доменного (колошникового) газа имеет величину порядка тысячи градусов. Поэтому здесь, с одной стороны, тщательно отыскиваются возможности экономии физического тепла, соответствующего десяткам градусов температуры, а с другой стороны, теряется химическое тепло газов, соответствующее тысяче градусов, причем эти потери часто остаются неосознанными.

При кислородном дутье расчетная температура дожигания СО в кислороде (по реакции $2\text{CO} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$) составляет даже 3700 °С (приложение, расчет 6). С отходящими газами печь теряет намного больше химического тепла, чем получает за счет тщательной экономии физического тепла.

Доменная печь – хороший агрегат по *теплотехнике*, но плохой агрегат по *физхимии, по термодинамике* реакций горения. Еще древние металлурги поняли, что для экономии тепла нужно улучшать теплообмен шихты и газов в шахте печи, и начали увеличивать высоту шахты. Когда печи достигли высоты 4,5 м, температура поднялась настолько, что появился чугун. Создатели домен понимали теплотехнику, но они не могли учесть требования термодинамики реакций. Доменный процесс начал формироваться почти тысячу лет назад, когда не было не только термодинамики, но не было еще и химии. В принципе доменная плавка почти не изменилась качественно за всю свою историю.

Термодинамика металлургических реакций написана за последнее столетие по аналогии с соответствующими разделами химии и не успела еще существенно повлиять на древний консервативный доменный процесс; в принципе домны не изменились за это время. Еще предстоит адаптация доменной плавки соответственно требованиям физхимии, термодинамики. Цель этой книги состоит в том, чтобы продвинуться в этом направлении.

Исследовательские работы по металлургии четко распадаются на чисто теплотехнические и физико-химические, причем почти нет работ, в которых было бы обеспечено гармоничное сочетание, взаимопроникновение и взаимное дополнение теплотехники и термодинамики реакций. Так,

в теории теплообмена в домне, разработанной Б. И. Китаевым, в явном виде не представлено тепло реакций; это тепло неявно учитывается лишь тем, что вводится эффективная или кажущаяся теплоемкость шихты. В зоне реакций кажущейся теплоемкости шихты приписывается аномально большое значение, которое определяется эмпирически.

Поэтому огромные потери энергии из-за неполного горения топлива часто остаются не вполне осознанными. Далекое не полностью осознано многочисленные и важные следствия того простого факта, что на первой стадии горения углерода топлива до СО выделяется лишь 28 % тепла полного горения. Нам не встречалась в литературе четкая констатация того факта, что тепло горения в печи в 2-3 раза меньше тепла полного горения, и что это тепло примерно в 10 раз дороже, чем в паровом котле или в хорошей угольной топке. В других случаях такие потери понимают, но считают их неизбежными, поэтому предполагается, что обсуждение данных потерь тепла не имеет смысла.

В теории доменной плавки подобные вопросы обсуждаются в терминах соотношения прямого и косвенного восстановления. Весь углекислый газ CO_2 , выходящий из доменной печи (в процессе без карбонатов), является продуктом косвенного восстановления, получается за счет окисления СО окислами железа, а не кислорода дутья. В домне невозможно дожигание СО до CO_2 за счет кислорода дутья, поэтому в теории доменного процесса обычно нет и способов учета такого полного горения. Нет и учета возможной прибыли тепла, которую можно получить за счет дожигания отходящих газов в самой печи.

Хотя о преимуществах косвенного восстановления и о соответствующей экономии кокса написано очень много, давление идеологии и здесь не позволяет вполне осознать величину потерь. Вместо вывода о потерях большей части энергии топлива в рассуждениях доменщиков из тех же термодинамических данных получаются совсем другие выводы: «домна – один из самых совершенных агрегатов», «доменный процесс незаменим» и др. Подчеркиваются преимущества домны по сравнению с другими агрегатами. Эти теплотехнические преимущества домен реальны и действительно велики; тепло в конвертере, электропечи или мартеновской печи обходится еще намного дороже, чем в домне. Тем не менее, потери из-за обсуждаемого неполного горения топлива в домне также очень велики.

Отметим, что обсуждаемая несообразность № 1 еще яснее видна в случае более простых печей. Таковы, например, шахтные печи для обжига руды, сидерита, известняка, печи для плавки пиритных руд в рудный расплав (штейн) и др. При обжиге карбонатов расчетный расход топлива при неполном горении может оказаться не в 2-3, а уже в 9 раз больше, чем при полном горении (приложение, расчет 8), так как углерод тратится еще и на восстановление до СО углекислоты CO_2 , выделяемой карбонатом.

Такие шахтные печи, отопливаемые коксом, созданы по образцу домны и унаследовали ее пороки. Аналогично работают многие шахтные печи цветной металлургии. Печь загружается, например, смесью кусков руды и кокса и отопливается, как и домна, неполным сжиганием кокса. Как и домны, эти печи можно отопливать в 10 раз дешевле полным сжиганием угля. Можно сжигать уголь в топке, а горячие продукты горения вдуть в отопливаемую печь, можно сжигать угольную пыль в факелах дутья, и др. Факелы с угольной пылью при недостатке воздуха эквивалентны газогенератору, а при избытке воздуха они эквивалентны угольной топке.

В обычном варианте обжиговой печи обсуждаемый порок выглядит уже прямо-таки *грубой несообразностью*, которая бросается в глаза при *незамыленном взгляде со стороны*. Тем не менее, в условиях господства доменной идеологии мы не замечаем эту несообразность, пока мыслим как металлургии. Этот порок столетиями остается не только не исправленным, а обычно и неосознанным.

1.4. Методика оценки теплового баланса плавки

Доменный процесс настолько опасно-капризный и неуправляемый, что о существенном совершенствовании просто подумать страшно, да и некогда.

Из дискуссии

Как отмечено выше, важнейшие преимущества доменных печей перед многими альтернативными процессами – это теплотехнические преимущества, сравнительно хороший тепловой баланс. В домне хорошо усваивается тепло отходящих газов, поступает много тепла с горячим дутьем. Так как печь большая и процесс интенсивный, то относительно невелики потери тепла через стенки агрегата. Расход топлива на тонну металла в альтернативных процессах обычно намного больше, чем в домне.

Вообще, для каждого нового способа получения металла часто решающим условием успеха являются теплотехнические преимущества, обилие недорогого тепла в агрегате. Многие предлагавшиеся процессы были с самого начала обречены на неудачу из-за недостатка тепла. В дискуссиях характерное возражение против многих новых процессов состоит в том, что там *тепла не хватает*. Если предлагаемый новый металлургический процесс не содержит явно неудачных конструктивных решений, не ведет к чрезмерным техническим сложностям и к явно нетехнологичным или слишком медленным процессам, то обычно решающим условием успеха является именно хороший тепловой баланс. Это несколько снижает значение физико-химического анализа отдельных металлургических реакций, который изучают в курсе теории металлургических процессов. Если обеспечен нуж-

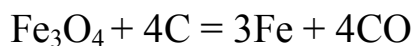
ный нагрев материалов, то реакции обычно успевают пройти. Поэтому теория металлургических процессов не очень популярна у металлургов-практиков. Но для обеспечения эффективного сжигания топлива также нужна термодинамика и физхимия реакций, особенно реакций горения.

Если нужно быстро сравнить много схем получения металла и требуется оценить их сравнительную эффективность, то очень важно иметь способ быстрой оценки теплового баланса и расчетного расхода топлива. Существующие расчеты теплового баланса предназначены для детального скрупулезного анализа существующих агрегатов, когда важно как-то оценить по возможности все, даже малые слагаемые теплового баланса. Имеющиеся расчеты содержат много слагаемых, включают много дискуссионных допущений, и поэтому неудобны для быстрых приближенных оценок. При расчете баланса по известным компьютерным программам остается неясной физика расчетов; мы видим лишь «черный ящик», преобразующий один поток данных в другой.

Если наша задача – лишь оценка расчетного расхода топлива в планируемом новом процессе, то удобно брать только основные статьи баланса тепла, известные точно, а именно теплоты основных реакций и теплоты нагрева-охлаждения реагентов. В первом приближении реагирующие вещества можно считать чистыми. При обычном расчете теплоты нагрева много времени отнимает сбор данных по теплоемкостям веществ и интегрирование уравнений для теплоемкостей. Мы принимали теплоемкости реагентов C постоянными и равными на грамм-атом $C = 3R = 24,93$ Дж на градус в соответствии с теорией Эйнштейна-Дебая и правилом Дюлонга-Пти (R – газовая постоянная). В этом случае расход топлива или теоретическая температура горения рассчитываются быстро, «в одно действие», (подробнее см. приложение).

Так, расчетный расход углерода в доменной плавке получается 610 кг/т при горении только до CO , 240 кг/т при горении топлива полностью до CO_2 и 440 кг/т при реальном горении в домне на 25 % до CO_2 и на 75 % до CO . Последнее значение 440 кг/т примерно равно или несколько меньше реального расхода кокса в хороших плавках.

Минимально возможный расчетный расход углерода в печи (при полном горении газов до CO_2) составляет около 200 кг/т металла, если металл не науглероживается и на это не расходуется примерно 40 кг углерода на тонну металла. Около 85 кг/т углерода или «условного топлива» нужно еще на отопление рекуператоров, которые практически отапливаются обычно в основном доменным газом. По стехиометрическому соотношению реакции



на тонну металла также требуется 285 кг углерода. Дожигание полученных газов металлизации (СО) при полном усвоении тепла может покрыть все потребности процесса в энергии. К этим показателям можно приблизиться при металлизации пылегазовой взвеси в рекуператоре, а также в агрегате «Угольный Мидрекс».

Приведенное значение 285 кг/т можно рассматривать как минимально возможный расход «условного топлива» на выплавку тонны металла в любом процессе, или как предел, к которому можно приближаться, если обеспечивать все более полное сжигание топлива с усвоением тепла и понижать дополнительные не учитываемые здесь потери.

Хотя такие расчеты очень приблизительны, полученные цифры могут все же служить определенным ориентиром, особенно в том случае, когда обсуждается не абсолютная величина расхода топлива, а относительная эффективность разных схем процесса.

Здесь чистый углерод предстает как условное топливо; его теплотворная способность или калорийность (7800 ккал/кг или 31500 кДж/кг) соответствуют калорийности хорошего угля, но значительно ниже калорийности углеводородов, нефти (45000 кДж/кг) или газа. Некоторые сорта кокса или угля более калорийны, чем чистый углерод, из-за присутствия углеводородов. Другие угли менее калорийны из-за содержания золы.

В приведенный расчет теплового баланса плавки можно добавить, например, сопутствующее разложение известняка, заданный выход шлака определенной температуры, потери тепла через стенки агрегата и др.; от таких добавок вычисления не становятся намного более сложными, а результаты расчетов обычно качественно не изменяются. Этот способ оценки теплового баланса пригоден также и для составления зональных балансов тепла для каждой из зон печи в отдельности.

1.5. Усвоение в агрегате химической и физической энергии газов – важнейшее условие его эффективности

Все волнуются за расход кокса, никто не волнуется за расход топлива в рекуператоре.

Из дискуссии

Для улучшения теплового баланса решающей оказывается **утилизация, усвоение в агрегате химического тепла отходящих газов**, то есть возможность их полного сжигания в печи до CO_2 и H_2O с усвоением тепла. Главная задача – обеспечить полное горение топлива и усвоить полученное тепло в печи, обеспечить высокий тепловой КПД агрегата. При этом экономится дорогое, **десятикратно оплачиваемое высокотемпературное** тепло агрегата. Усвоение в печи физического тепла газов также важно,

но обычно не в такой степени, как утилизация химического тепла. Химическое тепло, то есть тепло реакций, обычно больше физического тепла нагрева материалов. Если обеспечить полное сжигание топлива до CO_2 , то даже при потере всего физического тепла расчетный расход топлива будет лишь 350 кг/т. Хотя газы в этом случае покидают агрегат горячими, с температурой расплавов, например, 1500°C , и уносят много тепла, расход топлива получается небольшим. Утилизация энергии газов вне печи (например, дожигание их в рекуператоре или в котле-утилизаторе) дает лишь *ординарное* тепло; котел-утилизатор мало улучшает показатели процесса.

И для обеспечения теплом сталеплавильных агрегатов или печей Ванюкова, для топливных горелок в электропечи, для агрегатов типа «Ромелт» или «Циклон», «Корекс» и других, важнейшей остается то же усвоение в печи энергии газов, особенно доля полного горения, $\% \text{CO}_2$.

Отметим, что при температуре 2300°C угольная пыль способна восстанавливать в расплаве из окислов любой из 70 известных металлов Периодической системы. Расчетная температура полного горения углерода в кислороде составляет 5200°C (см. приложение, расчет 6). Поэтому в принципе возможно восстановление всех металлов горной породы или получение из окислов любого металла дешевым углетермическим способом, если достигается полное горение углерода.

Утилизация в агрегате энергии отходящих газов не только важнейший фактор эффективности агрегата, но и главная трудность организации процесса. Сравнительно нетрудно сделать процесс совсем без утилизации энергии газов, когда весь углерод горит лишь до CO , дожигание газов полностью отсутствует, и эти газы уходят с температурой расплавов, например, 1500°C . Если мы соглашаемся с тем, что химическое и физическое тепло газов полностью теряются для реакций в печи, то появляется много возможностей организации процесса.

Можно, например, просто всыпать или вдуть в ванну с жидким металлом топливо и рудный материал, а для обеспечения ванны теплом вести продувку кислородом, окисляя металл. Углерод топлива и кислород дутья могут растворяться в металле, и получится горение топлива в виде кипения ванны с выделением CO .

Такой же результат получается, если мы греем ванну топливным факелом, который плотно контактирует с расплавами, и его газы доходят до равновесия с углеродистым металлом. Отходящие газы практически полностью будут состоять из CO и уйдут с температурой ванны (1500°C).

Можно также создать поток газа, факел, в котором горит угольная пыль в кислороде до CO , концентрат восстанавливается этими газами, как в агрегате «Циклон», затем еще плавится и в виде капелек металла вдвигается в ванну с расплавами.

Возможны другие подобные процессы. Во всех таких случаях отходящие газы в виде СО покидают ванну с температурой этой ванны, например, 1500 °С, и уносят много физического тепла и, главное, уносят химическое тепло. Для всех таких процессов без утилизации энергии газов расчетный расход углерода и кислорода на получение металла получается очень большим, соответственно 2700 кг/т и 2240 нм³/т (расчеты 3-6 приложения).

Так как есть еще неучтенные потери тепла, то получается вывод: практически процесс вообще неосуществим, если полностью отсутствует утилизация химической энергии отходящих газов, если все горение неполное, до СО. Расчетный расход металлургического топлива в процессе без утилизации энергии газов (2700 кг/т) получается примерно на порядок величины больше, чем при полной утилизации (200 кг/т). В процессе без утилизации примерно лишь 1/10 энергии топлива идет на получение металла или на нагрев ванны, и 9/10 уходит из агрегата в виде химической и физической энергии газов (подробнее см. приложение). Можно сказать, что тепловой коэффициент полезного действия (КПД) процессов без утилизации составляет примерно 1/10. Отметим, что КПД таких процессов можно увеличить почти втрое, если газы СО дожигать примерно на 25 % до СО₂, и, соответственно, вести плавку не на чугун, а на малоуглеродистое железо (подробнее см. ниже).

Примерно так, без утилизации энергии газов, с теплотехнической эффективностью 1/10, работает горн доменной печи, из которого газы уходят с температурой расплавов и практически не содержат СО₂. Утилизация энергии газов идет в шахте; здесь усваивается примерно 1/4 химической энергии газов и основная часть их физического тепла. Теплотехнический КПД домны в целом составляет обычно (30-50) %. Если заполнить шихтой лишь горн, а шахту домны оставить пустой, то и в домне получится процесс без утилизации энергии газов. При работе на кислороде расчетный расход топлива в таком теоретическом процессе также составит примерно 2700 кг/т, как и в других примерах, приведенных выше. Примерно такой же расчетный расход топлива получается и при работе на горячем доменном дутье с температурой примерно 1200 °С.

Агрегат, полностью сжигающий топливо, будет иметь примерно в 10 раз меньший расход топлива и в 10 раз большую производительность при той же интенсивности дутья, по сравнению с агрегатом без утилизации энергии газов.

В ряде изобретений (например, [11]) предлагается обойтись без утилизации энергии отходящих газов в самом металлургическом агрегате, предлагается утилизировать энергию этих газов, например, в паровом котле электростанции. Но газы, исходящие из ванны с расплавами, настолько горячие, и несут так много твердых и жидких частиц, что они опасны для обычных паровых котлов. Возникают очень большие техниче-

ские сложности. Кроме того, электростанцию пришлось бы отапливать не дешевым *энергетическим*, а дорогим *металлургическим* топливом. При этом часто остается неосознанным тот факт, что расход топлива в таком металлургическом агрегате без утилизации будет раз в десять больше оптимального, например, 2700 кг/т. В этом смысле тепло, идущее на металлургический процесс, будет оплачено десятикратно уже и при использовании угольной пыли, уже и при недорогом топливе. По тепловому балансу такая печь будет лишь на 1/10 металлургическим агрегатом, и на 9/10 – газогенератором, который производит очень неэкономичный и дорогой генераторный газ, весьма неудобный для внешних потребителей.

Доменная печь также превращает большую часть энергии дорогого кокса в энергию низкокалорийного и неудобного в использовании доменного газа, и по энергетическому балансу она больше работает не как металлургический агрегат, но как несовершенный газогенератор. Лишь примерно 20 % энергии полученного доменного газа удастся вернуть в печь через рекуператоры в виде тепла горячего дутья.

При этом интенсивность продувки обычно определяется газопроницаемостью агрегата и остается примерно постоянной, поэтому увеличение удельного расхода топлива одновременно означает еще и уменьшение производительности агрегата. При слишком большом удельном расходе топлива процесс получается не только неэкономичным, но еще и очень медленным, и это уже окончательно делает его практически непригодным. К тому же при медленном процессе велики потери тепла теплопроводностью через стенки агрегата.

1.6. Возможности полного горения газов на разных стадиях восстановления железа

Да, тут явно виноват так называемый человеческий фактор. Как при многих авиакатастрофах.

С. А. Красиков

Чтобы обеспечить хорошую теплопередачу от газов к шихте или к расплавам, нужно, чтобы газы дутья приближались к тепловому равновесию с шихтой или с расплавами. При этом фазы приблизятся также и к химическому равновесию. Поэтому долю полного горения (%CO₂ в газах) можно определить по известной диаграмме равновесия рис. 1.1.

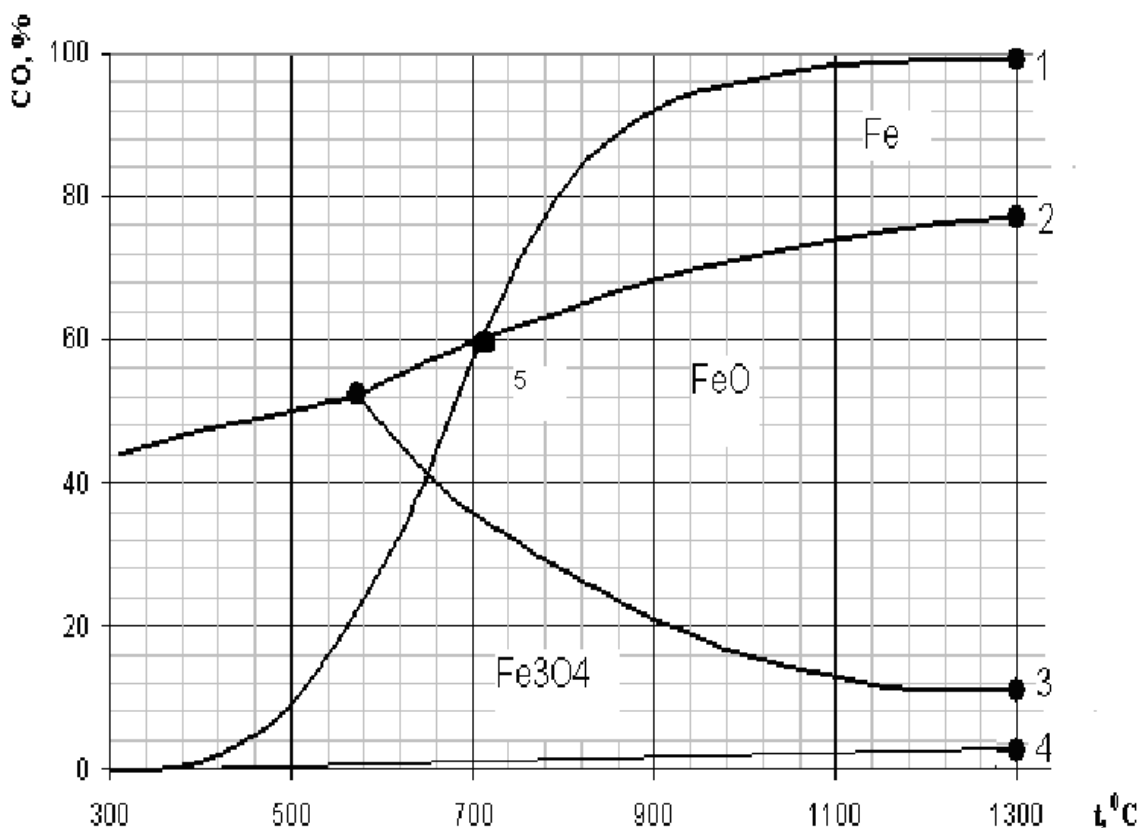


Рис. 1.1. Диаграмма равновесия основных металлургических реакций:
 1 – газификация углерода при 1300 °С; 2 – восстановление FeO до Fe; 3 – Fe₃O₄ до FeO;
 4 – восстановление Fe₂O₃ до Fe₃O₄ при 1300 °С. Точка пересечения линии реакций
 газификации и металлизации при 720 °С – «температура Мидрекс»

Если газы топливного факела доходят до равновесия с углеродистым топливом или с высокоуглеродистым металлом, то доля полного горения (%CO₂) почти нулевая, при металлургических температурах газы содержат порядка 1 % CO₂ и на 99 % состоят из CO (точка 1 рис. 1.1). Если газы факела горения содержат меньше 1 % CO₂, то возможно выделение сажи-стого углерода из газа и плавление металла на чугун.

Если идет реакция $FeO + CO = Fe + CO_2$, газы равновесны с железом Fe и вюститом FeO (с системой Fe/FeO), то доля полного горения (доля CO₂) составляет 25 % при содержании CO 75 % в сумме этих газов (точка 2). При содержании CO₂ в интервале (1-25) % смесь газов является окислительной по отношению к чистому углероду, но восстановительной по отношению к железу. Факелом с полным горением до 25 % можно плавить массу металлизированных окатышей на малоуглеродистое железо без окисления металла.

При равновесии газов факела с системой (FeO/Fe₃O₄) доля полного горения достигает уже около 90 % (рис. 1.1, точка 3), а в присутствии лишь высших окислов Fe₃O₄ и Fe₂O₃ – почти 100 % (точка 4). Такое почти полное горение можно получить, если факел контактирует лишь с окислами, с твердыми рудными материалами, или со шлаком.

При этом, как обычно, в зависимости от концентрации кислорода в твердом веществе равновесная степень окисления газов (%CO₂) изменяется скачками или «ступеньками» (0, 25, 90, 100 %). Но если реагируют не чистые твердые окислы, а эти же окислы в виде компонентов шлакового раствора, то отмеченные ступеньки размываются, сглаживаются, заменяются плавными переходными кривыми за счет концентрационных слагаемых вида $RT \ln C$ при изменяющихся концентрациях C окислов.

Доля α (%) полного тепла горения углерода, которое получает печь, приведена в табл. 1.1. При этом

$$\alpha = 0,28 \cdot \% \text{CO} + \% \text{CO}_2$$

Считали, что углерод (угольная пыль), горит в кислороде, газы горения приходят в равновесие с нагреваемыми фазами и покидают агрегат с температурой 1500 °С.

В таблице приведены также расчетные значения расхода топлива на получение металла и на сталеплавильный процесс. При этом считали, что расход тепла в сталеплавильном процессе равен теплоте нагревания железа до 1600 °С плюс теплоте его плавления. «Сталеплавильный процесс» здесь состоит в том, что металл нагревается до 1600 °С и плавится.

Из таблицы видно, что расход топлива изменяется примерно в 10 раз в зависимости от того, в какой среде работает факел, обогревающий агрегат. В окислительной среде, при равновесии факела с высшими окислами железа, возможно полное горение на 100 % до CO₂ и эффективное отопление. В восстановительной среде, при равновесии топливного факела с чугуном или сталью, возможно только неполное горение до CO, усвоение лишь 9 % полного тепла горения. Если не будет утилизации энергии газов на последующих стадиях процесса, то расход топлива окажется примерно в 10 раз больше, чем при полном горении с усвоением тепла.

Таблица 1.1

Расчетный расход топлива на получение металла и на сталеплавильный процесс при горении на разных стадиях восстановления

Нагреваемый материал	% CO ₂	α , %	Расчетный расход топлива, кг/т	
			Получение металла	Сталеплавильный процесс
Чугун, сталь, топливо	0	9	2700	350
Малоуглеродистое железо, система Fe/FeO	25	26	1100	140
Окислы FeO/Fe ₃ O ₄	90	63	460	70
Высшие окислы Fe ₃ O ₄ / Fe ₂ O ₃	100	72	370	50
То же, но почти без потерь физического тепла (рекуператор)	100	~100	285	35

Если в верхней части шахты печи будут лишь не восстановленные, недавно загруженные окатыши, то в такой среде возможно полное дожигание газов и усвоение всего возможного тепла. Так предлагается добиваться полного горения в схеме Угольный Мидрекс (глава 3).

Если топливный факел в сталеплавильном процессе греет шлак, но «не пробивает» слой шлака, не контактирует с металлом, то в таком факеле возможно горение, по крайней мере, до 90 % CO_2 соответственно равновесию $\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ в шлаке. Так предлагается добиваться более полного теплового КПД при прогревании ванны с металлургическими расплавами. Правда, для передачи тепла из зоны горения в другие части ванны требуется организовать хорошее перемешивание расплавов.

В целом можно получить полное сжигание топлива с усвоением тепла в окислительной зоне агрегата, почти 100 %-ный тепловой КПД, при контакте дутья с высшими окислами железа, которым окисляться «дальше некуда». Получится хороший тепловой баланс. Но если горение идет в восстановительной зоне, дутье греет углеродистый металл или топливо, то придется примириться с неполным горением почти на 100 % до CO . Получится плохой тепловой баланс без утилизации химического тепла. Целесообразно разделять в агрегате восстановительную и окислительную зоны и вести горение топлива (или дожигание газов) в зоне с окислительным потенциалом.

В домне хорошо утилизируется физическое тепло отходящих газов, но основное их химическое тепло усваивается в печи, к сожалению, примерно лишь на $\frac{1}{4}$. В колошниковых газах соотношение ($\% \text{CO}_2 / \% \text{CO}$) обычно имеет величину около 1:3. В целом печь получает от трети до половины полного тепла горения. Но использование топлива в домне оказывается все же значительно лучше, чем в других современных агрегатах. Если в шахте печи оставить только окатыши, то там можно создать окислительную зону, где можно дожигать отходящие газы полностью до 100 % CO_2 .

Если дутьем служит не кислород, а горячий воздух, то объем газов дутья будет в 4,76 раз больше; воздух содержит 21 % кислорода, 79 % азота и его можно записать формулой ($\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2$). Если температура факела горения и нагреваемых материалов равна T_r , то в нашей схеме расчета на нагревание кислорода от 0°C до T_r потребуется $3RT_r \cdot N$ тепла, а на нагревание воздуха – $3R(T_r - T_d) \cdot N \cdot 4,76$ тепла, T_d – температура дутья (воздуха), N – число молей кислорода. Нагреваемые материалы получают одинаковое количество тепла от горения топлива в кислороде и в воздухе, если

$$3RT_r \cdot N = 3R(T_r - T_d) \cdot N \cdot 4,76.$$

При температуре дутья $T_d = 1200$ °С и температуре горения $T_r = 1520$ °С получается равный расход тепла на нагревание кислорода и воздуха и, соответственно, одинаковое поступление тепла в печь от горения топлива в кислороде и в горячем воздухе. При температуре горения T_r выше 1520 °С больше тепла даст горение в кислороде, при более низких температурах T_r больше тепла получится при горении в доменном дутье с температурой 1200 °С. Нередко горение в кислороде почти эквивалентно горению в доменном дутье по тепловыделению.

Таблицу, подобную 1.1, можно составить и для отопления агрегатов, например, мазутом или природным газом. Если мы пытаемся прогреть углеродистый металл равновесным факелом природного газа с кислородом, то получается «отрицательное отопление», охлаждение материалов вместо нагрева, так как теплота горения газа на первой стадии мала. Таким факелом невозможно расплавить «чушки» чугуна, не окисляя их. В восстановительной среде отопление газом еще менее эффективно по сравнению с отоплением угольной пылью. Вдувание природного газа в домну приводит к охлаждению горна печи.

Таким образом, можно устранить несообразность № 1, получить достаточно полное горение топлива, если дожигать газы в окислительной зоне печи. В шахтной печи можно дожигать газы в зоне не восстановленных окатышей, в ванне с расплавами – на границе факела с окисленным шлаком.

Если металлизация идет в рекуператоре, в пылегазовой взвеси концентрата и угольной пыли, то потребуется в рекуператоре дожигать весь объем отходящих газов.

1.7. Плавка на железу

Но разве могут такие очевидные вещи оставаться неосознанными?!

А. М. Потанов

В пылегазовых реакциях и в факельной плавке можно быстро варьировать соотношение топлива и дутья. Это соотношение можно регулировать и в предлагаемом процессе «угольный Мидрекс», когда сверху загружаются лишь окатыши, все топливо (угольная пыль) вдувается с дутьем. Такое регулирование невозможно в домне, где всюду избыток топлива. В более управляемом процессе с угольной пылью можно изменять коэффициент избытка или недостатка воздуха и, соответственно, полноту горения. Если пыль дается с избытком к дутью, горение почти полностью (на 99 %) идет до СО, лишь на 1 % до СО₂ (точка 1 рис. 1.1). В равновесии с таким факелом горения металлизированные окатыши расплавятся на чугун.

Если от недостатка дутья перейти к его избытку и повышать в газах %СО₂ в интервале (1-25) %, то равновесное содержание углерода в жид-

ком металле понижается примерно пропорционально отношению ($\%CO / \%CO_2$). Около 1 % CO_2 получится чугу́н, при 25 % CO_2 равновесное содержание углерода в жидком металле снизится примерно до 0,1 % и дальше станет возможным уже окисление железа до FeO . Теоретически можно сразу получать нужное конечное содержание углерода в металле, варьируя полноту горения в факеле и $\%CO_2$ за счет изменения коэффициента избытка воздуха или кислорода. Практически проще и удобнее получать при плавке заниженное содержание углерода, а затем доводить его до нужной величины соответствующими добавками.

Преимущество плавления такой газовой смесью состоит еще и в том, что при горении на 25 % до CO_2 выделяется уже не 28 % полного тепла, как при горении до CO , но 46 % полного тепла горения. За вычетом потерь физического тепла с отходящими газами нагреваемые материалы получают не 9 %, а 26 % тепла полного горения (см. табл. 1.1, подробнее см. приложение). Если сжигать топливо на 25 % до CO_2 , то можно тем же количеством углерода топлива расплавить в три раза большее количество металла. Теплотехнический КПД плавления возрастает почти втрое; на плавление и прогревание металла до $1600\text{ }^{\circ}C$ потребуется уже не 120, а 45 кг топлива на тонну. Такие возможности в настоящее время часто остаются неосознанными, как и другие возможности, связанные с более полным сжиганием топлива, с дожиганием газов.

Отметим, что в нагревательной печи таким факелом, содержащим несколько меньше 25 % CO_2 , можно нагревать заготовки или металлоизделия без окисления металла, без образования окалины. Подобный восстановительный факел неполного горения может достаточно эффективно нагревать металл. Сейчас такой нагрев без окисления выполняется обычно лишь в электропечи, в контролируемой восстановительной атмосфере, что значительно дороже. При обычной работе нагревательной печи на металле растёт слой окалины; можно сказать, что факел организует себе окислительную зону, в которой возможно полное горение топлива, правда, ценой больших потерь металла (как и в конвертере).

При воздушном дутье расчетная теоретическая температура горения возрастает почти на $200\text{ }^{\circ}C$, а при кислородном – на $750\text{ }^{\circ}C$, если перейти от горения лишь до CO на горение до 25 % CO_2 .

В домне возникают такие ситуации, когда есть возможность увеличивать восстановление металла, но ограничены возможности плавления и перегрева расплавов до нужных температур. Не хватает наиболее высокотемпературного тепла, шлак получается слишком вязким, становится трудно выпустить его из печи.

Вообще плавление является трудной стадией получения жидкого металла, так как при современном плавлении на чугу́н углерод топлива сжигается в этой зоне очень неэффективно, материалы получают лишь 9 % всего

полного тепла, КПД = 9 %. Еще менее эффективно горение углеводородной части топлива, а равновесный с чугуном факел природного газа и кислорода вообще дает «отрицательное отопление». Поэтому во многих альтернативных, не доменных способах производства металла, полученную металлизированную массу не пытаются тут же расплавить, а оставляют твердой и охлаждают. Плавление часто перекладывается на дорогой дополнительный передел, обычно на электропечи.

Если топливо вводится в виде угольной пыли, то возможности регулирования процесса намного больше; можно изменять соотношение тепла, идущего, с одной стороны, на восстановление, и, с другой стороны, на плавление и нагревание металла. Когда возникает аварийное переохлаждение горна и трудности с плавлением, то на некоторое время можно перейти к сжиганию топлива не только на 25 %, но даже и на 100 % до CO_2 . В этом случае тепловыделение в горне и его КПД возрастет уже почти на порядок величины по сравнению с современным горением до CO , и горн получит уже не 9 %, а до 72 % полного тепла горения (см. табл. 1.1). Остальные 28 % теряются для горна в виде физического тепла отходящих горячих газов. Конечно, в стационарном режиме процесса в печи должны быть сбалансированы восстановление и плавление. Требуется соблюсти также баланс тепла в каждой зоне печи; подробнее эти вопросы обсуждаются в главе 3.

При неблагоприятных условиях плавление на безуглеродистое железо может привести к повышенным потерям железа со шлаком. Некоторые зоны факела при горении на 25 % до CO_2 будут окислительными. Желательны такие конструкции, в которых окислительные зоны меньше контактировали бы с плавящимся металлом. Но окислительными являются и некоторые зоны факелов домны. В целом или в среднем по отношению к железу факел плавления будет восстановительным.

В агрегатах Мидрекс степень восстановления окатышей составляет примерно 95 % около 750°C . Если такие окатыши получить в схеме Угольный Мидрекс и расплавить их без изменения состава, то с окислами шлака будет потеряно примерно 5 % железа. Но в предлагаемых схемах восстановление идет не до 750°C , но вплоть до плавления, поэтому степень восстановления будет, очевидно, больше, а потери железа – меньше.

Растворимость кислорода в жидком железе составляет 0,16 % при равновесии с чистой закисью FeO . Если плавящееся железо приблизится к равновесию со шлаком плавления, то оно будет содержать несколько сотых процента кислорода. Добавка углерода, соответствующая составу стали, снизит концентрацию кислорода до нескольких тысячных процента; произойдет «раскисление металла углеродом». В равновесии с 1 % углерода в жидкой стали содержится около 0,003 % кислорода. Если желательно от «кипящей» стали перейти к спокойной, то после углерода можно дать более сильные раскислители, такие как алюминий или кремний.

В целом потери железа со шлаком в предлагаемых схемах будут, видимо, несколько больше, чем теряется сейчас с доменным шлаком, но меньше потерь со сталеплавильными шлаками, которые получаются при продувке металла кислородом.

Таким образом, перспективно плавление при частичном горении топлива до CO_2 , и, соответственно, получение первичного металла в виде железа или малоуглеродистой стали. Такой металл просто превращается в сталь нужного состава небольшой добавкой углерода, порядка 10 кг/т (1 %) для среднеуглеродистой стали. Добавку углерода можно выполнить в выносном горне-отстойнике печи, или даже в ковше. Сейчас в ковше нередко добавляют в сталь как углерод, так и легирующие примеси. Разрабатываются новые способы введения таких примесей, например, в виде проволоки. В выносном горне-отстойнике печи также можно установить устройство для вдвухвания в металл углеродистых порошков. Такими устройствами сейчас оснащены многие электропечи. Целый сталеплавильный передел можно заменить небольшой добавкой углерода.

Отметим, что *понижение* концентрации углерода в металле, его выжигание, осуществляется трудной и медленной химической реакцией, которая часто идет через кипение ванны. Чтобы превратить чугуны в малоуглеродистую сталь, требуется выжечь примерно 4 % углерода, для чего нужен целый дорогой сталеплавильный передел. В то же время *повышение* содержания углерода выполняется намного легче путем простого растворения в металле небольшого количества углеродистых материалов. Такую добавку коксика сейчас нередко дают в ковш перед выпуском металла, если на выпуске из электропечи в стали обнаруживается недостаток углерода.

В печи сгорает много топлива в смеси с металлом, поэтому возможны большие колебания конечного содержания углерода в металле, и трудно сразу «попасть в анализ». В первичном расплаве лучше получать какое-то заниженное или даже предельно малое содержание углерода, так как это значение четко определено. Сейчас обычно получают предельное насыщение металла углеродом, получают чугуны с определенной предельной концентрацией углерода – около 4,3 %. Но в ряде случаев эффективнее работать у противоположного предела, получать малоуглеродистое железо, в котором концентрация углерода также достаточно четко определена.

1.8. Порок № 2 – опасно-капризный, неустойчивый ход доменного процесса, плохая управляемость

Ну, это все философия....

А. М. Амдур

Домна склонна к непредсказуемым и опасным расстройствам режима плавки. Доменный процесс является довольно непонятным, капризным и плохо управляемым, как и многие другие процессы древнего ремесла. Говорят, что о расстройстве хода плавки у двух доменщиков всегда три мнения, потому что третье мнение имеет домна.

Сход шихты в домне определяется силами трения пересыпающихся, слипающихся, спекающихся кусков друг с другом, а также силами их трения о стенки агрегата. Теория устойчивости движения утверждает, что в подобных системах движение оказывается принципиально неустойчивым. Даже если в начальный момент движение было равномерным, то затем оно переходит в скачки. Известен демонстрационный эксперимент, когда по столу стараются равномерно двигать за резинку какой-то груз; этот груз движется скачками, то останавливается, то срывается и совершает скачок, догоняя натянувшуюся резинку. Тем более неустойчиво движение спекающихся кусков, которые могут довольно прочно припекаться друг к другу на стадии неподвижности. Чтобы отразить подобное спекание в движении груза на столе, можно добавить еще некоторое прилипание груза к столу на стадиях неподвижности; это усиливает неустойчивость движения, увеличивает скачки.

Когда начинается спекание (или слипание), пересыпание окатышей в данном объеме прекращается, масса окатышей «схватывается», какое-то время остается неизменной, «затвердевшей», затем разрушается под действием нарастающих внешних сил. Поэтому вполне естественно, что движение шихты в домне неустойчиво, в основном состоит из непредсказуемых **подвисаний и осадок, обрушений** разного масштаба по объему и по времени. Ровный сход шихты означает обычно, что подвисания и обрушения мелкие и частые, так что для общего движения они незаметны. Иногда вся плавка идет как последовательность искусственных **осадок** шихты за счет варьирования давления дутья.

Значительное обрушение шихты может резко изменить газодинамику какого-то участка; перекрываются некоторые старые каналы течения газов и открываются новые. Обрушение большого масштаба может резко изменить газопроницаемость всей печи в целом и весь режим процесса. Если в расплавы горна сразу поступает большая масса недовосстановленных и не вполне прогретых окатышей, может наступить опасное охлаждение горна. Резко ускоряется восстановление и плавление с поглощением тепла, может наступить опасное похолодание горна, осложненное загустеванием и вспенивани-

ем шлака, и др. Затрудняется спуск шлака, с ним сходит также много коксовой мелочи, недогоревших остатков кокса.

При этом доменщик часто не может быстро повлиять на соотношение горения и восстановления-плавления, на соотношение выделения и поглощения тепла в горне. Возможности изменять тепловыделение через температуру и влажность дутья обычно невелики и быстро заканчиваются. При перегреве или похолодании горна рекомендуется изменять долю окатышей и кокса в завалке. Часто это почти единственная возможность существенно повлиять на температуру горна. Но загруженные сверху материалы дойдут до горна лишь через 6-20 часов, и в течение этого времени повлиять на температуру горна практически невозможно.

Подобные опасные капризы печи вынуждают доменщиков тщательно придерживаться проверенных, отлаженных, сравнительно безопасных режимов продувки и вырабатывают у них жесткий консерватизм, инстинктивное недоверие к любым новшествам.

Говорят, что доменный процесс защищен именно своей капризностью и плохой управляемостью; он предстает как пугающе-сложный, пугающе-капризный процесс с непредсказуемыми опасными расстройствами и с таинственными секретами. Конечно, работа по поддержанию нужных режимов плавки в домне очень важна, ее достижения и потери на большой печи могут выражаться суммами, например, в десятки миллионов долларов в год. Но, отдавая должное важности этой работы, квалификации и чутью, даже искусству ее исполнителей, нужно иметь в виду, что здесь идет своего рода героическая борьба доменщиков с последствиями доменной идеологии. Освободившись от давления этой идеологии, можно перейти к другим режимам шахтной плавки, которые более свободны от тех случайностей и опасностей, преодолением которых занимаются доменщики.

Говорят, что своими опасными капризами *домна держит доменщиков в страхе*, поэтому им трудно решиться на какие-то значительные изменения плавки. Расстройства хода плавки опасны и приносят большие убытки, но для нашей темы еще важнее то, что угроза таких расстройств делает почти невозможными значительные улучшения процесса. Получается замкнутый круг: капризы домны и ее плохая управляемость держат доменщиков в страхе, и эти страхи не позволяют что-нибудь изменить, чтобы улучшить управляемость и снять эти *страхи*.

В начале 20-го века в России М. К. Курако пользовался легендарной славой спасителя домен от закозления и от других расстройств. Когда уже не видно было другого выхода, кроме как ломать печь, директора заводов «охотились за М. К. Курако как за драгоценной добычей». В команде М. К. Курако формировался И. П. Бардин, будущий советский академик.

М. А. Павлов писал, что «самый лучший мастер не сможет объяснить, почему вчера у него домна дала хороший чугун, а сегодня плохой. Управле-

ние доменной печию – искусство; оно приобретаетя долгими годами практики, передается в Англии от отца к сыну». В конце жизни М. А. Павлов, будучи уже знаменитым академиком, «отцом русских доменщиков», признавался, что, откровенно говоря, ему не все ясно в том, что происходит внутри домны.

Такие явления характерны для процессов древнего ремесла, которые и сейчас часто остаются непонятными и плохо управляемыми. Подобные явления не характерны для современных научных технологий, которые основаны на фундаментальных физических силах и процессах, описываемых точными уравнениями. Для совершенствования доменного процесса его нужно перенести в научную зону, где он будет определяться понятными физическими силами и где он хорошо управляется.

Неустойчивость, капризность и плохая управляемость доменного процесса ведет к тому, что доменщики стремятся годами работать на одном и том же сырье, в одном режиме, и желательно без переходов на «тихий ход», когда мало сырья или заводу не нужно много чугуна. В этом случае расстройство режима печи можно просто пережить, так как в прошлом в подобных случаях они рано или поздно проходили сами собой.

Если все же изменения режима плавки необходимы, то их стремятся выполнять очень медленно, и после каждого небольшого изменения многократно и тщательно убеждаться в том, что изменение благополучно пройдено и оно не ведет к опасным расстройствам. Считается, что после существенного изменения сырья или интенсивности продувки надо переработать объем шихты в 2-3 раза больше объема печи, чтобы убедиться, что переход на новый режим пройден благополучно, и ему не угрожают резкие расстройства хода плавки. Процесс считают окончательно установившимся обычно не раньше, чем через 10 дней работы при новых параметрах. Задуть домну после ремонта и вывести ее на стационарный режим удается лишь за время порядка полмесяца или месяц даже при кропотливом и тщательном регулировании плавки. При неудачном запуске домны она долго работает в неустойчивом капризном режиме и может принести очень большие убытки. Легендарной славой пользуются в стране специалисты, удачно запускающие домну; их приглашают на момент пуска на каждом заводе.

Для сравнения отметим, что сталеплавильный агрегат (прогретый), даже самый большой, переходит на новый режим работы, например, за 10 минут, но не за полмесяца – месяц. В пустой конвертер можно залить жидкий металл и сразу начать продувку в обычном режиме. В сталеплавильном агрегате нет принципиально неустойчивого движения материалов и соответствующих «капризов», а управляющие воздействия быстрые, как воздействия «снизу» в домне. Если в агрегате типа домны значительная часть сырья будет вдуваться с дутьем в виде порошка концентрата и угольной пыли, то ее режим также можно будет регулировать быстро и эффективно, как топливную горелку. Управляемость будет лучше; пере-

ход на новый режим продувки можно будет выполнить за несколько минут, а не за неделю.

Чтобы начать переход к лучшей управляемости, в качестве первого шага здесь предлагается всыпать пылевидный или мелкий концентрат в потоки доменного дутья еще перед воздуходувкой (глава 2). Потоки дутья пронесут этот концентрат через рекуператор, там он прогреется и придет в печь горячим. В печь будет поступать не обычный воздух, а «запыленный» концентратом. Такое всыпание концентрата в дутье технически несложно, а его количество можно наращивать очень медленно, как обычно доменщики изменяют параметры плавки. Вдувание концентрата сравнительно приемлемо и психологически, так как оно подобно вдуванию угольной пыли, которое широко применяется. Когда таким концентратом будут заменяться хотя бы несколько процентов окатышей, то отключение подачи концентрата приведет уже к быстрому разогреванию горна, а удвоение его подачи – к быстрому охлаждению. Мы получим возможность быстро купировать перегревания и переохлаждения горна. Это позволит уже избавляться от тех страхов, которыми пугает доменщиков капризная домна. Последующие изменения плавки можно выполнять уже смелее и увереннее.

1.9. Управляемость доменного процесса можно улучшить

Самый лучший мастер не сможет объяснить, почему у него домна вчера дала хороший чугун, а сегодня – плохой.

Академик М. А. Павлов

Так как в домне все компоненты смешаны, то нет возможности быстро повлиять на соотношение различных процессов. Можно лишь очень медленно и очень постепенно менять состав этой смеси и переходить к другим режимам плавки. Состав металла и состав газов, окислительно-восстановительный потенциал атмосферы и долю полного горения приходится принимать такими, «какие уж сами получатся» в этой смеси реагентов. В результате металл получается в виде чугуна, а газы с преобладанием СО, что означает потери большей части химической энергии топлива. Соотношение восстановления окислов и их плавления также приходится принимать таким, какое получится. Поэтому иногда восстановление железа обгоняет плавление, и в домне накапливаются восстановленные, но не расплавившиеся массы окатышей, растет «козел». За несколько недель или месяцев такие массы прочно спекаются и становятся почти непроницаемыми для газов; возникает угроза такой аварии, после которой приходится ломать печь. Чтобы избежать таких угроз, с помощью флюсов организуют раннее плавление окатышей, еще не вполне восстановленных, на высокой коксовой засыпке, вдали от горна. Считается также, что необходимо достаточное содержание в шихте кокса, разрыхляющего эту массу. Но радикальным решением про-

блемы была бы возможность прямо регулировать соотношение восстановления и плавления в печи. Такая возможность появляется, если рудная компонента не смешивается с топливом, все топливо вводится вместе с дутьем, например, в виде угольной пыли.

В доменной печи окисление углерода до СО примерно на две трети идет за счет кислорода дутья, и примерно на треть – за счет кислорода окислов железа, в реакциях прямого восстановления. После этого газы СО, полученные по обеим реакциям, участвуют еще в косвенном восстановлении на более высоких горизонтах печи. Та часть топлива, которая сжигается в дутье, служит основным источником высокотемпературного тепла, обеспечивающего плавление и перегревание металла над температурой плавления. Величина другой части, идущей на прямое восстановление, определяет интенсивность поглощения тепла в основных реакциях металлизации. В домне трудно или невозможно регулировать соотношение горения и восстановления, выделения и поглощения тепла. Но если топливо вводится с дутьем, то можно прямо задавать соотношение этих частей в каждый момент плавки и быстро изменять при необходимости соотношение выделения и поглощения тепла. Если накапливается масса металлизированных, но не расплавленных окатышей, то можно уменьшить подачу топлива, «лишнего» по сравнению с дутьем, уменьшить прямое восстановление и соответствующее поглощение тепла. В пределе можно давать топливо только на горение до СО, и полностью убрать прямое восстановление. В принципе при необходимости можно даже полностью прекратить подачу топлива на какое-то время и быстро разогреть горн за счет горения восстановленного железа в дутье, то есть «конвертерным» способом.

Если топливо вводится с дутьем, его подача регулируется, то можно быстро изменять соотношение топлива и дутья, быстро и в широких пределах регулировать тепловыделение в горне. При таких широких возможностях регулирования можно не бояться похолодания или перегрева горна. Можно обеспечить плавление спекающихся окатышей за время порядка часа после их металлизации и не бояться их прочного спекания в непроницаемый «козел», для которого требуются недели или месяцы.

В то же время боязнь «закозления» печи настолько укоренилась в нашей идеологии, что будет психологически трудно добиться согласия на образование в печи спекающихся масс металлизированных окатышей, хотя в течение нескольких часов газопроницаемость такой массы остается почти такой же, как и до спекания. Возможно, психологически легче будет добиться согласия на пылегазовые процессы, далекие от доменной практики и не отягощенные страхами нашей идеологии.

Желательно также более ровное движение материалов, более правильный сход шихты, без больших зависаний и обрушений. Доменная печь работает в невыгодном режиме полу-спекания массы металлизированных окаты-

шей. При этом силы трения в спекающейся шихте очень неопределенные, а неустойчивость движения шихты очень велика. Как при меньшем, так и при большем развитии спекания сход шихты может быть более определенным, правильным, с меньшей неустойчивостью движения.

Теоретически возможен и выгоден процесс с минимальным спеканием, когда сверху загружается почти один кокс или уголь, а основная часть рудной компоненты вводится в печь снизу через вдувание концентрата. Сход шихты будет примерно таким, как в печи обжига сухих материалов, например, известняка; зависаний не будет. В высокотемпературной зоне фурм и ниже на кусках кокса появятся капли и натеки расплавов, получающиеся из концентрата, но это не изменит качественно режим схода.

Возможен обратный по спеканию процесс, в котором сверху загружаются одни окатыши, все топливо вводится снизу в виде вдуваемой угольной пыли. В этом случае шихта может опускаться уже в основном как единая спекающаяся масса, почти без изменения объема, без пересыпаний и обрушений, и более ровно, примерно так, как опускается шихта в агрегатах Мидрекс. Можно предоставить такой спекающейся массе опускаться в корпусе без заплечиков как единое целое до ванны печи с жидким шлаком и металлом, до зоны оплавления. Устраняется 10-метровая коксовая насадка, которая может забиваться густеющим и вспенивающимся шлаком и затруднять продувку. Сход массы будет определяться регулируемым оплавлением ее внизу, как в агрегате Мидрекс – регулируемой выгрузкой. Правда, угольная футеровка может интенсивно растворяться, если до жидкого металла опускаются недовосстановленные окатыши. Чтобы сохранять футеровку, нужно обеспечивать постоянное присутствие в металле и шлаке избытка угольной пыли. Другой выход состоит в том, чтобы переходить уже к сталеплавильной футеровке лещади печи.

В обоих предельных случаях, как без спекания, так и при глубоком спекании, получится, очевидно, более определенный, устойчивый сход шихты, в отличие от полуспеканий, подвисаний и обрушений в домне.

В домне трение в массе шихты увеличивается заплечиками; здесь шихта, в которой выгорает кокс, должна пересыпаться так, чтобы опускаться в сужающемся корпусе. Столб шихты как бы отчасти подвешивается на заплечиках, его проседание затрудняется трением в массе спекающейся шихты, которая должна опускаться в сужающемся корпусе. Повышенное трение уменьшает опасность проседаний недовосстановленных масс, но одновременно и увеличивает неустойчивость движения. Зависания шихты усиливаются, и в среднем нет чрезмерного проседания шихты в расплавы. Но усиливаются и скачки от зависаний шихты к обрушениям.

1.10. Порок № 3 – необходимость окускования сырья, высокие требования к его физическим свойствам

Что же, металлурги дураки все, что ли?
Реплика студента

Важный недостаток доменной плавки – высокие требования к физическим свойствам сырья. Куски кокса и окатыши с одной стороны, должны быть пористыми и газопроницаемыми, чтобы обеспечить их достаточную реакционную способность. Но, с другой стороны, куски шихты в то же время должны быть достаточно прочными, чтобы не крошиться и не давать мелочь, снижающую газопроницаемость всей массы шихты. Необходимо хорошо **окускованное** сырье. Поэтому приходится применять не уголь или угольную пыль, а кокс, который в 2-6 раз дороже. В качестве рудной компоненты также не удастся применить исходное сырье, порошок железорудного концентрата; требуется готовить прочные и пористые обожженные окатыши или агломерат. Это делает и рудную часть дороже, например, в два раза и более. Сейчас улучшение показателей доменного процесса часто достигается именно за счет лучшей подготовки сырья или за счет перехода на более качественное и более дорогое сырье. Сам доменный процесс прошел последнее значительное улучшение 200 лет назад, когда было освоено горячее дутье; с тех пор принципиальных улучшений нет, и их трудно ожидать при господстве современной доменной идеологии.

Поэтому стоимость сырья теперь составляет примерно 90 % стоимости чугуна, или даже больше. Если бы удалось отладить получение чугуна полностью из **неокускованного** сырья, из угольной пыли и порошка концентрата, то, при прочих равных условиях, на этом была бы сэкономлена примерно половина стоимости чугуна. Такое получение чугуна предлагается ниже в главе 2.

В этой книге предлагается, в частности, из мелкого или пылевидного концентрата в смеси с угольной пылью готовить **пылегазовую взвесь**. Скорость свободного падения частиц угольной пыли или пылевидного концентрата с размером минус 35 мкм составляет всего около 10 см с; потоки газов в рекуператоре, для которых характерна скорость порядка 10 м/с, легко уносят такие пылевидные реагенты почти без оседания их частиц.

Когда подобная пылегазовая взвесь концентрата и угольной пыли придет в зону с температурой выше 720 °С, начнется интенсивное восстановление окислов железа углеродом. Газы (СО, СО₂), нагретые в рекуператоре, прореагируют с пылевидными твердыми реагентами за 5-10 секунд, за время пребывания пылегазовой взвеси в рекуператоре. За такое время газы успевают прореагировать не только с пылинками взвеси, но даже с кусками руды и топлива в домне, с окатышами в агрегате Мид-

рекс. На выходе из рекуператора получится взвесь тонкого порошка железа, взвешенного в своих газах металлизации (СО). Металлизация пройдет за счет дешевого рекуператорного тепла.

Далее такая пылегазовая взвесь порошка железа в СО может вдуваться в домну. Это эквивалентно поступлению в агрегат горячего металлизированного сырья. При достаточно высокой степени металлизации такую пылегазовую взвесь можно вдувать и в ванну сталеплавильного агрегата. Можно также на выходе из рекуператора (или после охлаждения) разделить газы и порошок аппаратами Циклон и другими средствами пылеочистки. Полученный порошок железа можно вдувать в домну или в сталеплавильную ванну уже без сопровождающих его газов металлизации. Выделенный порошок можно направить также в завалку сталеплавильного агрегата в пакетах, мешках или в виде брикетов. Газы металлизации (СО) можно использовать на отопление другого рекуператора. Цель главы 2 – более подробное рассмотрение и обоснование таких возможностей.

В самой домне неиспользованное химическое тепло отходящих (колошниковых) газов удастся использовать лишь на отопление рекуператоров, только для нагревания дутья, поэтому вернуть в печь с дутьем удастся например, лишь 20 % такого химического тепла, потерянного с колошниковыми газами. В предлагаемой схеме за счет рекуператорного тепла выполняется не только нагревание дутья, но и основная реакция получения (восстановления) металла. Можно возвратить через рекуператор в печь намного больше тепла и, соответственно, использовать на отопление рекуператора практически все то химическое тепло газов, которое не удастся реализовать в реакции восстановления металла. Весь газ СО, полученный при металлизации, можно сжигать в рекуператоре, чтобы обеспечить теплом восстановление следующих порций концентрата.

Улучшение процесса за счет лучшей подготовки сырья ведет к удорожанию этого сырья. Дефицит кокса или коксующегося угля на Урале приходится иногда покрывать поставками ...из Австралии! Когда такой кокс, привезенный через два океана и два континента, сжигается в печи лишь на треть, а две трети его энергии «улетают в трубу» (в колошник), это выглядит особенно несообразно.

Урал начинался как «железный край державы», богатый рудами и топливом. Но сейчас требования домен к сырью стали столь высоки, что им не соответствуют уже не только уральские угли, но часто не соответствуют и уральские руды. Поэтому сейчас в уральской домне нередко встречаются кокс из Австралии и рудное сырье из Подмосковья (Ст. Оскол, и др.). Если будет отлажена плавка металла из пылевидного концентрата и угольной пыли, то намного расширится спектр углей и руд, пригодных для выплавки металла. Например, так называемые *пылеватые* руды не поддаются обычному окискованию, но удобны для вдувания в печь.

1.11. Замена кокса угольной пылью при переходе к агрегату Угольный Мидрекс

Еще недавно писали, что нельзя без 500 кг кокса, теперь уже достигается 300, в теории поговаривают о 150. Да домна сама потихоньку дойдет до безкоксового процесса, только они растянут этот переход на одно-два столетия!

Из дискуссии

Кокс заменяется угольной пылью, если домна преобразуется в упомянутый агрегат «угольный Мидрекс с плавлением». Для этого нужно соответственно откорректировать профиль домны, сверху загружать лишь окатыши, а все топливо вдувать в виде угольной пыли снизу. При избытке угольной пыли получится безкоксовое получение жидкого чугуна, причем сохраняются основные преимущества домны.

Отметим, что современный доменный процесс самопроизвольно постепенно сам эволюционирует в сторону превращения в процесс «угольный Мидрекс». Действительно, постепенно увеличивается доля вдуваемой угольной пыли и уменьшается расход кокса. Еще недавно общее мнение доменщиков состояло в том, что невозможно работать при расходе кокса меньше 500 кг на тонну чугуна. Считали, что минимум 500 кг необходимы для надлежащего разрыхления шихты и обеспечения ее газопроницаемости, нормального схода и др. Сейчас на лучших доменных печах достигается расход кокса меньше 300 кг/т, а в теории уже обсуждается возможность работы при расходе кокса 150 кг/т. Очевидно, такая эволюция домен закончится в конце концов тем, что кокс будет полностью заменен угольной пылью и другими видами топлива. Однако при самопроизвольных изменениях процесса это превращение произойдет очень не скоро, так как такой переход противоречит доменной идеологии и тормозится этой идеологией. Уже само вдувание угольной пыли часто воспринимается доменщиками как что-то, идейно не вполне законное, как нарушение чистоты доменных принципов. «Чисто доменный» процесс всегда мыслили как продувку кусковой шихты. Вдувание пыли оказывается как бы идейно не вполне законным приемом и считается допустимым лишь в качестве малой поправки к чисто доменному процессу, причем такая поправка не должна изменять суть процесса. Вдувание чего-либо как малой добавки опробовано на домнах уже для очень многих смесей, вплоть до боевых отравляющих веществ, которые предполагается вдувать для их сжигания и дезактивации. Такие малые добавки не влияют на основные параметры процесса, и не требуют корректировки каких-то основных параметров продувки.

Однако вдувание угольной пыли уже давно вышло за пределы малой добавки; сейчас иногда такая «добавка» может уже быть больше основного топлива, кокса. Тем не менее, после каждого нового достигнутого увеличе-

ния доли угольной пыли следуют многочисленные заявления, что, конечно же, кокс все же необходим. Необходима коксовая насадка, нельзя обеспечить хороший сход шихты и ее газопроницаемость без разрыхляющего действия кокса, и др. Однако необходимая газопроницаемость и значительно лучший, чем в домне, сход шихты вполне обеспечиваются и без кокса в агрегатах Мидрекс.

Вдувание угольной пыли в домнах, вообще, вероятно, не получило бы современного распространения, если бы этот прием не был хорошо отработан на паровых котлах электростанций. В котлах пыль вдувается в огромных количествах, там давно отработано совершенное оборудование для этого процесса, и давно уже *само напрашивалось* перенесение этого приема на домны.

Если процесс замены кокса угольной пылью будет идти самопроизвольно, то он может занять, например, одно-два столетия. Если построить график зависимости минимального расхода кокса от времени и экстраполировать эту зависимость в будущее, то кривая придет в нуль через 100-200 лет. В доменном процессе, как и в других процессах древнего ремесла, вообще обычно считаются допустимыми лишь небольшие, очень постепенные и медленные изменения; считается, что скачки здесь недопустимы. Типичные исследования доменного процесса и обычные диссертации доменщиков обсуждают снижение расхода кокса, например, на 20 кг/т. При этом обычно это снижение достигается за счет лучшей подготовки сырья, но не путем улучшения самой доменной плавки. Если ставится задача достигнуть большее снижение, то это воспринимается часто как некий авантюризм, отрыв от действительности. Исследователь, который будет обсуждать снижение расхода на 100 кг, рискует вызвать неодобрение доменной общественности, приобрести репутацию авантюриста.

Между тем основные выгоды такого изменения процесса получаются именно при полном отказе от кокса. Лишь в этом случае появляется возможность свободно варьировать соотношение топлива и дутья, быстро корректировать температуру горна, а при необходимости – и окислительно-восстановительный потенциал атмосферы в печи. Обеспечивается также устойчивый равномерный сход шихты без выгорания из нее топлива, то есть без пересыпаний, зависаний и обрушений, как в агрегате Мидрекс. Правда, здесь потребуется отладить несколько необычный режим плавления полученной металлизированной массы (подробнее это обсуждается в главе 3).

Доменные печи показывают высокую экономичность замены кокса угольной пылью; в этом смысле домна *сама просится* перейти на безкоксовый вариант. Очевидно, здесь требуется преодолеть давление доменной идеологии и вместо самопроизвольного и очень медленного сползания доменного процесса к бескоксовому варианту нужно сознательно, скачком выполнить назревшее видоизменение плавки, перейти к схеме «угольный

Мидрекс». При этом традиционная доменная плавка действительно становится очень трудной в переходной зоне, при малом расходе кокса меньше 300 кг/т. Когда становится мало кокса, разрыхляющего шихту, то наступают слишком прочные спекания массы металлизированных окатышей, слишком большие и длительные зависания шихты и резкие обрушения ее. Нужно решиться пройти эту трудную область (от 300 кг/т до нуля кокса) скачком, за счет качественного изменения характера процесса.

Так как в верхней части печи будут одни не восстановленные окатыши, то подачей дополнительного дутья отходящие газы здесь можно будет дожигать до CO_2 , H_2O , и получать всё возможное тепло полного горения. За счет тепла дожигания можно прогревать окатыши до предплавления. Цель главы 3 – более подробное рассмотрение и обоснование таких возможностей.

В агрегатах Мидрекс достигается более полное использование химической энергии топлива, в частности, за счет того, что окатыши там не смешаны с твердым топливом, то есть в принципе так же, как и в предлагаемой последовательной продувке. Но более полное сжигание топлива в агрегатах Мидрекс достигается за счет применения ценного топлива – природного газа, который становится все более дорогим и дефицитным.

В 60-е и 70-е годы 20-го века природный газ был дешев, и на агрегаты типа «Мидрекс» возлагали очень большие надежды. Надеялись *повалить домы*, объявить их *вымирающими мамонтами*. В СССР проектировался и строился крупнейший в мире Оскольский электрометаллургический комбинат на природном газе, работающий по схеме «Мидрекс – электропечь». Велись обширные исследования по металлизации газом концентрата в гранулах, в «крупке», в порошке, в установках кипящего слоя [15], в аппаратах «Циклон». Но уже во время энергетического кризиса 70-х годов цены на газ резко выросли, и надежды на металлизацию газом сильно померкли. В последнее время в связи с новым ростом цен на газ доля металлизации газом снижается до значений около 5 % всего металла. Радикальным решением проблемы будет, очевидно, бескоксая металлургия на угле, в частности, теми методами, которые предлагаются здесь. Уже сейчас сравнительно быстро, опережающими темпами возрастает производство металлизированного сырья на угле. Сейчас металлизация углем дает уже 26 % всего металлизированного сырья.

1.12. Порок № 4 – плавление на слое кокса, переуглероживание металла, необходимость сталеплавильного передела

Доменщик должен всю жизнь изучать повадки домны, как охотник изучает повадки зверя

Из дискуссии

В домне окатыши или агломерат смешаны с избытком топлива. После восстановления полученные куски металла оказываются в топливной засыпке, и их плавление дает насыщенный углеродом чугун, эвтектический расплав с содержанием углерода около 4,3 %. Поэтому для получения стали требуется выполнить еще сталеплавильный передел. Этот передел нужен в основном для того, чтобы исправить «перебор» доменного процесса, устранить перевосстановление, переуглероживание металла.

Эта «несообразность» более очевидна и поэтому, в отличие от предыдущих, широко обсуждается даже в популярной литературе и в журналистике.

При последовательной продувке в зону рудной компоненты из топливной зоны может поступать лишь восстановительный генераторный газ; окатыши восстанавливаются газом, как в агрегате «Мидрекс», без прямого контакта с топливом, и дают малоуглеродистую металлизированную массу. Плавлением таких окатышей в этом же агрегате можно сразу получить сталь, как в электропечах сразу получают сталь плавлением аналогичных окатышей, полученных на установках «Мидрекс».

Если все топливо вдувается с дутьем, то можно регулировать соотношение топлива и дутья. Тем самым можно варьировать и восстановительно-окислительный потенциал газообразных продуктов горения. Если после горения будет оставаться избыток угольной пыли, то плавление металлизированной массы такими факелами даст чугун, как и в домне. При определенном соотношении CO и CO₂ в продуктах горения (примерно от 1 % до 25 % CO₂ в сумме этих газов) получится атмосфера, восстановительная по отношению к железу, но окислительная по отношению к углероду. Если плавящийся металл дойдет до равновесия с таким факелом горения топлива при 25 % CO₂, то получится почти безуглеродистое (или малоуглеродистое) жидкое железо с концентрацией углерода порядка 0,1 %. Такой расплав можно затем превратить в сталь простой добавкой углеродистых материалов. Сейчас в жидкий металл, выпущенный из электропечи, нередко дают подобную добавку углерода даже в ковше.

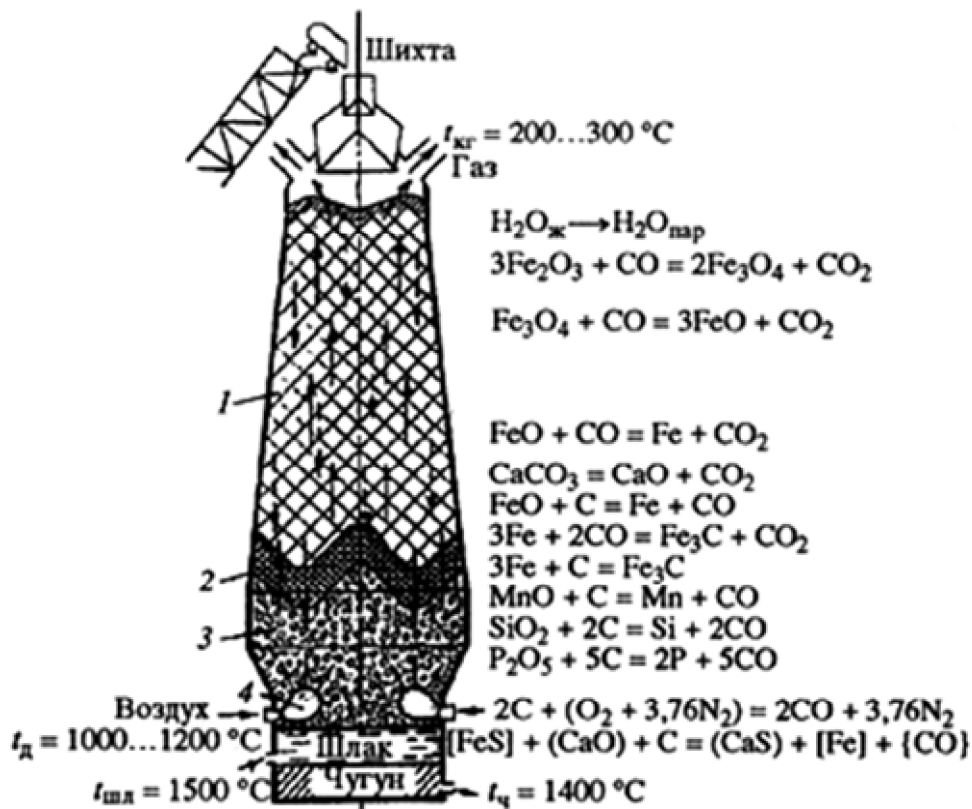


Рис. 1.2. Общая схема доменного процесса и распределение по высоте печи зон: 1 – твердофазного восстановления; 2 – шлакообразования; 3 – кокса и жидких продуктов плавки; 4 – горение кокса

Данный «порок № 4» металлургического цикла, в отличие от других пороков, широко обсуждается. Имеется множество нереализованных изобретений по устранению такого порока, по прямому получению железа. Достаточно полный обзор изобретений и патентов по способам прямого получения железа потребовал бы больше времени и сил, чем, например, написание данной книги. Известно, в частности, что еще Д. И. Менделеев высказывался по этому вопросу: «...придет со временем пора искать способы прямого получения железа и стали из руд, минуя чугун» (1899 г.). Проект шахтной печи для выплавки стали разрабатывал основоположник русского металловедения Д. К. Чернов. Его печь похожа на шахтный агрегат металлизации, который поставлен поверх мартеновской печи и сбрасывает в ванну мартена металлизированное сырье.

Интересно, что в металлургии меди (а также свинца, цинка и др.) за последние десятилетия «самопроизвольно» произошло примерно такое же преобразование [47], которое здесь предлагается для металлургии стали. Из шахты печи для плавки медной руды (CuS) убрали кокс, и в результате черновую медь удалось получить уже в шахтной печи, одностадийным процессом. Так работает, в частности, печь в г. Карабаш по австралийской технологии. В металлургии стали, в отличие от металлургии меди, не удастся обойтись без топлива. Но если это топливо сжигать лишь в факелах,

то тоже можно избежать переуглероживания металла и получить сразу готовый или почти готовый металл.

Цель данной книги – показать, что можно и нужно устранять перечисленные несообразности доменной плавки, сохраняя ее преимущества. Но для этого обязательно нужно делать процесс более управляемым, избавляться от опасных непредсказуемых капризов доменной плавки, которые «держат в страхе» доменщиков и не позволяют им заниматься радикальным совершенствованием процесса. Поэтому доменный процесс столетиями остается в принципе неизменным. Доменная плавка в принципе практически не изменилась за два последних столетия, за всю эпоху научно-технического прогресса, в течение которой были созданы и многократно усовершенствованы почти все современные технологии.

Несообразности домны можно устранять последовательно, поэтапно, но в пределе доменная плавка может превратиться в процесс, в котором будут полностью устранены все четыре перечисленных «порока» современного цикла. На каком-то этапе преобразований доменщики скажут, что «это будет уже не доменный процесс», но это вопрос терминологии.

В пределе после ряда преобразований домна должна превратиться в агрегат, который полностью сжигает топливо и имеет тепловой КПД, приближающийся к 100 %, вместо 30-50 % в современной домне. Нужно также обеспечить вполне определенное устойчивое движение сырья в агрегате под действием хорошо известных сил, без резких случайных колебаний, подвисаний и обрушений шихты. Необходимо обеспечить управляемость процесса, возможность быстро изменять температуру факелов горения в агрегате. Можно добиться работы полностью на исходном неокискованном сырье, на концентрате и угольной пыли. Нужна возможность регулировать соотношение вдуваемого топлива и дутья, окислительно-восстановительный потенциал газов в печи, тогда металлизированную массу можно плавить не только на чугун, но также и на железо, которое просто превращается в сталь добавкой углерода.

1.13. Достоинства доменного процесса. Альтернативные способы получения металла

В поисках хорошего процесса
лучше все же танцевать от домны.

Из дискуссии

Известно больше десяти альтернативных способов получения черного металла, имеющих существенное промышленное значение. Еще больше опытно-промышленных установок, построенных для отладки новых способов. Тем не менее, доменный процесс дает больше 90 % всего черного металла; нет процессов, которые в обозримом будущем могли бы составить конкуренцию доменному в получении основной массы металла.

Такое положение вызвано тем, что доменный процесс имеет ряд достоинств. Важное преимущество домен состоит просто уже в том, что они построены, к тому же они давно существуют и прошли долгий путь постепенного медленного совершенствования в деталях, в интенсификации процесса, в увеличении размеров печей. Так как производительность печей очень большая, то невелика доля потерь тепла с охлаждающей водой и через стенки печи; она составляет, например, (10-15) % всех затрат тепла. Сравнительно небольшие агрегаты альтернативного получения металла не могут конкурировать с домнами по этому показателю, у них часто основная доля тепла теряется именно теплопередачей через стенки. Для того, чтобы просто поддерживать такой агрегат горячим, с рабочей температурой, не получая металл, требуется почти столько же топлива, как и в рабочем режиме при наибольшей производительности. Расход топлива в альтернативных процессах часто намного больше, чем в домне.

Видоизменением процесса в существующей доменной печи можно достигнуть многие из тех результатов, ради которых создаются новые агрегаты альтернативной металлургии. Во всех агрегатах черной металлургии главными являются реакции в тройной системе железо – углерод – кислород. Главное и очень тяжелое препятствие в совершенствовании доменной плавки – это древняя жесткоконсервативная доменная идеология, не допускающая серьезных изменений. Ломка идеологии очень трудна психологически, но она не требует капитальных вложений.

Некоторые из альтернативных способов, в отличие от доменного, позволяют полностью сжигать топливо в печи до CO_2 , то есть не имеют «порока № 1» домны. Некоторые способы позволяют использовать не обожженные окатыши, но концентрат и некоксующийся уголь. Так, способ «Хоганес» свободен от отмеченных «пороков № 1 и № 3» домны, но это медленный и малопродуктивный процесс, пригодный скорее для металлизации окалины на заводе с целью получения порошка железа или для разработки небольших отдаленных месторождений хороших руд.

Так, в Монголии недавно пущено предприятие Хух-Ган по способу Хоганес на рудах Тимиринского месторождения. Нагревание идет медленно, теплопередачей через огнеупорные стенки шамотных «стаканов» с углем и рудой; процесс продолжается больше суток. Туннельная печь при небольшом сечении имеет длину 152 м, в 5 раз больше высоты домны. Большая удельная поверхность печи при медленном процессе приводит к большим потерям тепла через стенки печи. Расход топлива составляет около 1500 кг на тонну металлизированного сырья. Производительность агрегата – 15 тыс. тонн металлизированного сырья в год. Большая доменная печь дает столько же металла за 2-3 дня.

В таких процессах медленной и трудной стадией оказывается прогревание теплопередачей насыпки твердого материала. Подобные насып-

ки имеют низкую теплопроводность и применяются в качестве теплоизоляции. Уже для прогревания слоя толщиной порядка 20 см требуется время около суток. Поэтому приходится вести процесс в небольших шамотных стаканах и в каждом стакане получать металлизированную массу размером около 20 см. Прогревание теплопередачей через стенку используется также в коксовых батареях; здесь также не удастся получить *коксовый пирог* толщиной намного больше 20 см и приходится прогревать материалы за время порядка суток.

Большую удельную поверхность и большие потери тепла имеют также длинные вращающиеся печи способа Круппа. Велики потери тепла у агрегатов с чугунным водоохлаждаемым корпусом, которые работают с жидким металлом.

Агрегаты Мидрекс также эффективны не везде, но, например, в тех регионах, где желательнее на месте потреблять получаемый природный газ. В России их эффективность поддерживается сравнительно низкими внутренними ценами на газ.

Некоторые способы возможно, в принципе смогли бы конкурировать с доменным, но для этого им надо пройти длинный путь развития и увеличения агрегатов. Малым экспериментальным агрегатам трудно конкурировать с домной уже потому, что у них слишком много тепла теряется через стенки, или в системе водяного охлаждения.

По величине удельных потерь тепла через стенки, по производительности и другим показателям, малые «альтернативные» агрегаты сопоставимы не с современными домнами, а скорее с домнами середины 19-го века. Тогда доменные печи обычно имели объем меньше 100 м³, производительность меньше 30 т/сутки и расход топлива более 1000 кг/т металла. Эти показатели сопоставимы с характеристиками упомянутого современного агрегата Хух-Ган. Видимо, легче модернизировать современный «готовый» доменный процесс за счет соответствующих дополнений и преобразований в домне. Труднее пройти длинный путь многократного увеличения размеров и совершенствования в деталях какого-то «альтернативного» агрегата. Домнам на это потребовалось 150 лет.

Сейчас альтернативные способы часто оказываются эффективными лишь в определенных необычных условиях, они способны занять лишь сравнительно небольшие специфические «ниши» особых условий металлургии.

Большое преимущество домен, как и других шахтных печей – это хороший теплообмен газов и кусковой шихты на противотоке. Газы уходят из горна с температурой порядка 1500 °С, но отдают основную часть тепла встречному потоку шихты, и уходят в колошник с температурой лишь (150-200) °С. Они уносят из печи немного физического тепла. Создатель теории теплообмена в домне Б. И. Китаев называл доменную печь

одним из самых совершенных агрегатов; это вполне справедливо в отношении теплотехники, но совсем неверно в отношении термодинамики горения. В домне хорошо отлажена экономия понятного физического тепла реагентов, но очень велики потери менее понятного химического тепла.

Важное преимущество дает домнам использование горячего дутья, с которым нередко вносится в печь даже больше тепла, чем получается от горения топлива. Когда ввели подогрев дутья (1829), металлурги были удивлены тем, что в печи экономится много больше топлива, чем расходуется на отопление рекуператора; дело в том, что в рекуператоре ничто не мешает сжигать топливо полностью, до CO_2 . Такое удивление высокой экономичностью нагревания дутья также свидетельствует о том, что часто остается неосознанным неполное горение топлива в самой домне.

Вообще, в домне тщательно учитывается и экономится физическое тепло газов и шихты, то есть тепло их нагрева и охлаждения. Еще древние металлурги поняли значение теплообмена в шахте, и начали повышать высоту шахты. В бытовых печах также удлинялись пути отвода горячих газов, которые выполнялись «в несколько колен», так что газы из топки печи несколько раз проходили в кладке вверх и вниз и отдавали больше тепла в отапливаемое помещение. В Россию такие печи пришли из Голландии и назывались «голландками».

Горячее дутье и усвоение, утилизация в шахте физического тепла отходящих газов являются важными преимуществами домны, но ради этого приходится готовить дорогое, хорошо окискованное сырье – прочный пористый кокс и хорошо обожженные окатыши или агломерат. На это тратится примерно половина всех затрат на выплавку чугуна. Это важный недостаток доменной плавки.

Такова дилемма: или мы выбираем дорогое хорошо окискованное сырье и переплачиваем за это примерно половину стоимости чугуна, или же миримся с большими потерями тепла с отходящими газами. Идеальным в этом плане был бы агрегат, который, с одной стороны, перерабатывал бы неокискованное сырье (например, угольную пыль и концентрат), но одновременно обеспечивал бы и утилизацию тепла газов. Цель главы 2 – показать, что «идеальным» в этом плане агрегатом может быть рекуператор или теплообменник, в котором металлизуется пылегазовая взвесь концентрата и угольной пыли.

Краткая формула хорошего шахтного агрегата для получения металла – это устранение отмеченных недостатков домны при сохранении ее преимуществ: горячего дутья и усвоения тепла отходящих газов в шахте.

Хотя в домне намного хуже отлажена экономия более значительного «химического» тепла газов, но отмеченные достоинства позволяют доменному процессу оставаться вне конкуренции в получении основной массы металла, несмотря на явные «несообразности», перечисленные выше. Даже

критики доменного процесса соглашаются с тем, что сейчас доменному процессу нет альтернативы. Можно устранить перечисленные несообразности, сохраняя достоинства доменной плавки, и получить очень хороший процесс. Обоснование этого положения – основная цель книги.

Желательно сохранить также другие преимущества домен – высокую тепловую мощность и производительность, огромную единичную мощность агрегата, характерную для шахтных печей, большой межремонтный период. Такие показатели позволяют патриотам доменного процесса твердо верить в то, что этот процесс незаменим, переживет тысячелетия, и снисходительно-иронически рассматривать альтернативные процессы получения металла.

Показателен тот факт, что из альтернативных способов получения металла наиболее успешным оказался шахтный способ Мидрекс, идейно близкий к доменному. В агрегатах Мидрекс и Хилл-3 сейчас получают (5-7) % всего металла. Успех процесса Мидрекс подтверждает мнение о том, что более совершенный способ получения металла целесообразно разрабатывать, исходя из шахтного процесса. Трудно разрабатывать совсем новый металлургический процесс на новых принципах, «на пустом месте». Краткая формула создания хорошего агрегата – это устранение несообразностей доменной плавки при сохранении ее достоинств.

1.14. Влияние доменной идеологии

Измученные капризами домны, они изо всех сил выдерживают проверенные безопасные режимы процесса. Шаг вправо, шаг влево – расстрел!

Из дискуссии

Стоимость самой доменной плавки (расходы по переделу в домне) может составлять, например, 5 % от себестоимости стали, 10 % себестоимости чугуна. Так, в примерах ([8], с. 524, с 526), расходы по доменному переделу составляют 8,2 % и 9,9 % себестоимости чугуна. Порядка 90 % стоимости чугуна составляет цена железорудного сырья и топлива (например, 53,5 % и 38,3 %, в сумме 91,8 % [8]). В основном это цена подготовительных переделов: коксования угля, окускования концентрата, обогащения, иногда еще дополнительных процессов окислительного обжига руды, обжига известняка и др. Стоимость сырья увеличивается из-за того, что не все руды пригодны для окускования и далеко не все угли пригодны для коксования. Приходится выбирать более дорогое и часто дефицитное сырье, перевозить его на большие расстояния и др. Стоимость первичной добычи сырья бывает сравнительно невелика, особенно при открытых горных работах.

Цена доводочного сталеплавильного передела часто еще выше стоимости всех подготовительных процессов; сталь, выплавленная из чугуна без использования лома, часто примерно вдвое дороже чугуна.

Таким образом, чтобы не вводить изменения в доменный процесс, а так же чтобы обеспечить высокие показатели его, за несколько столетий были выделены из этого процесса и добавлены в цикл подготовительные и доводочные переделы с общей стоимостью, например, в 20 раз больше стоимости самого доменного процесса. Чтобы создать комфортные условия для доменной плавки, выполняются процессы подготовки сырья общей стоимостью, например, в 10 раз больше стоимости самой доменной плавки. Затем в сталеплавильном процессе еще затрачиваются средства, грубо говоря, в 10 раз превышающие стоимость передела в домне, чтобы устранить промахи домны, некоторый ее «перебор», переуглероживание металла. Это делается в основном для того, чтобы в самой доменной плавке можно было не думать о содержании углерода в получаемом металле, по средневековой традиции выплавлять в домне металл, какой уж сам получится. Наше испуганное смирение перед капризным и сложным доменным процессом, наша боязнь что-то существенно изменить в этой плавке, обходится нам уже очень дорого. Ради хороших показателей на 5 %-ной доменной стадии цикла приходится идти на удорожание остальных стадий, составляющих вместе 95 % стоимости цикла.

Хорошую формулировку для сложившейся ситуации дал создатель металлургии урана, известный американский исследователь С. Смит: «Доменный процесс – это жернов, повешенный на шею металлургии в наказание за ее грехи в научных исследованиях». Полезно добавить, что здесь металлургия расплачивается еще и за свою «зацикленность» на средневековой доменной идеологии. Чтобы устранить несообразности, необходима ломка этой идеологии. Цель заключительной главы 5 – анализ влияний доменной идеологии и закономерностей ломки идеологии.

Несообразности металлургии отчетливо видны при *незамыленном взгляде со стороны*. Для ясного осознания этих «пороков» цикла полезно проделать относительно металлургии весь тот набор рассуждений, который принято выполнять в теории оптимизации химических технологий. Во многих физико-химических технологиях скрупулезно и тщательно устраняются и малые «несообразности», и совсем небольшие потери энергии порядка одного процента. На основе этих работ недавно сформировалась *теория эксергии*.

Если же мы рассуждаем как металлурги, как доменщики, смотрим на цикл «изнутри», то он обычно представляется нам вполне естественным, даже почти единственно возможным, его пороки остаются в основном неосознанными. Больше половины энергии топлива «улетает в трубу», в колошник, и эти огромные потери остаются либо незамеченными, либо не вполне осознанными. В принципе эти потери нетрудно устранить. Но нередко считается, что просто немислимо рассуждать об оптимизации такого капризного процесса, где *все полыхает*.

Выявляется интересная, даже парадоксальная, комическая ситуация. С одной стороны, современная металлургия имеет ряд явных и грубых несообразностей, которые, в принципе понятны, и которые нетрудно устранить; с другой стороны, эти несообразности или пороки цикла столетиями остаются не только не исправленными, но часто и неосознанными. Исследователи – неметаллурги часто просто не верят, что такая ситуация возможна. На заявление о несообразностях нередко следует такая реакция – «что же, металлурги дураки все, что ли?». Легче предположить, что когда-то кто-то во всем этом тщательно разбирался и убедился, что исправить здесь ничего нельзя по таким-то причинам; мы лишь почему-то не знаем об этом анализе.

Достаточно просто всыпать пылевидный концентрат в дутье, чтобы часть чугуна получать *безокатышевым* способом. Достаточно перейти к процессу, когда в шахте только окатыши, все топливо вдувается в виде угольной пыли, чтобы весь чугун получать без кокса. Но доменщики убеждены, что доменный процесс незаменим, его нельзя изменить ни в одном пункте, и т. д.

Люди давно изобрели способ видеть, но не сознавать несообразности в разных вопросах; этот способ – *идеология*. Подобная ситуация складывается в разных областях при господстве устаревшей неадекватной идеологии [12, 19]. Под давлением идеологии у исследователей вырабатывается внутренняя цензура, которая мешает воспринять факты, противоречащие этой идеологии. Говорят, что по отношению к таким фактам проявляется идеологическая *«поразительная слепота»* [12, 19].

Конечно, нельзя не заметить, что металл переуглероживается в домне, а затем нужен целый сталеплавильный передел, который дороже самой доменной плавки, специально для того, чтобы устранить это переуглероживание. Эта наиболее очевидная несообразность обсуждается в теории доменного процесса; но разработан целый ряд оправданий такой ситуации, ряд объяснений, в которых доказывается, что это всего лишь *кажущаяся нелогичность* цикла, что уже несколько столетий назад стало ясно, что *двустадийный процесс наиболее эффективен*, приводит к меньшему расходу топлива [7, 8] и др.

По нашему мнению, вопросы идеологии и психологии исследования оказываются решающими для проблемы, обсуждаемой в этой книге. Без учета идеологических влияний, предубеждений и суеверий просто невозможно понять ситуацию. Поэтому вопросам идеологии, закономерностям ее ломки, здесь отведена вся последняя 5-я глава книги.

Отметим, что обсуждение доменной идеологии – задача сложная и часто неблагоприятная. Предубеждения и суеверия вообще не поддаются такому *точному* изложению, как научно-технические вопросы. В этом и состоит важное преимущество точного естествознания по сравнению с

психологией. Для вопросов идеологии не очень подходит строго-научный, *сухой математический* стиль изложения. Здесь скорее уместен тот стиль, который А. И. Солженицын называл художественным исследованием, и который он эффективно использовал для изложения советской социальной идеологии и ее несообразностей. В этом плане научно-техническая идеология мало отличается от социальной. Для выявления, изложения предубеждений и несообразностей той и другой идеологии подходят примерно одинаковые методы.

История ломки различных идеологий ясно показала, что сами по себе исследования, накопление фактов и знаний, часто отнюдь не приводят к крушению неадекватных концепций. При господстве старой идеологии у исследователей вырабатывается *внутренняя цензура*, которая не позволяет им вполне осознавать новые факты, если они противоречат господствующей идеологии. Поэтому *документ против идеологии бессилён*, идеология уступает не накопленным фактам, но лишь другой идеологии, хорошо проработанной [12, 19]. В главе 5 приведены известные сведения по ломке ряда идеологий.

Поэтому оказывается возможной такая парадоксальная ситуация, интересная для анализа психологии научного исследования: «рядом» с доменным процессом (в идейном отношении) имеются намного более перспективные схемы той же самой шахтной плавки, но они столетиями остаются не только не реализованными, но и неосознанными.

В каждой области такие ситуации устойчивы лишь до тех пор, пока их «несообразности» остаются не вполне осознанными. Когда «несообразности и пороки» становятся вполне ясными, а способы их устранения понятными, подобные идеологии и соответствующие агрегаты долго уже не живут. Аналогично долго не живут и политические системы, если в их идеологии выявляются резкие несообразности.

В подобных случаях бывает психологически легче создавать новый процесс практически *с нуля, на пустом месте*, только чтобы оторваться от давления идеологии. Легче создавать какой-то качественно новый процесс, идейно далекий от доменного, например плазменные технологии.

Психологически труднее внести хотя бы небольшие изменения в плавку в рамках того же шахтного процесса. Трудно хотя бы несколько иначе перегруппировать отлаженные элементы шахтной плавки, так как в этом случае требуется затронуть его идеологию. Идеология требует признать, что в доменной плавке ничего нельзя изменить.

Характерно, что сравнительно быстро прогрессируют процессы получения металла, идейно далекие от доменного. Совершенствуются такие процессы, как «Корекс», «Ромелт», автогенная плавка меди, печи Ванюкова, а также способы металлизации на поду кольцевой печи, такие, как «Фаст

драйв». Прогрессируют процессы во вращающейся печи, упомянутые дорогие плазменные технологии.

В перечисленных новых (или «альтернативных») производствах почти не удастся использовать выигранные, отлаженные столетиями элементы плавки в шахтной печи, богатейший опыт доменного процесса. Не удастся сохранить отмеченные важные преимущества домны и придется преодолевать множество радикально новых технических сложностей. Но зато здесь уже не чувствуются запреты доменной идеологии, что оказывается более важным. Оказывается легче преодолеть многочисленные и радикально новые технические сложности, чем идеологические запреты. Возможно, психологически будет легче внедрить предлагаемое восстановление металла в пылегазовой взвеси, так как оно не похоже на доменный процесс. Может оказаться, что предлагаемый процесс «угольный Мидрекс» будет психологически труднее ввести именно потому, что такой процесс идейно близок к доменному, поэтому здесь давление доменной идеологии может оказаться более сильным.

Хотя имеется много альтернативных способов выплавки металла, но, насколько нам известно, среди таких альтернативных способов нет шахтных процессов с плавлением, которые были бы в этом плане похожи на доменный. Есть лишь несколько «полу – шахтных» способов с шахтной металлизацией и с плавлением в другом агрегате. Распространено мнение, что доменщики полностью реализовали возможности шахтного процесса с плавлением, или что у них монополия на анализ шахтной плавки. Считается, что невозможен процесс, который был бы видоизменением доменного. Изобретатели решаются смело работать только «вдали» от доменных технологий, вдали от шахтной плавки с плавлением. Слишком хорошо известно, что если предложить любые существенные изменения для домны, то *доменщики взвоят ... и т. д.*

Между тем в доменном процессе реализован лишь очень узкий набор возможных вариантов или режимов шахтного процесса, для которых проверено, что они не ведут к слишком опасным расстройствам хода доменной плавки. Несообразности цикла, сложившиеся в результате исторических случайностей, в доменной идеологии предстают как вполне естественные, закономерные, или даже единственно возможные варианты плавки. Поэтому пороки металлургии столетиями остаются не только не исправленными, но часто и неосознанными.

Если освободиться от давления идеологии, то можно устранить несообразности цикла за счет сравнительно простой и сравнительно небольшой перегруппировки известных и хорошо отлаженных элементов плавки, сохраняя преимущества домны.

1.15. Выводы к главе 1

В России этим никого не заинтересуешь,
пока это не сделают за границей.

Из дискуссии

Видно, Русь так уж сотворена.

М. Ю. Лермонтов

В доменной печи кокс сжигается в основном лишь по первой стадии, лишь до CO , но не до CO_2 , и, соответственно, дает в 2-3 раза меньше тепла, чем при полном горении. К тому же кокс намного дороже угля, поэтому тепло горения топлива обходится в домне примерно в 10 раз дороже, чем в паровом котле или в угольной топке. По этой же причине сейчас практически нет способов прогрева ванны с жидким металлом за счет горения топлива. В конвертере тепло получается за счет горения железа и легирующих примесей, в электропечи – за счет дорогой электроэнергии. В обоих случаях процесс получается скоротечным и не удастся выполнить продолжительные операции глубокого рафинирования рядовой стали, улучшения ее качества.

Можно добиться полного горения топлива, если газы факела горения приходят в равновесие с окисленными материалами, например, с окисленным шлаком или с железорудными окатышами до их металлизации. Если в шахтную печь загружать одни лишь окатыши без кокса, все топливо вводить вдуванием угольной пыли, то можно полностью дожигать отходящие газы в верхней части шахты. Можно эффективно, полностью сжигать топливо в сталеплавильной ванне, если организовать в ней окислительную зону, и если факел горения «не пробивает» шлак. Можно выполнять металлизацию мелкого или пылевидного концентрата за счет дешевого рекуператорного тепла, если пропускать через рекуператор смесь концентрата и угольной пыли в состоянии пылегазовой взвеси.

Доменная плавка начиналась почти 1000 лет назад как процесс древнего ремесла, и в принципе качественно почти не изменилась до настоящего времени. Создатели домен понимали теплотехнику, но не могли учесть термодинамику реакций горения. Поэтому в современной домне плохо отлажена экономия химического тепла отходящих газов, но хорошо отлажена экономия понятного физического тепла нагрева – охлаждения материалов. Правда, усвоение физического тепла отходящих газов достигается в домне дорогой ценой; ради этого приходится готовить хорошо окускованное сырье и тратить на это примерно половину стоимости чугуна. Можно без окускования обеспечить более глубокое и эффективное усвоение физического и химического тепла газов, если реакции вести в состоянии пылегазовой взвеси.

Сход шихты в домне принципиально неустойчивый, идет через чередование зависаний и обрушений шихты, и, соответственно, перегревов и переохлаждений горна с многочисленными расстройками хода печи, причем у доменщика почти нет возможностей быстро повлиять на тепловой режим плавки. Говорят, что «своими опасными капризами домна держит доменщиков в страхе» и они не решаются выполнить какие-то существенные изменения процесса.

Можно создавать более совершенный процесс не на основе альтернативных способов, а путем видоизменения доменной плавки. Главное препятствие здесь – древняя доменная идеология, не допускающая изменений. Главные положения этой идеологии сводятся к тому, что «доменный процесс незаменим», он «один из самых совершенных», и в нем ничего нельзя изменять, нужно лишь тщательно выдерживать отлаженные режимы плавки, при которых меньше расстройств процесса, меньше пугающих «капризов» печи. Главная трудность – выйти из-под давления этой идеологии, посмотреть на проблему со стороны, выполнить трезвый анализ несообразностей процесса и путей их устранения. Целесообразно начать с таких изменений процесса, которые более приемлемы психологически, и помогают бороться с перегревами – переохлаждениями, с капризами печи. Так, если вдувать в печь снизу концентрат, или его смесь с угольной пылью, то появится возможность быстро менять температуру горения в горне, эффективно регулировать процесс, и смелее выполнять следующие улучшения. Цель главы 2 – анализ таких процессов.

Многие печи цветной металлургии создавались по образцу домен и сталеплавильных агрегатов и унаследовали их пороки. Предлагаемые улучшения процесса пригодны и для таких печей цветной металлургии.

Преодоление идеологии – трудная работа, но она не требует капитальных вложений, в отличие от создания новых агрегатов альтернативного получения металла.

ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ ПЫЛЕГАЗОВЫХ РЕАКЦИЙ И ФАКЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ

2.1. Известные инжекционные процессы

Домну трудно повалить, то есть заменить чем-то.
Но домну можно постепенно модернизировать.

Из дискуссии

В этой главе обсуждаются процессы в состоянии пылегазовой взвеси и в факельной плавке. В частности, предлагается всыпать в потоки доменного дутья еще перед воздухоудвкой мелкий или пылевидный концентрат. Поток дутья пронесет концентрат через рекуператор в состоянии пылегазовой взвеси. Он прогреется за счет дешевого рекуператорного тепла и горячим придет в горн печи с дутьем. В печь будет вдуваться не обычный воздух, а «запыленный» концентратом, то есть пылегазовая взвесь. Варьируя количество вдуваемого концентрата, можно интенсивно изменять тепловыделение и температуру горна. Процесс становится более управляемым, можно не бояться переохлаждения горна и свободнее вводить последующие улучшения. Такое вдувание концентрата может служить удобным и психологически приемлемым началом изменений доменного процесса.

Далее предлагается аналогично пропускать через рекуператор в состоянии пылегазовой взвеси смесь концентрата и угольной пыли. Металлизация концентрата пройдет в такой взвеси также за счет дешевого рекуператорного тепла.

В металлургии известно много процессов, в которых порошковые материалы прогреваются или реагируют в факеле. Такими потоками газа вдуваются также порошковые материалы в ванну с расплавами. Факел – это обычно небольшой по размеру и интенсивный поток газа. В факелах, исходящих из доменных фурм, из кислородных фурм, в топливных факелах начальная скорость газов часто имеет величину порядка 50-100 м/с и больше. Иногда используются сверхзвуковые скорости потоков, больше 330 м/с. При длине факела порядка метра частицы порошка, взвешенные в газе, проходят факел за несколько сотых секунды. Трудно организовать факел так, чтобы время реагирования в нем было намного больше. По мере удаления от фурмы поток газов в факеле быстро разрушается, затухает.

Многие электропечи оборудуются устройствами вдувания углеродистых порошков для повышения концентрации углерода в металле, а также топливными горелками для прогрева ванны. Вдувание угольной пыли в домну также можно отнести к инжекционным технологиям – эти технологии заимствованы металлургией у паровых котлов теплоэлектростанций.

Применяется заправка футеровки торкретированием, когда порошок огнеупорного материала вдувается в факел горения топлива и разогревается;

при столкновении разогретых частиц огнеупора с горячей футеровкой они налипают на нее и наращивают слой огнеупорной массы.

В кислородно-факельной автогенной плавке черновой меди порошок медного концентрата CuS горит в потоке кислорода над ванной с расплавами; теплота горения серы достаточна для расплавления меди, так что частицы порошка превращаются в капельки жидкой меди, которые и вдуваются факелом в расплав.

Иногда говорят даже о существовании целой инъекционной металлургии или целой металлургии факельной плавки. Но в факелах можно проводить лишь достаточно быстрые реакции, которые успевают закончиться за несколько сотых секунды; дальше поток газа в факеле затухает. Далее, в факел не поступает тепло извне, поэтому в нем не удастся провести эндотермические реакции. В факелах проводят в основном лишь реакции, идущие с выделением тепла, такие, как процессы горения.

Но пылегазовую взвесь концентрата и угольной пыли могут эффективно переносить во взвешенном состоянии и более медленные обычные газовые потоки, которые существуют в рекуператоре или в домне между кусками шихты. Для этих газовых потоков характерны скорости порядка 5-10 м/с. Для доменных печей типичной считается скорость газа 6-8 м/с и время прохождения газом всего столба материалов (до 30 м) за 3-5 с ([8], стр. 276). Ряд конструкций рекуператоров также характеризуется примерно такими же параметрами газовых потоков. Такие потоки газа могут переносить пылегазовую взвесь концентрата и угольной пыли примерно так же, как потоки колошниковых газов уносят из домны колошниковую пыль, которая отделяется затем различными методами пылеочистки.

В рекуператоре может идти металлизация порошка концентрата угольной пылью за счет дешевого рекуператорного тепла. После прохождения рекуператора из полученных газов металлизации и взвешенного в них порошка можно сформировать факел. Задачей такого факела будет лишь вдувание порошка металлизированного концентрата в ванну с расплавами. Провести весь процесс в факеле не удастся, так как, во первых реакции требуют притока тепла, и во вторых, для них требуется значительно больше времени. Время реагирования пылегазовой взвеси в рекуператоре во столько раз больше времени реагирования в факеле, во сколько раз объем рекуператора больше объема факела, например, в 100 или даже в 1000 раз. Газы и пылегазовая взвесь проходят рекуператор обычно за время порядка 5-10 с, тогда как факел они проходят за несколько сотых секунды.

В обсуждаемую пылегазовую взвесь можно добавить избыток угольной пыли и эквивалентное количество кислорода так, что тепла реакции горения будет достаточно для восстановления. В этом случае не потребуется получать тепло на реакции от рекуператора, не потребуется предварительно разогревать рекуператор. Такой неотопливаемый рекуператор будет выпол-

нять роль реактора или реакционной камеры, приготовляющей взвесь для факела. Во многих случаях будет достаточен такой реактор небольшого размера, если реакции быстрые.

В эпоху дешевого природного газа и после первых успехов процесса Мидрекс выполнялись многочисленные исследовательские работы по металлизации концентрата газом. Разрабатывался процесс Циклон, в котором концентрат в факеле природного газа прогревался за счет добавок кислорода выше температуры 720°C , и восстанавливался [15]. Полученные твердые частицы металлизированного концентрата (частицы порошка железа) предполагали выделять из газов в таком аппарате Циклон за счет центробежных сил при быстрой циркуляции газового потока. В другом варианте предлагалось использовать в подобном процессе в качестве топлива и восстановителя угольную пыль. Обсуждалось также такое повышение температуры процесса, чтобы получался уже не металлизированный концентрат, а жидкий чугун, который стекал бы вниз по стенкам цилиндрического корпуса аппарата. Известны подобные работы и по автогенной плавке черновой меди. Эти работы не удалось довести до создания эффективных промышленных агрегатов. Есть сообщения (в частности, в Интернете) о продолжении таких исследований по процессу Циклон и сейчас.

Теоретическая температура горения углерода (угольной пыли) в кислороде до СО равна 2200°C . Если в такой факел добавить немного концентрата, то получится металл уже не в виде крупинок твердого железа, а в виде капелек расплава. Можно получать жидкий чугун за счет одного лишь этого процесса в факеле. Выделение жидких капелек из газа можно выполнить легче и полнее, чем выделение твердых частиц порошка, так как эти капельки налипают на встречающиеся поверхности. Так работает упоминавшаяся автогенная кислородно-капельная плавка черновой меди.

Недостаток теплового баланса таких процессов в черной металлургии состоит в том, что им присуща «несообразность № 1»; горение в восстановительной атмосфере, в присутствии жидкого чугуна, идет лишь по первой стадии, лишь до СО. Полное горение топлива до значительных концентраций CO_2 и H_2O здесь, как и в домне, невозможно совместить с металлизацией, с плавлением частиц металла на чугун.

Здесь снова получается процесс вообще без усвоения энергии отходящих газов, которые уходят в виде СО с температурой, например, 1500°C . В таком процессе расплавы получают лишь 9 % полного тепла горения, 91 % полной энергии топлива теряется в виде химического и физического тепла уходящих газов. Как и в предыдущих примерах без утилизации энергии газов, расчетный расход топлива будет неприемлемо большим – 2700 кг/т углерода и $2240 \text{ нм}^3/\text{т}$ кислорода (расчёт 6 приложения). Так как есть еще и неучтенные статьи расхода тепла, то такой процесс практически непригоден. Здесь мы снова встречаемся с теми же проблемами, как и при анализе несо-

образности № 1 доменной плавки. Естественно, при таком плохом тепловом балансе не было шансов на успех у обсуждаемой плавки в аппарате Циклон.

Кроме того, для выделения частиц взвеси центробежными силами газы в аппарате Циклон должны иметь достаточно большую скорость, поэтому время пребывания газа в небольшом экспериментальном аппарате получается малым, и трудно приблизиться к равновесию реакций. Значительно проще организовать восстановление еще до аппарата Циклон, например, в реакционной камере, или в рекуператоре. Будет намного больше времени для завершения реакций, а в рекуператоре к тому же можно не тратить угольную пыль на горение; реакции обеспечиваются дешевым рекуператорным теплом. В этом случае для восстановления магнетита нужно всего 285 кг/т углерода или меньше, если образуется CO_2 .

В предлагаемых схемах пылегазовая взвесь после рекуператора также проходит аппарат Циклон, и небольшая часть реакции может пройти в этом аппарате. Но в рекуператоре взвесь имеет много больше времени для реагирования (~10 с). Время пребывания взвеси в рекуператоре относится ко времени пребывания в аппарате Циклон как объемы этих агрегатов, например, как 100:1.

Известны эксперименты по металлизации концентрата природным газом в кипящем слое [15]. Такая металлизация также затруднена плохим тепловым балансом, «несообразностью № 1». При интенсивном перемешивании газа и твердых частиц в таком слое усредняются значения температуры и концентрации, получается «аппарат совершенного смешивания» по химической терминологии. Нет противотока газа и твердого вещества, и, соответственно, снова получается неэкономичный процесс без утилизации энергии отходящих газов.

Далее, при такой продувке из слоя концентрата выдуваются и уносятся газом наиболее мелкие частицы, происходит разделение, сепарация частиц по размеру и плотности. Чтобы такой сепарации не было, лучше создать поток газа с повышенной скоростью, который унесет все частицы, в виде пылегазовой взвеси, как предлагается здесь.

Чтобы улучшить показатели процесса в кипящем слое, из концентрата приготавливали «крупку» или гранулы с увеличенным размером частиц [15], однако тем самым снова вводится процесс окускования концентрата, от которого мы хотим избавиться.

Тепловой баланс подобных процессов становится более приемлемым, если вести плавку не на чугун, а на безуглеродистое железо. Как отмечено выше, в этом случае газы металлизации (CO) можно дожигать почти на 25 % до CO_2 и отдавать ванне уже не 9, а 26 % полного тепла горения углерода. Расчетный расход топлива сокращается с 2700 примерно до 1100 кг/т (см. табл. 1.1 и приложение).

2.2. Движение частиц в пылегазовой взвеси

При металлизации две главные проблемы: Как нагреть?
И как охладить? В рекуператоре обе задачи решаются
легко, он именно для таких процессов и создан.

Из дискуссии

Важная характеристика пылегазовой взвеси – **скорость V_0 свободного падения частиц**. Поток газа может увлекать и переносить частицы взвеси, если скорость потока много больше скорости свободного падения этих частиц. Для скорости V_0 малых сферических частиц известна точная формула Стокса:

$$V_0 = 2DgR^2 / 9 \eta,$$

где D – плотность частицы, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; R – радиус частицы, η – вязкость газа. Вязкость воздуха или СО в агрегатах можно принять равной $3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [39].

Уравнение Стокса относится к ламинарному режиму. При падении более крупных частиц поток окружающего газа становится турбулентным; в этом случае применяют формулу Риттингера, и в переходном режиме – формулу Аллена. Разработаны способы разделения порошка на фракции в зависимости от скорости падения частиц V_0 .

Многие мелкие концентраты имеют крупность «минус 74 мкм», то есть частицы порошка имеют размер максимум 74 мкм. Таков, в частности, качканарский концентрат. Наибольшая скорость падения самых крупных частиц такого концентрата по формуле Стокса получается около 50 см/с. Часто основная масса концентрата приходится на фракции с размером менее 35 мкм. Скорость свободного падения таких частиц имеет величину порядка 10 см/с. По аналогии с угольной пылью эти фракции можно называть пылью концентрата. При необходимости можно отсеять более крупные фракции концентрата и работать с одной лишь пылью.

Если в домну вдувается тонкая угольная пыль, то ее крупность часто составляет минус 20-30 мкм. Скорость падения самых крупных частиц такой пыли в воздухе также составляет примерно 10 см/с. Потоки газов в домне или рекуператоре, которые имеют скорость 5-10 м/с, конечно, могут переносить такую пыль без заметного оседания. Пылегазовая взвесь концентрата и угольной пыли образует «сильно запыленный газ», который можно прокачивать через рекуператоры или теплообменники без значительного оседания пыли. Если через рекуператор пропустить такую пылегазовую взвесь, то концентрат металлизуется, смесь прореагирует примерно за то же время, за которое реагируют газы, проходя домну или агрегат «Мидрекс», то есть за 3-5 с.

Общеизвестное падение снежинок часто имеет скорость, например, 1-2 м/с при размере частиц в несколько миллиметров. Снежинки и мелкая снежная пыль уносятся сильным порывистым ветром в метель.

Когда в домну вдувается крупная угольная пыль с размером частиц до 1 мм, то нередко частицы такой пыли не успевают сгореть, проходят с потоками газа всю печь и улетают в колошник. Потоки газа в домне при скорости 6-8 м/с переносят и достаточно крупные частицы размером порядка 1 мм.

Газовые потоки фурм и факелов, имеющие скорость порядка 100 м/с, легко переносят куски руды, кокса, окатыши, любые куски шихты. Отметим для сравнения, что парашютисты с нераскрытым парашютом падают со скоростью V_0 порядка 50 м/с, и большой вертикальный поток воздуха в аэродинамической трубе при такой скорости способен поднять даже такую «частицу», как парашютист. При таких размерах «частиц» скорость падения уже почти не зависит от их величины. Ураганные ветры при скоростях больше 50 м/с иногда поднимают и более крупные объекты и производят катастрофические разрушения.

Окатыши и куски кокса падают в воздухе со скоростью порядка $V_0 = 25$ м/с, и поток газа со скоростью больше V_0 способен переносить «взвесь шихты в газе». При необходимости можно было бы сделать агрегат со скоростью потоков газа больше $V_0 = 25$ м/с, в котором куски доменной шихты будут переноситься потоками газа во взвешенном состоянии и реагировать в этих потоках. Потоки газа со скоростью порядка 25 м/с способны уносить уже не только частицы пыли, но даже окатыши или куски кокса, все куски доменной шихты. В доменной печи иногда образуются подобные зоны, или «каналы, свищи» в массиве шихты, местные прорывы дутья в образующихся пустотах, где куски шихты уносятся потоками газа, или же процесс приближается к режиму кипящего слоя.

Рассмотрим вертикальный поток газа в канале или в трубе со скоростью больше V_0 , который уносит частицы пылегазовой взвеси вверх. Если на каком-то уровне труба становится более широкой, и, соответственно, скорость потока становится несколько меньше V_0 , то твердые частицы взвеси здесь задерживаются, отстают от потока газа и образуют интенсивно перемешиваемую массу с малой плотностью, которую называют иногда *кипящим слоем*. Движение частиц вниз относительно газа в такой массе называют *не свободным, а стесненным падением частиц*. При дальнейшем уменьшении скорости потока газа, например, около $0,5V_0$, перемешивание твердых частиц становится не столь интенсивным; частицы с большей скоростью падения сосредотачиваются в нижней части массы, а более легкие и мелкие частицы оказываются в верхних слоях. В таком режиме возможна классификация частиц по величине V_0 , разделение тяжелых и легких, или мелких и крупных частиц. Если скорость газа уменьша-

ется, например, до $0,1V_0$, то прекращается и расслоение частиц, их классификация, а их масса уплотняется. Получается уже продувка плотной неупорядоченной засыпки твердых частиц газом, подобная продувке окатышей в домне или частиц шихты на агломерационной ленте.

Если в конструкции теплообменника предусмотреть такие расширения каналов, в которых движется пылегазовая взвесь, то можно использовать их для получения более плотной взвеси. Если временно понизить интенсивность продувки так, чтобы в расширенной части канала скорость газа стала немного меньше V_0 , то здесь начнется концентрация взвеси. Отходящий газ (СО) будет почти свободен от твердых частиц, и его можно отвести в сторону из реакционной зоны. При возобновлении интенсивной продувки, когда скорость снова превысит V_0 , скопленная концентрированная взвесь пойдет дальше по каналам теплообменника. Если есть два или несколько параллельных каналов, то можно поочередно в одних накапливать концентрированную взвесь, а из других выдувать такую уже накопленную взвесь. Такое уплотнение взвеси позволит увеличить время пребывания твердых частиц в агрегате, увеличить полноту реакций и достигаемую конечную степень металлизации. Часть газов пылегазовой взвеси можно отделять в заданных точках также агрегатами Циклон; можно уплотнять взвесь и этим способом.

В процессах обогащения руд и концентратов частицы пылегазовой взвеси классифицируют, разделяют на классы по их размеру или плотности в зависимости от их поведения в потоках газа. Мелкие и легкие частицы уносятся потоками газа, крупные и тяжелые не уносятся или уносятся в меньшей степени.

Время t пребывания пылегазовой взвеси в рекуператоре или теплообменнике определяется соотношением:

$$t = Q / W,$$

где Q – объём теплообменника, W – секундный расход смеси.

При заданном расходе смеси W , $\text{м}^3/\text{с}$ время t реагирования увеличить невозможно. Но линейную скорость V движения газа в рекуператоре можно увеличивать, изменяя конструкцию, если делать путь газов более «извилистым» при том же объеме Q агрегата: можно заставить газ не один раз пройти высоту L рекуператора, а несколько, N раз проходить ее туда и обратно; в несколько раз увеличится и скорость потока газа:

$$V = N \cdot L / t = N \cdot L \cdot W / Q.$$

Если газ проходит высоту рекуператора 25 м один раз за 3-5 с, то получается скорость потока 5-8 м/с. Если рекуператор имеет три «колена», $N = 3$, газ проходит эту высоту три раза, то при том же расходе газа получится скорость 15-25 м/с и т. д.

Увеличивая скорость газа, можно обеспечить более надежное увлечение частиц пыли потоком, можно работать с более крупными порошками, не допуская заметного оседания частиц.

Для нашей темы важно то, что обычные скорости газа в рекуператорах (5-10 м/с) вполне достаточны, чтобы переносить угольную пыль или пыль концентрата в состоянии пылегазовой взвеси; эти частицы имеют скорость падения V_0 всего 10 см/с. Эти потоки вполне способны переносить и мелкий концентрат ($V_0 = 50$ см/с). Чтобы работать с крупными концентратами, можно выполнить кладку рекуператора с несколькими коленами. Подобная камера с несколькими коленами может служить также реактором (не отапливаемым рекуператором), для проведения реакций в пылегазовой взвеси перед введением ее в факел.

2.3. Вдувание концентрата

Все говорят о вдувании угольной пыли,
никто не говорит о вдувании концентрата.

Из дискуссии

В этом разделе обсуждается вдувание мелкого или пылевидного концентрата в доменную печь. В простейшем случае мелкий концентрат можно просто всыпать в потоки дутья еще перед воздуходувкой, при нормальном давлении. Частицы концентрата пройдут через рекуператор в состоянии пылегазовой взвеси и прогреются за счет дешевого рекуператорного тепла. В печь будет поступать воздух, «запыленный» концентратом, а не чистый воздух, как при обычном дутье.

Пройдя фурменный очаг домны, частички концентрата попадут в зону восстановительной атмосферы, состоящей в основном из СО, с температурой до 2000 °С. Частички вдуваемой угольной пыли почти полностью сгорают уже на расстоянии 300 мм от среза фурмы (от точки введения), за время порядка одной сотой секунды. Быстро прореагируют и частички концентрата; в горячих восстановительных газах они превратятся в капельки чугуна и шлака. В горне, в массиве доменной шихты, эти капельки налипнут на куски шихты и в натеки расплавов, стекающих сверху.

По ряду параметров предлагаемое вдувание концентрата подобно вдуванию угольной пыли, которое уже стало в мире вполне привычным приемом (хотя в России еще только начинается). Несколько упрощая, можно сказать, что при вдувании угольной пыли экономится процесс окускования топлива (коксования), а при вдувании концентрата можно аналогично сэкономить процесс окускования рудной компоненты, процесс агломерации или производства обожженных окатышей. Экономический эффект вдувания пыли и концентрата в эквивалентных количествах может быть примерно одинаков. Кокс, который расходуется в плавке на тонну металла, примерно на

столько же дороже угольной пыли, на сколько обожженные окатыши дороже концентрата. В сумме разность цены кокса и агломерата по сравнению с угольной пылью и концентратом составляют примерно половину всей стоимости чугуна или даже больше.

Цены концентрата и окатышей сильно колеблются в зависимости от рыночной конъюнктуры, от региона, уровня налогов (НДПИ, НДС), от близости месторождения руды, геологических условий и др. Внутри заводские цены часто сильно отличаются от мировых, назначаются с учетом многих внутренних факторов и часто не разглашаются, объявляются коммерческой тайной. Нередко цена обожженных окатышей вдвое больше цены концентрата, а стоимость этих окатышей составляет половину стоимости чугуна. В этом случае чугун, выплавленный из вдуваемого концентрата, при прочих равных условиях будет на четверть (на 25 %) дешевле, чем обычный чугун, выплавленный из окатышей.

Вдувание концентрата не менее, или даже более выгодно и перспективно, чем вдувание угольной пыли, причем работа с концентратом намного проще. Пыль начинает бурно гореть уже в самой точке введения ее в поток горячего дутья и может создать здесь очаг очень высоких температур (2000 °С и больше), опасных для окружающих конструкций. На расстоянии 300 мм от среза фурмы тонкая пыль сгорает практически полностью. Ее часто приходится готовить очень тонкой (20-30 мкм), концентрированно впрыскивать под большим давлением в заданную точку через специальные жаростойкие водоохлаждаемые устройства, вводимые в фурмы. Пыль впрыскивается в определенные точки потока дутья в фурме, часто в виде водной или мазутной суспензии. Возникают проблемы в связи с неравномерным распределением угольной пыли по фурмам.

Опасности в основном устраняются, если устанавливается комплект современного высокотехнологичного отлаженного оборудования для подготовки пыли и вдувания ее. Такие комплекты поставляются известными мировыми фирмами по цене порядка 10-20 млн дол. Высокая стоимость оборудования и сложности процесса сдерживают применение пыли. Но при работе с большими объемами пыли соответствующие дополнительные расходы на тонну топлива невелики.

Угольная пыль бывает взрыво- и пожароопасной при транспортировке, в процессе измельчения, опасна даже пыль в шахтах. Особенно опасна пыль «молодых» и, тем более, газовых углей с большим (до 70 % и больше) содержанием углеводородов. При измельчении угля со свежих поверхностей выделяются газообразные углеводороды, которые с воздухом могут образовывать взрывоопасные смеси. Практически процессы приготовления пыли часто приходится вести без доступа воздуха.

Предложение вдувать концентрат по аналогии с вдуванием пыли сначала тоже вызывает у доменщиков представление о том, что потребуется

сложное оборудование для впрыска концентрата в определенную точку потока дутья под высоким давлением, как и при вдувании угольной пыли. Представляется, что придется *строить компрессорную станцию*. Между тем концентрат можно просто всыпать в поток доменного дутья в любой точке. В отличие от горячей угольной пыли, концентрат в доменном дутье ведет себя как инертный порошок, не вступающий в реакции, и его введение в дутье не приводит к таким сложностям, как вдувание пыли.

Концентрат инертен, не является взрывоопасным, не требует таких предосторожностей и производится в виде тонкого порошка, пригодного для вдувания, уже в своем исходном состоянии. Отметим также, что концентрат – более чистый материал по сравнению с окатышами, так как для формования окатышей необходимо добавлять вяжущие материалы, обычно бентонитовые глины.

После мокрой магнитной сепарации концентрат влажный, и могут возникнуть некоторые сложности при всыпании его в поток дутья, при перевозке и разгрузке концентрата, особенно зимой. Но даже если ввести сушку концентрата, это не приведет к существенному удорожанию процесса. При всыпании влажного концентрата его влага концентрата может пойти в счет воды, расходуемой на увлажнение доменного дутья.

Концентрат можно всыпать в дутье также и после воздуходувки. Потребуется поставить закрытый контейнер над воздушным трактом и всыпать порошок концентрата в дутье с помощью дозатора. Конечно, в таком закрытом контейнере нужно поддерживать такое же повышенное давление, как и в потоке дутья. Открывать и заполнять контейнер можно при перекрытии его соединения с потоком дутья или при остановке продувки. Если вводить влажный концентрат в зону с повышенной температурой, то в потоке дутья он быстро станет сухим. Введение порошка концентрата в поток дутья можно выполнить также с помощью примерно такого же аппарата, каким кусковые материалы загружаются на колошнике, но работа такого аппарата с порошком концентрата легче, чем с крупнокусковыми материалами.

Угольная пыль вдувается в горн печи холодной, тогда как концентрат придет в горн горячим, с температурой дутья, например, 1200 °С. Расчетный расход топлива на нагрев самого топлива составляет в домне примерно 11 % при обычном соотношении %CO / %CO₂. (расчёт 11 приложения). Очевидно, при вдувании концентрата расход топлива в печи будет заметно ниже, чем при вдувании эквивалентного количества угольной пыли. Правда, будет несколько выше расход топлива на отопление рекуператора, на нагревание вдуваемого концентрата, но это дешевое топливо, которое часто даже не учитывается в калькуляциях стоимости чугуна. Отметим также, что при вдувании угольной пыли нередко в домне экономится почти равное количество кокса [8].

В обычном доменном процессе жестко связаны процессы горения и восстановления, выделения и поглощения тепла, и у доменщика часто почти нет возможностей повлиять на их соотношение. Приходится принимать тепловыделение таким, «какое уж само получится» в этой смеси реагентов. Если, например, пошло опасное похолодание горна, то рекомендуется на несколько процентов уменьшить долю топлива в завалке. Но это топливо дойдет до горна, например, лишь через 20 часов. Если же окатыши, например, на 30 % заменяются вдуваемым концентратом, то отключение подачи концентрата сразу же изменяет соотношение топлива и рудной компоненты в зоне реакций на 30 %. Появляется возможность эффективно и быстро регулировать температуру горна, быстро купировать начинающееся похолодание или перегрев горна.

В регулировании температуры горна вдувание концентрата дает больше возможностей, чем вдувание угольной пыли. Общая интенсивность процессов горения в горне определяется количеством вдуваемого кислорода дутья; топливо в горне всегда в большом избытке. При вдувании пыли горение кокса лишь заменяется эквивалентным горением пыли. Изменение количества вдуваемого концентрата эквивалентно изменению доли окатышей в завалке, но действует практически мгновенно, а не через 6-20 часов после изменения пропорций в завалке. В теоретическом пределе, если окатыши вообще не загружаются сверху, то при прекращении подачи концентрата процессы восстановления и плавления в горне полностью прекратятся, останется одно горение кокса, которое может быстро разогревать горн.

Уменьшается количество того шлака, который нужно профильтровать через коксовую насадку, облегчается эта трудная и капризная стадия доменной плавки. Шлак, получающийся из вдуваемого концентрата, образуется уже под насадкой.

Если отладить вдувание концентрата, то появится эффективное средство регулирования тепловыделения и температуры в горне. Это позволит не бояться опасных похолоданий горна, выйти из того *состояния страха, в котором держит доменщиков домна* своими опасными капризами. Можно отказаться от *испуганного суеверного смирения перед капризами домны* и свободнее вводить дальнейшие улучшения в процесс. Увеличение доли вдуваемого концентрата можно выполнять медленно, плавно, как обычно и проводят изменения режима доменной плавки. Вдувание концентрата является технически простым и психологически приемлемым приемом, поэтому такое вдувание может служить удобным способом начать внедрение пылегазовых технологий в доменный процесс.

2.4. Возможные отрицательные последствия

Говорят, что такие рассуждения если и полезны, то разве что для металлургии следующего столетия. Но концентрат нетрудно подсыпать в дутье и сейчас.

Из дискуссии

Рассмотрим некоторые возможные отрицательные последствия вдувания концентрата и других пылегазовых процессов.

Тепловой баланс печи в целом улучшается при вдувании концентрата, так как поступление холодных окатышей в печь отчасти заменяется поступлением горячего концентрата. Та температура выпускаемых расплавов, которая была до вдувания концентрата, может быть достигнута при несколько меньшем расходе топлива в варианте плавки с вдуванием.

Несколько изменится также тепловой баланс отдельных зон печи и распределение температуры по высоте печи. Уменьшится количество окатышей, загружаемых сверху, поэтому меньше тепла потребуется в зоне прогревания материалов и в зоне прямого восстановления окатышей. Вдуваемый концентрат усилит прямое восстановление и поглощение тепла в горне. Если баланс тепла по агрегату в целом не изменяется, то при неизменной конечной температуре металла и шлака может несколько измениться распределение температуры по высоте печи, так как поглощение тепла усиливается в горне, но уменьшается на более высоких горизонтах. В горн будут поступать сверху более горячие материалы, а выделение тепла в самом горне уменьшится.

В этом отношении вдувание концентрата похоже на вдувание природного газа: если замена части кокса газом сбалансирована так, что конечная температура металла и шлака не изменяется, то в горн поступают более горячие материалы, а увеличение температуры материалов в самом горне будет меньше по сравнению с исходным вариантом плавки без газа. Такое изменение зональных балансов тепла не мешает применять газ в больших количествах, заменять газом, например, 20 % кокса. Очевидно, рассматриваемые изменения не мешают и вдуванию концентрата.

При вдувании угольной пыли тепловой баланс горна также ухудшается, так как горн вместо горячего кокса сверху получает холодную пыль снизу, с дутьем. Это не мешает вдуванию пыли в больших количествах.

Правда, при современной жесткоконсервативной доменной идеологии ухудшение теплового баланса одной из зон печи может вызвать множество возражений и опасений, даже если улучшается баланс других зон и печи в целом. Могут потребоваться дополнительные обсуждения этого вопроса.

Важный вопрос – как изменится доля косвенного восстановления? Эта доля может уменьшиться из-за уменьшения количества окатышей выше зоны плавления, но увеличится вследствие увеличения количества газообразного газа-восстановителя CO, который поднимается снизу. В целом такая доля может остаться практически неизменной.

Вдувание концентрата, как и вдувание угольной пыли, приведет к некоторому перераспределению температуры в самом горне печи при сохранении нужных средних значений. Вдувание пыли ускоряет горение и повышает температуру на первых участках факела дутья, что может стать опасным для фурмы. Пыль повышает температуру на первых, самых горячих участках факела, исходящего от фурмы, и понижает ее на последующих участках, для которых остается уже мало кислорода дутья. Вдувание концентрата здесь приведет к обратным изменениям. Если вдувание пыли увеличивает неравномерность распределения температуры в горне, то вдувание концентрата уменьшает эти неравномерности. Отметим, что при совместном вдувании концентрата и угольной пыли их противоположные влияния на распределение температуры в факеле должны нивелироваться, взаимно уничтожаться. Совместное действие приведет к меньшим изменениям, чем действие каждого из компонентов в отдельности. Если действует установка вдувания пыли, то целесообразно вдувать их вместе. При этом концентрат может по-прежнему просто всыпаться в поток дутья, или же может смешиваться с угольной пылью и вдуваться через те же форсунки, как и пыль.

При очень высоком нагреве дутья теоретически возможно припекание частиц концентрата к огнеупорам рекуператора или воздуховода. Высшие окислы железа, содержащиеся в концентрате, являются достаточно тугоплавкими; температура плавления магнетита Fe_3O_4 составляет 1594°C . Вюстит FeO имеет температуру плавления 1380°C и образует не столь тугоплавкие соединения типа фаялита $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, самые легкоплавкие эвтектики этой системы плавятся при 1178°C . Но в рекуператоре, в горячем воздухе нет условий для восстановления высших окислов железа, для образования вюстита и фаялита.

Частицы концентрата часто представляют собой *сростки*, в которых зерно магнетита соединено с одним или несколькими зернами минералов пустой породы. Если эти зерна легкоплавки, вероятность припекания возрастает. В целом такое припекание представляется достаточно маловероятным, опасным только для некоторых руд, и не столь вредным. При необходимости вероятность припекания можно снизить тем, что отсеять более крупную фракцию концентрата, перейти к более мелкой пыли и использовать ее на домне с не самым горячим дутьем и с большей скоростью продувки в рекуператоре.

Ниже рассматривается металлизация в пылегазовой взвеси концентрата в смеси с угольной пылью. Если металлизующуюся пылегазовую

смесь перегреть, то в принципе может начаться припекание частичек металла к футеровке рекуператора или спекание этих частичек в комки большего размера. В «застойных» участках каналов могут образоваться «настыли» спекшегося металла.

Если в пылегазовой взвеси избыток угольной пыли и идет плавка на чугун, то уже при 1200 °С в рекуператоре уже будут образовываться натеки или настыли чугуна, так как его температура плавления 1140 °С. Приведенные ниже расчеты выполнены для усредненной конечной температуры взвеси 1100 °С, но при плавке на чугун разумно не превышать 1000 °С, тогда как при плавке на сталь, при недостатке углерода, можно в ряде случаев нагревать взвесь до предельных температур рекуператора, например, до 1200 °С.

В порошковой металлургии для спекания железный порошок прессуют, а затем его крупинки в сжатом состоянии выдерживают, например, 4 часа при температурах 900-1200 °С. В рекуператоре будут лишь кратковременные и редкие столкновения крупинки в газовом потоке, поэтому опасность спекания частиц, очевидно, невелика, и обычно не потребуется понижать температуру рекуператора, чтобы предотвратить спекание.

Отметим, что и здесь получение безуглеродистого металла имеет преимущества, так как его температура плавления (1530 °С) почти на 400 °С выше, по сравнению с чугуном. Поэтому опасность расплавления крупинки металла в пылегазовой взвеси уменьшается, если убрать в этой смеси избыток углерода и завершать металлизацию косвенным восстановлением.

В рекуператоре возможно также оседание пыли из взвеси, например, на горизонтальных верхних поверхностях кирпичей, если в данной зоне поток медленный. Такую осевшую пыль можно «выдуть» кратковременным усилением продувки, если она не спеклась. В агрегатах, специально изготовленных для металлизации, можно уменьшить долю таких горизонтальных поверхностей, на которых может оседать пыль, а также обеспечить сужение сечения потока, повышенную скорость и турбулизацию газовых потоков на таких «опасных» участках. Если доменный рекуператор переводится на металлизацию в пылегазовой взвеси, то в конструкцию его кладки можно внести соответствующие коррективы во время ремонта агрегата.

«Опасным» может быть участок поворота потока от движения вниз на движение вверх. При достаточно малой скорости потока здесь может скопиться много осевшей пыли, и в пределе процесс может перейти даже в режим барботажа слоя пыли пузырями и струями газового потока. Если нет спекания пыли, то такой режим не опасен. Но если пойдет спекание металлизированных частиц, то в такой «застойной» зоне может даже образоваться «настыль» железа.

Наши эксперименты показали, что в пылегазовой взвеси ферромагнитные порошки могут вести себя иначе по сравнению с немагнитными. В

отличие от угольной пыли, порошки магнетита или железа могут флокулировать при продувке, собираться в флокулы, комочки, за счет магнитного взаимодействия между частицами порошка. Такая флокуляция изучена применительно к мокрой магнитной сепарации магнетита Fe_3O_4 , разработаны меры борьбы с ней. В нашем случае может возникнуть флокуляция пыли в газе. Чтобы избежать этого, можно вести основные процессы восстановления при температурах выше точки Кюри, выше области ферромагнетизма. Точка Кюри магнетита лежит при $570\text{ }^{\circ}C$, а у железного порошка – при $770\text{ }^{\circ}C$, несколько выше температуры начала быстрого восстановления железа углеродом.

Ниже обсуждается плавление металлизированного порошка на кирпичах насадки рекуператора, возможно образование настывлей за счет спекания частиц взвеси в области, предшествующей плавлению. Такие настывли можно расплавить кратковременным повышением температуры взвеси. И «выдувание» осевшей пыли, и плавление настывлей можно провести чисто газовым дутьем, не содержащим порошков.

Для пылегазовой взвеси сейчас обычно остается неосознанной сама возможность пропускания такой смеси через теплообменник или рекуператор и возможность проведения реакций в смеси за счет дешевого рекуператорного тепла. Не осознан тот факт, что интенсивные газовые потоки рекуператора способны переносить эту смесь во взвешенном состоянии, не допуская ее чрезмерного оседания или выпадения в каких-то зонах, причем металлургические реакции восстановления завершатся за несколько секунд. При этом можно металлизировать железорудный концентрат и без окускования сырья, и при полном сжигании топлива, и при глубокой утилизации тепла отходящих газов.

Вдувание в доменную печь опробовано для очень многих порошковых материалов, но, насколько нам известно, вдуваемое вещество почти всегда вводится уже в горячий поток дутья, обычно через фурму в факел в самой печи. Традиционно обычно не используется вдувание в поток дутья до фурм или в холодный воздух перед рекуператором, где порошки можно просто всыпать в газовый поток при нормальном давлении. Между тем этот вариант имеет важное преимущество: вдуваемое вещество прогревается дешевым рекуператорным теплом и вносит это тепло в горн, тогда как при вдувании прямо в печь порошок приходит в горн холодным.

Вследствие уменьшения количества окатышей в шихте станет меньше весь поток твердой шихты в шахте печи, и поэтому несколько понизится поглощение шихтой тепла отходящих газов. Может повыситься температура колошниковых газов и потери тепла с ними. Такой же эффект проявляется и при замене кокса угольной пылью. При вдувании пыли данные потери оказываются небольшими; очевидно, они будут невелики и при вдувании концентрата.

Вообще, ряд опасений, которые можно высказать по поводу вдувания концентрата, в той же степени относятся и к вдуванию угольной пыли, и опыт использования пыли показывает, что соответствующие отрицательные последствия будут не столь велики и при вдувании концентрата.

На процессах с вдуванием угольной пыли изучен ряд следствий замены кусковых материалов пылью примерно на 30 %. Поэтому на первой стадии можно отработать вдувание концентрата также до 30 % рудной компоненты. Можно рассчитывать, что вдувание концентрата примерно до 30 % всей рудной компоненты не приведет к существенным отрицательным последствиям и можно будет сэкономить $0,30 \cdot 0,25 = 0,075$ или 7,5 % себестоимости чугуна. При дальнейшем увеличении доли концентрата следует внимательно следить за изменениями температурного поля в печи и определять оптимальную долю концентрата эмпирически. Можно предполагать, что отрицательные последствия вдувания концентрата будут не слишком большими и при замене окатышей концентратом даже на 2/3. В этом случае вдувание концентрата даст экономический эффект порядка 15 % себестоимости чугуна.

Вдувание концентрата не получило распространения, явные выгоды этого вполне очевидного и простого приема сейчас часто остаются не осознанными. Это еще одно следствие современной идеологии. Доменный процесс изначально, с древности мыслили как продувку кусковой шихты, в которую и топливо и руда входят в виде кусков; обычно доменщики *мыслят шихтой*. Поэтому психологически сложно взяться за вдувание как угольной пыли, так и концентрата. Но использованию угольной пыли помог, очевидно, тот факт, что ее вдувание давно и широко используется в разных агрегатах теплоэнергетики, ее в огромных количествах сжигают в паровых котлах.

Вдувание концентрата не получило такой психологической «помощи извне» и поэтому преимущества этого приема обычно остаются неосознанными. Это можно рассматривать как еще один пример обсуждавшейся выше идеологической *поразительной слепоты*, которая наступает под давлением доменной идеологии и не дает возможности осознать преимущества этого простого и вполне очевидного приема.

Часто остается неосознанным тот факт, что частички концентрата или железа при достаточно малом размере могут быть в виде пыли, которая *висит* в воздухе, и лишь медленно оседает, легко уносится потоками газа. Часто представляют так, что частицы железа *тяжелые и упадут*, как болты или гайки. Но скорость падения частиц в газе лишь в несколько раз изменяется в зависимости от плотности, удельного веса материала. В то же время скорость падения на несколько порядков величины изменяется в зависимости от размера частиц, который входит в формулу Стокса в квадрате. Самые тяжелые металлы в виде тонкой пыли могут *висеть* в

воздухе, почти не оседая. Концентрат можно пропускать через рекуператор в виде пылегазовой взвеси, так как он легко уносится интенсивными газовыми потоками.

Если возможности реакций в факелах осознаны еще далеко не полностью, то возможности процессов в состоянии пылегазовой взвеси еще только предстоит осознать.

2.5. Предельный случай – плавка чугуна из одного концентрата

- Предложите вдувать в домну побольше концентрата.
- Доменщики взвоят! Скажут – это будет уже не доменный процесс!!

Из дискуссии

При вдувании угольной пыли обычное опасение доменщиков состоит в том, что из-за уменьшения доли кокса в шихте понизится ее газопроницаемость, наступит чрезмерное спекание и зависание. Из-за уменьшения числа «коксовых карманов» затрудняется прохождение газов. Доменщики хотели бы увеличить долю кокса в шихте, чтобы облегчить и сделать более ровным ее сход, повысить газопроницаемость.

При вдувании концентрата это пожелание можно выполнить с избытком. Теоретически можно увеличивать долю кокса в столбе шихты в пределе хоть до 100 %, если приближаться к полной замене окатышей вдуваемым концентратом. Правда, для адаптации к такому процессу будет полезно уже откорректировать профиль печи, как это часто делают при ремонте печи.

Сход такой «шихты» (кокса) будет идти без спекания и зависания, без резких колебаний, станет примерно таким же ровным, как при обжиге сухих материалов, например, при обжиге известняка. Полностью устраняются процессы спекания и, соответственно, зависания шихты. Варьируя подачу концентрата, можно очень быстро и в широких пределах регулировать температуру горна.

В таком гипотетическом процессе в шахте печи вообще не будет реакций восстановления. Если вдуваемый концентрат полностью расходуется в горне, не поступает в более высокие горизонты печи, то полностью прекратится утилизация химического тепла газов. Полностью прекратится косвенное восстановление, окисление газа до CO_2 в шахте печи. Колошниковые газы почти на 100 % будут уходить из печи в виде CO . В этих условиях уже заканчиваются возможности утилизации химической энергии отходящих газов методами шахтной плавки. Ухудшается и утилизация физического тепла, так поток шихты (кокса) в шахте имеет уже недостаточную теплоемкость.

При расчете расхода топлива в таком процессе можно принять, что в горне вступают во взаимодействие дутье и концентрат, пришедший с дутьем, при температуре $1200\text{ }^\circ\text{C}$; кокс прогревается в шахте и приходит в горн с

температурой 1300 °С, чугун и отходящие газы покидают горн (или «реактор печи») при температуре 1400 °С. При таком предельно неблагоприятном варианте расчетный расход углерода топлива достигнет 1100 кг/т (приложение, расчет 27). Такой расход кокса неприемлем, процесс станет экономически нецелесообразным.

Однако при таком варианте процесса намного уменьшаются физические и химические воздействия на кокс, и, соответственно, возрастают возможности замены кокса коксоподобным углем. Столб шихты над горном без рудных материалов станет легким; в нем совсем не будет расплавов и не будет их химических воздействий на куски кокса. Не будет реагирования кокса в косвенном восстановлении, в реакции газификации. В этом гипотетическом процессе будет неважно и поглощение физического тепла газов шихтой. Тепло потока газов здесь требуется лишь для прогрева опускающегося кокса. Высокий столб кокса над горном станет не нужным. Можно уменьшить высоту этого столба с 30 м, например, до (5-10) м.

Прекратятся химические воздействия на кокс в шахте печи и намного уменьшатся физические воздействия – истирание, пересыпание, уменьшится давление материалов сверху. При таких облегченных условиях работы кокс можно будет заменить тощим углем, полностью или частично. Сейчас такая замена выполняется в небольших количествах и с различными предосторожностями [26]. При достаточно полной замене кокса углем процесс будет выгоден и при расходе топлива 1100 кг/т. Во многих альтернативных процессах производства металла значительно больше топлива расходуется на получение чугуна, или даже на первую стадию этого процесса – на металлизацию.

В обсуждаемом процессе в нижней части доменной печи практически будет идти газогенераторный процесс на доменном дутье. В таких процессах сжигают уголь. Отличие от обычного газогенераторного процесса заключается в том, что здесь вдувается концентрат с «доменным» дутьем, и на днище печи будет стекать не только жидкая зола угля, но также расплавы чугуна и шлака.

К этому процессу можно подойти не со стороны домны, но со стороны газогенератора. Можно рассмотреть предложение вдувать железорудный концентрат с горячим дутьем в угольный газогенератор с целью получения чугуна. При использовании многих сортов угля такой процесс будет идти беспрепятственно и окажется экономически целесообразным. Практически можно будет, вероятно, некоторое количество окатышей давать и сверху в таком процессе. Такие окатыши восстановятся и расплавятся практически за счет энергии отходящих газов и не потребуют дополнительного топлива. В этом случае расчетный расход топлива будет соответственно ниже 1100 кг/т.

2.6. Вдувание угольной пыли с порошком концентрата

Каждый должен заниматься своим делом. Доменщики должны оберегать отлаженный режим процесса, давать чугун. Физхимики должны выявлять несообразности этого режима.

Из дискуссии

Если все же принимается решение о вдувании угольной пыли, приобретается и устанавливается соответствующее дорогое оборудование, то целесообразно вдувание пыли совместить с вдуванием концентрата, описанным выше. Концентрат, как и выше, может просто всыпаться в поток доменного дутья; при необходимости можно концентрат смешать с угольной пылью и подавать эту смесь через форсунки, которые сейчас предназначены для одной лишь угольной пыли.

Если вдувается один концентрат, то доля кокса в завалке лишь увеличивается, в пределах до непривычно больших значений. При вдувании концентрата и угольной пыли появляется возможность свободно выбирать желательное соотношение кокса и рудной компоненты в загрузке сверху, и в то же время выбирать желательное соотношение загрузки сырья сверху и вдувания его снизу. Эти две величины становятся независимыми, в отличие от варианта вдувания одного концентрата.

Тонкая угольная пыль может быстро поглотить почти весь кислород потока дутья от фурмы (факела) и дать газогенераторный газ (СО и Н₂). Есть данные, что тонкая пыль сгорает почти полностью уже на расстоянии 300 мм от среза фурмы. Тонкий порошок концентрата способен быстро поглотить «свою» часть этого восстановительного газа, давая капельки чугуна.

Факел с угольной пылью и концентратом способен работать в фурменном очаге домы и в массиве шихты почти так же, как и в пустом пространстве. Процесс в факеле горна будет подобен кислородно-факельной автогенной плавке меди.

Как уже отмечено, уменьшение количества твердой шихты приводит к уменьшению теплостойкости потока сырья в шахте и к некоторому повышению температуры колошникового газа, к увеличению потерь тепла с этими газами. В принципе доменная печь может производить чугун в основном из пылевидных компонентов, вдуваемых снизу; можно сократить долю кусковых материалов, например, до трети. В этом случае 2/3 чугуна в домне будет производиться **безкоксовым и безокатышевым** способом. Если сырье составляет 90 % стоимости чугуна, а пылевидное сырье вдвое дешевле кускованного, то общее удешевление всего чугуна составит $0,9 \cdot (2/3) \cdot (1/2) = 0,3$ или 30 %.

Правда, в этом случае температура колошниковых газов приблизится, видимо, к «температуре Мидрекс», то есть к 700 °С. Газы будут уходить из

печи с температурой например, $(500-600)^\circ\text{C}$. Как и в обычном доменном процессе, примерно до 700°C поднимающиеся газы охлаждаются в основном за счет поглощения тепла реакциями. Последующее поглощение тепла газов на нагревание шихты будет невелико из-за того, что поток этой шихты в предлагаемом варианте составит лишь треть обычной величины.

При вдувании $2/3$ сырья в пылевидном состоянии понизится также доля косвенного восстановления и $\% \text{CO}_2$. Расход топлива возрастет, и угольной пыли придется израсходовать несколько больше, чем будет сэкономлено кокса. Увеличение доли пылевидных материалов здесь снова ограничивается возможностями шахтной утилизации физического и, главное, химического тепла отходящих газов.

В мировой металлургии вдувание угольной пыли широко распространено¹. Сначала пыль вдували в виде малой добавки, которая не меняет суть процесса, его основные параметры. Но в процессе длительного постепенного совершенствования этого приема количество угольной пыли доводится в ряде случаев уже до 100-150 кг пыли на тонну металла, до 30 % всего топлива и даже больше.

Для удешевления процесса желательно иметь возможность использовать такой уголь и угольную пыль, которые содержат больше серы, чем кокс. Но если тепло в печи дешево, этот недостаток сырья можно компенсировать добавкой в шихту известняка или извести, а соответствующее увеличение расхода топлива покрыть добавкой угольной пыли.

Как обычно, желательно протекание реакций восстановления и горения преимущественно в твердом состоянии, нежелательно перемещение этих реакций в расплавы. Нежелательно попадание в шлак больших количеств порошкообразного концентрата и угольной пыли. В этом случае в шлаке пойдут реакции прямого восстановления с поглощением тепла и обильным газовыделением, что может привести к охлаждению шлака, его загустеванию, вспениванию и др. Потoki дутья с пылевидными материалами не должны направляться вниз, на поверхность шлаковых расплавов.

¹ В Японии в 2003 г. на эти цели израсходовано 7,68 млн т пылеугольного топлива [8, с. 168], в мире – около 40 млн т. Примерно 10 % всего расхода кокса в домнах заменяется угольной пылью.

2.7. Металлизация пылегазовой взвеси в рекуператоре. Получение порошка железа

И никаких тебе припеканий, зависаний-обрушений шихты, никаких расстройств плавки! Пылинки концентрата танцуют в потоке газа, все культурненько, все пристойненько!

Из дискуссии

Горение топлива в рекуператоре идет отдельно от процессов восстановления, служит лишь для нагрева кирпичной кладки, реакций газификации нет, поэтому ничто не мешает здесь сжигать топливо полностью до CO_2 и H_2O . К тому же рекуператоры можно отапливать почти любым, в том числе дешевым *энергетическим* топливом, например, доменным газом или дешевым энергетическим углем с повышенным содержанием золы и серы. Поэтому тепло рекуператора дешево. Как отмечено выше, в калькуляциях себестоимости чугуна расходы на отопление рекуператора часто даже не упоминаются, но тщательно анализируется расход кокса. Желательно выполнить металлизацию концентрата, основную металлургическую реакцию, за счет дешевого рекуператорного тепла. Доменщики прилагают много усилий для того, чтобы внести в печь больше рекуператорного тепла с дутьем; идет упорная борьба за каждые 10°C температуры дутья. Если вдуть в печь обычный концентрат, то поток дутья с горячим концентратом внесет в печь намного больше тепла, чем поток одного воздуха. По влиянию на энергетический баланс печи добавка концентрата эквивалентна повышению температуры дутья на несколько сотен градусов. Если же вдуть в печь не исходный, а металлизированный концентрат, то по энергетическому балансу это будет эквивалентно повышению температуры дутья, например, на 1000°C .

Возможен следующий процесс. В рекуператор вводится пылегазовая смесь концентрата и угольной пыли, взвешенных в потоке окиси углерода CO . Такая взвесь переносится в рекуператоре газами и прогревается. Когда смесь достигнет зоны «температуры Мидрекс» выше 720°C , будет достигнута высокая скорость реакции восстановления окислов углеродом. При дальнейшем нагреве из пылевидного концентрата за несколько секунд получится твердый порошок железа, а также сгорит соответствующее количество угольной пыли и выделится порция газообразных продуктов металлизации, в основном CO . Скорость реагирования газа будет больше, чем в домне, так как газ реагирует не с кусками шихты, а с пылевидными материалами, которые имеют большую поверхность реагирования. Газ прореагирует быстрее, чем в домне, быстрее, чем за 5-8 с. Видимо, для металлизации необязательно нагревание пылегазовой взвеси до наибольших температур доменного дутья порядка 1200°C . Ме-

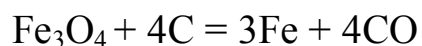
таллизация успеет пройти с достаточной полнотой (95 % и больше) и при более низких температурах; в агрегатах Мидрекс этот процесс завершается около 750 °С.

Полученный металлизированный порошок железа на выходе из рекуператора можно выделять из пылегазовой взвеси аппаратом «Циклон» в горячем состоянии. Для аппаратов «Циклон» характерна полнота очистки газа от обычной бытовой пыли порядка 95 % или отделение из взвеси 95 % газа. В нашем случае пыль крупнее и с большим удельным весом, поэтому можно рассчитывать на достаточно полное отделение порошка железа.

Если полученную пылегазовую взвесь охлаждать, не отделив газы металлизации, то возникает опасность обратного окисления восстановленного железа газом СО с выделением сажистого углерода по реакции $Fe + CO = FeO + C$. Если основная часть газов металлизации отделена, то оставшуюся взвесь высокой плотности можно охлаждать обычными способами, не опасаясь окисления железа ¹.

Газы металлизации (СО) после отделения порошка идут на отопление другого рекуператора. После сжигания и охлаждения газы, отдавшие химическую и физическую энергию рекуператору, прежде чем окончательно покинуть агрегат, проходят еще окончательную и более тщательную холодную очистку от остатков пылевидного железа, его окислов и угля, например, пропусканием через рукавные матерчатые фильтры или методами мокрой, а также электростатической пылеочистки. В этой части применимы технологии, которые используются для пылеочистки колошниковых газов в домне, а также технологии очистки воздуха от бытовой пыли. Перспективно электромагнитное выделение порошка железа и магнетита из газового потока. При этом железо будет еще и очищаться от остаточных немагнитных частиц угольной пыли. Выделенную пыль можно использовать в следующем цикле металлизации.

По стехиометрическому соотношению реакции



¹ Известно, что сажистый углерод выделяется при охлаждении на поверхности железа значительно легче, чем на других поверхностях. Часто говорят, что железо является катализатором реакции $2CO = C + CO_2$. В действительности железо здесь является не столько катализатором, сколько реагентом по реакции $Fe + CO = FeO + C$. Если выше «температуры Мидрекс» (720 °С) углерод восстанавливает железо, то ниже этой температуры, наоборот, железо восстанавливает углерод, окисляется СО с выделением сажистого углерода. Окисление железа углеродом, как и восстановление, может идти через газовую фазу: реакции $Fe + CO_2 = FeO + CO$ и $2CO = C + CO_2$ в сумме дают $Fe + CO = FeO + C$.

расчетный расход углерода составит 285 кг на тонну металла, если восстановление только прямое (до CO), и полностью отсутствует косвенное восстановление до CO₂. За счет дожигания полученного газа CO можно полностью обеспечить отопление рекуператора. Расход металлургического топлива можно сократить за счет развития процессов косвенного восстановления окислов газом CO. Если восстановление железа углеродом довести до равновесия около «температуры Мидрекс» (720 °C), то в газовой смеси будет примерно 40 % CO₂. В этом случае расчетный расход углерода в соответствии со стехиометрией реакции составит 200 кг/т.

Если скорость реакций вполне достаточна, то можно завершать процесс именно около равновесия при температуре около 750 °C, как в агрегате Мидрекс, и без избыточной угольной пыли. Если же скорость реакций окажется недостаточной, то можно повысить температуру, сохранить в пылегазовой взвеси избыток угольной пыли и закончить процесс, например, при 1100 °C, почти без косвенного восстановления и с газом, состоящим практически только из CO.

Полученный порошок железа можно использовать для тех же целей, как и металлизированные окатыши, в частности, для переплавки в сталеплавильном агрегате (при достаточно высокой степени металлизации). Порошок можно вводить в сталеплавильную ванну вдуванием, в частности, через устройства, которые устанавливаются на больших электропечах для вдувания углеродистых порошков. Порошок железа можно загружать также в завалку в пакетах, мешках. Горячий порошок железа может идти на горячее прессование брикетов; так прессуют горячие окатыши в процессе «Хилл-3».

Предлагаемый процесс можно рассматривать до некоторой степени как аналог металлизации окатышей в агрегате «Мидрекс». Его преимущества состоят в том, что вместо окатышей используется концентрат, который, например, вдвое дешевле; вместо природного газа используется более дешевая угольная пыль. Агрегат (рекуператор) проще и дешевле агрегата «Мидрекс» с его дорогой каталитической конвертацией газа.

Говорят, что при металлизации углеродом требуют решения две главные проблемы: Как нагреть? И как охладить? Рекуператор является удобным агрегатом как для нагрева, так и для охлаждения пылегазовой взвеси; он создан именно для таких процессов. Сами реакции обычно успевают пройти, если выполнен достаточный нагрев реагентов. Производительность такого агрегата, как и многих других, обычно будет лимитироваться его тепловой мощностью.

2.8. Переплавка металлизированного концентрата в доменной печи

Лучший агрегат для получения металла – рекуператор с пылегазовой взвесью! Сжигание топлива полное, сырье в два-три раза дешевле, чем в домне, агрегат – проще некуда! Все, что можно пожелать!

Из дискуссии

Металлизация за счет дешевого рекуператорного тепла выгодна и при получении жидкого чугуна. Известно, что показатели доменного процесса намного улучшаются, если в завалку добавляют металлизированное сырье, даже если степень металлизации его невелика и составляет, например, лишь 50 %. Вдувание в домну металлизированного концентрата даст больший эффект, так как, во-первых, он будет почти нацело металлизированным, и, во-вторых, горячим.

Если металлизированный концентрат с избыточной угольной пылью выходит из рекуператора при 1100°C со «своими» газами металлизации, то на 3 моля железа в этой взвеси приходится 4 моля CO, и плотность взвеси будет составлять примерно 0,5 грамма пыли на литр. После отделения от взвеси 95 % газов аппаратом Циклон плотность взвеси повысится до 10 г/л. Это меньше 1 % насыпной плотности данной пыли.

Если к этой взвеси с избыточной угольной пылью добавить доменное дутье, то можно сформировать факел горения. За счет тепла горения 120 кг/т угольной пыли до CO порошок железа прогреется от 1100°C до 1500°C и расплавится (см. приложение, расчет 10 и др.). По завершении горения получится газовый поток из CO с температурой 1500°C с каплями расплавов, которые налипнут в массиве шихты в натеки расплавов, стекающих сверху, а также на твердые куски. Для науглероживания полученного жидкого металла потребуется еще 40 кг/т углерода, и общий расчетный расход топлива в печи составит $120 + 40 = 160$ кг/т. С учетом 285 кг/т, которые расходуются на металлизацию в рекуператоре, общий расход угольной пыли составит 445 кг на тонну чугуна, полученного из металлизированного концентрата. Это примерно соответствует обычному расходу кокса.

Если не отделять основную часть газов металлизации (CO) аппаратом Циклон, вдувать в домну все газообразные продукты металлизации из рекуператора, то придется нагревать от 1100 до 1500°C большой объем газов. Расчетный расход углерода топлива на процесс горения достигнет 320 кг/т, а с учетом науглероживания потребуется 360 кг/т. Такой факел будет производить большое количество газообразной горячей монооксида CO с температурой 1500°C . В обычной домне такие газы образуются в горне и восстанавливают и нагревают окатыши в шахте печи. Можно разрабатывать

способы такого же использования в шахте печи и тех газов CO, которые образуются при плавке металлизированного концентрата в факеле горения пылегазовой взвеси. Образующиеся в факеле горячие газы CO будут способствовать восстановлению окатышей в шахте и помогут выплавке обычного чугуна из окатышей на коксе. Если угольную пыль в пылегазовой взвеси давать с избытком, то она будет поглощать основную часть кислорода дутья и уменьшит горение кокса.

В доменной печи пойдут параллельно два процесса: обычная выплавка чугуна на коксе и получение чугуна из металлизированного концентрата на угольной пыли. В печи сжигание топлива на чугун из концентрата (120 кг/т) примерно в 4 раза меньше, чем на обычный чугун, если основная часть газов металлизации отделяется. На тот же объем дутья можно получить в несколько раз больше чугуна и, соответственно, повысить производительность печи при той же газопроницаемости. Целесообразно повышать долю чугуна, получаемого из металлизированного концентрата, например, до 60 %. Такой чугун будет стоить примерно в два раза дешевле обычного.

Доля чугуна, получаемого из пылевидных материалов, лимитируется возможностями шахтной утилизации энергии отходящих газов. Как в обсуждаемом процессе, так и в двух предыдущих, при чрезмерной доле пылевидного сырья будет повышаться температура колошниковых газов и, что особенно важно, будет понижаться %CO₂, доля косвенного восстановления. При использовании угольной пыли целесообразно было бы сверху загружать только окатыши, как в агрегате Мидрекс. Кокс генерирует CO, окатыши – CO₂ по реакциям восстановления. Если в шахте не будет кокса, будут лишь окатыши, то %CO₂ не только не уменьшится, а даже возрастет по сравнению с домной, даже при большой доле пылевидного сырья. Это приведет к уменьшению расхода топлива.

Чтобы плавить в домне концентрат, металлизированный в рекуператоре, потребуется усложнить систему рекуператоров и трубопроводов. Потребуются отдельные рекуператоры для нагревания дутья и для металлизации концентрата, а также отдельные трубопроводы для подвода к фурмам горячего дутья и горячей пылегазовой взвеси (или один трубопровод, разделенный на две параллельные части). Вдувание пылегазовой взвеси можно организовать так же, как сейчас выполняется вдувание природного газа – через трубу, вставляемую в фурму. Технически вдувание газа или пылегазовой взвеси проще, чем вдувание плотной угольной пыли.

Можно доменное дутье и пылегазовую взвесь вдувать также через отдельные фурмы, расположенные так близко, чтобы их факелы внутри печи сливались (или пересекались) и образовывали единый фурменный очаг, «газовый мешок» диаметром порядка 2 м. В таком очаге произойдет смешивание и реагирование компонентов.

Возможно, доменщики скажут, что это будет уже не доменный процесс, и откажутся даже обсуждать его. Но если раньше будет отлажено вдувание концентрата с угольной пылью, рассмотренное выше, а также металлизация концентрата в рекуператоре, то предлагаемый процесс будет выглядеть уже вполне естественным следующим шагом.

2.9. Скорость реакций

Рассуждать легко. Наверное, автор сам никогда ничего не внедрял.

Из дискуссии

Важно обеспечить достаточную скорость металлизации в пылегазовой взвеси и высокую конечную степень металлизации получаемого порошка. Чтобы такой порошок был пригоден для сталеплавильного процесса, необходима степень металлизации 85-95 % при общем содержании металлического железа $Fe_M = (80-93) \%$. Если работать с суперконцентратом и обеспечить степень металлизации 98-99,5 %, достигнуть содержания металлического железа $Fe_M = (98-99) \%$, то полученный порошок будет пригоден даже для порошковой металлургии. При переплавке в домне хорошие результаты дает шихта даже при низкой степени металлизации 40-50 %, которая содержит (38-46) % металлического железа [37, с. 15].

Реакция металлизации идет через газ [17]. На поверхности крупинок угля генерируется восстановительный газ по реакции газификации, состоящий почти на 100 % из CO. На крупинках восстанавливаемого железа, которые соответствуют системе (Fe/FeO), идет реакция металлизации; здесь в равновесии от 60 до 75 % CO (рис. 1.1). За счет разности концентраций идет диффузия CO в газе от частиц угля к частицам концентрата. Скорость реакции будет больше в том агрегате, где выше удельная поверхность частиц и меньше дистанция диффузии, то есть среднее расстояние между частицами.

Скорость реагирования *газа* в рекуператоре, то есть скорость изменения концентраций реагентов в *газе* могут быть близкими к соответствующим величинам в агрегате «Мидрекс» или в домне. Внешняя поверхность кусков кокса и окатышей, приходящаяся на единицу газа в домне, примерно такая же, как и удельная поверхность реагирования для единицы объема газа в обсуждаемой пылеугольной взвеси при «естественной» плотности взвеси порядка 0,5 г/л. Расстояния между частичками угольной пыли и концентрата во взвеси меньше, поэтому диффузия пойдет быстрее. Во взвеси нет медленной внутренней диффузии внутри окатыша или куска кокса. Это позволяет сделать вывод, что в рекуператоре можно получить достаточно высокую скорость металлизации, которая по изменению концентраций в газе будет не ниже, чем в домне. Если время пребывания взвеси в рекуператоре будет примерно таким же, как время пребывания газов в домне или в агрегате

«Мидрекс», то есть, например, 5-10 с, то газы прореагируют примерно в той же степени. Это время реагирования намного больше времени реакций в факелах или времени металлизации концентрата в агрегате Циклон.

Если процесс лимитируется диффузией в твердой фазе, то время реагирования частицы диаметром D пропорционально D^2 . Размер крупинки концентрата $D = 20$ мкм в 10^3 раз меньше, чем у окатыша ($D = 2$ см), и в таком диффузионном режиме крупинка должна прореагировать в 10^6 раз быстрее окатыша, то есть практически мгновенно¹.

Опыт реакций в факелах также убеждает в том, что реакции тонких порошков могут протекать быстро, за короткое время прохождения частицами порошка длины факела, и часто составляет несколько сотых секунды. Реакции горения меднорудного концентрата или тонкой угольной пыли в кислородном факеле заканчиваются, например, за время порядка нескольких сотых секунды. В обсуждаемой пылегазовой взвеси, прокачиваемой через рекуператор, время реагирования больше, например, на 2 порядка величины (10 с).

Пылегазовая взвесь, полученная металлизацией магнетита, содержит 1,33 моля СО на моль железа. Если полученный порошок металлизированного концентрата (порошок железа) взвешен в «собственном» газе СО, который образовался при металлизации этого концентрата, то плотность твердого вещества составит около 0,5 г/л, что примерно в 2 000 раз меньше, чем в массиве доменной шихты. Соответственно, время **металлизации окислов** будет в 2000 раз меньше, при той же скорости реагирования *газа*. Если в домне металлизация занимает (4-8) часов или (7200-14 400) секунд, то в рекуператоре она завершится за (3,6-7,2) секунды. Производительность такого рекуператора будет примерно такой же, как и домны или агрегата «Мидрекс» равного объема.

В простейшем случае можно по ходу металлизации не добавлять и не убавлять реагенты, работать с таким объемом газа, который сам получается при металлизации. Но при необходимости плотность пылегазовой взвеси можно увеличивать, можно на разных стадиях металлизации отделять выделяющиеся газы (СО) аппаратами Циклон. Наиболее медленной и трудной стадией металлизации является отнятие от железа нескольких последних процентов кислорода, увеличение степени металлизации от 90 до 95, 98 % и больше. Выше обсуждалось отделение газов металлизации после того, как взвесь пройдет рекуператор, и повышение плотности взвеси в 20 раз. Можно эту операцию провести раньше, и конечную самую трудную стадию метал-

¹ Есть данные, что мелкие частицы концентрата, которые за несколько секунд проходили лабораторную печь Таммана с потоком газа, на выходе оказывались восстановленными, металлизированными. В печи Таммана графитовая трубка, как и угольная пыль, создает атмосферу, состоящую в основном из СО.

лизации проводить с взвесью при плотности не 0,5 г/л, а 10 г/л. За счет этого возможная скорость реакции увеличится в 20 раз вследствие увеличения реакционной поверхности; кроме того, уменьшится дистанция диффузии, то есть среднее расстояние между частицами.

Теоретически плотность пылеугольной взвеси в пределе можно увеличить и в 1000 раз и приблизиться, по порядку величины, к плотности шихты в домне. В этом случае частицы взвеси могут находиться в реакционной зоне рекуператора примерно столько же времени, как окатыши в домне или в агрегате Мидрекс, и реагировать несколько часов.

Реакции можно ускорять также за счет увеличения давления газа, большей турбулизации газовых потоков, увеличения температуры. Если температура на выходе будет 1100 °С, то это уже намного выше «температур Мидрекс» (720 °С), и реакции могут идти значительно быстрее, чем в агрегате Мидрекс. Скорость металлизации можно также увеличить за счет перехода к более мелким частицам взвеси, если отбирать для металлизации более мелкие фракции концентрата.

Чаще всего, вероятно, не потребуются каких-либо специальных мер по ускорению реакций. Как обычно, реакции успеют пройти, если обеспечен нужный нагрев. Производительность агрегата будут лимитироваться его тепловой мощностью. Эта мощность у доменного рекуператора нередко больше, чем у самой домны. Рекуператорное тепло, поступающее с горячим дутьем, больше тепла горения топлива в печи (расчёт 1 приложения). Но при необходимости есть широкие возможности ускорения реакций, перечисленные выше. Если реакции сильно отстают от прогревания взвеси, то можно намного ускорить реакции, например, за счет повышения плотности взвеси.

Тепло рекуператора по крайней мере в 10 раз дешевле, чем тепло горения топлива в домне. Если же все, или почти все тепло для получения металла обеспечивается рекуператором, процесс получается эффективным по теплотехнике.

2.10. Металлизация в теплообменнике

Если предложишь последовательную продувку, то доменщики посмотрят на тебя как на инопланетянина.

Из дискуссии

Нагревание пылегазовой взвеси можно значительно интенсивнее выполнять в теплообменнике, если температура не слишком высока. Даже в простом стандартном чугунном теплообменнике можно нагреть пылегазовую взвесь до «температуры Мидрекс» порядка 750-800 °С и провести металлизацию концентрата. Теплообменники со стальными стенками способны дать более высокий нагрев, особенно при покрытии стенок жаро-

стойкими эмалями, защищающими сталь от окисления. Теплообменник может представлять собою ряд плоских стальных пластин. В четных промежутках между ними могут двигаться нагреваемые газовые смеси, а в нечетных навстречу нагреваемой смеси – горячие продукты дожигания газов металлизации. Конструкция должна предусмотреть несколько «колен» движения взвеси и газов, например, вверх и вниз, чтобы обеспечить высокую скорость движения газов и надежное увлечение твердых частиц взвеси газовыми потоками.

Чтобы выполнить нагревание взвеси до наиболее высоких обсуждаемых температур порядка 1100 °С, можно стальные стенки теплообменника заменить керамическими стенками с оптимальной толщиной; такие стенки способна изготавливать современная промышленность огнеупорных изделий. Возможен теплообменник, у которого керамические стенки в зоне самых высоких температур и стальные стенки в области несколько меньших температур. Возможны и комбинации теплообменника с рекуператором, который обеспечивает окончательный нагрев до наиболее высоких температур.

В целом имеется много возможностей заменить громоздкий современный доменный рекуператор более компактным агрегатом с более интенсивными процессами теплообмена, с меньшими потерями тепла, с более низкой температурой отходящих газов.

Часто на заводах целесообразно металлизировать для переплавки сравнительно небольшие количества накапливающихся пылевидных отходов, например, колошниковой пыли, измельченной окалины, шлама и др. Предлагаемый способ удобен тем, что такой агрегат металлизации, в отличие от существующих установок металлизации, может быть прост, дешев и сравнительно невелик по размерам. Агрегат металлизации может состоять из теплообменника, вентилятора с всыпанием порошков и пылеуловителя «Циклон» для выделения из газа полученного порошка железа. Такой способ целесообразен для небольших производств, например, для металлизации колошниковой пыли в доменном цехе.

Как отмечено выше, есть ряд процессов, в которых нагрев неподвижных кусковых материалов идет за счет теплопередачи через стенку из огнеупорных материалов [47, 48], как в теплообменнике или в рекуператоре. Были попытки построить агрегат, у которого в центральном корпусе прогревается и металлизуется шихта, а в кольцевом пространстве вокруг этого корпуса идет горение топлива. В процессах типа Хоганесс, в коксовых батареях слой сыпучих толщиной порядка 20 см прогревается, например, сутки. Теплопередача в потоке пылегазовой взвеси идет намного быстрее, особенно при турбулентном течении газа. Время прогрева пылегазовой взвеси в рекуператоре или в теплообменнике, как и время прогрева воздуха, составит не сутки, но лишь несколько секунд. Теплопередача в потоке пылегазовой взвеси не будет лимитировать процесс.

2.11. Факельная плавка чугуна

Понятно, что это можно сделать, это даже неинтересно обсуждать. Тут интересен другой вопрос: почему это никто не сделал? Психология – дело тонкое.

Из дискуссии

В процессе переплавки металлизированного концентрата, описанном выше, основной функцией доменной печи становится плавка металлизированного концентрата на чугун. Основная часть всего необходимого тепла процесса сообщается металлу в рекуператоре при металлизации и нагреве до 1100 °С, в доменной печи остается добавить еще менее 10 % всего тепла. Параллельная обычная выплавка чугуна из кусковой шихты менее экономична, поэтому от нее полезно избавиться полностью.

Факел, переплавляющий металлизированный концентрат в чугун, может работать не только в массиве доменной шихты, но и в «пустом» пространстве. Чтобы обеспечить достаточно полное попадание крупинки или капелек металла из факела в расплавы ванны, можно использовать приемы, отработанные для этих целей в кислородно-факельной автогенной плавке жидкой черновой меди из медного концентрата. В одном из вариантов этой плавки факел с капельками жидкой меди вдувается в ванну с расплавами. Так работают, в частности, печи завода в г. Алмалык.

Чтобы перейти к факельной плавке чугуна, нужно сделать домну «пустой», без кусковой шихты. Пылегазовую взвесь металлизированного концентрата с угольной пылью можно, как и выше, подавать через те же фурмы, как и доменное дутье. Пылегазовая взвесь может подаваться, как и природный газ, через центральную трубу, вставленную в фурму для доменного дутья. Фурмы и факелы полезно сделать почти вертикальными, немного наклонными (рис. 2.1).

Соответствующий наклон фурм может обеспечить циркуляцию расплавов как по радиусу, так и по окружности горна, хорошее перемешивание ванны. Как и выше, потребуется сжечь в факелах 120 кг/т угольной пыли для расплавления металлизированного концентрата и нагревания расплава до 1500 °С. Факелы должны быть несколько заглубленными в расплавы, чтобы обеспечить хорошее поглощение капельного металла и хорошую теплоотдачу от газов к расплавам.

При хорошем перемешивании ванны можно, например, в четные фурмы вдувать металлизированный концентрат, а в нечетных сжигать угольную пыль для прогревания ванны. Такие специализированные фурмы можно точнее отладить каждую на свою задачу. Усреднение металла по температуре и составу произойдет за счет перемешивания ванны.

В печи расход топлива (120 кг/т) и дутья в данном случае невелик, «газопроницаемость» пустого агрегата велика, не будут лимитировать процесс.

Поэтому удельная производительность агрегата, которая в домне выражается коэффициентом КИПО, может быть большой, а сам агрегат может быть значительно меньше, чем домна при той же производительности.

Фурму с доменным дутьем практически невозможно сделать подвижной, поэтому при накоплении в ванне расплавов высота фурм над ними будет уменьшаться. Условия контактирования газового факела и расплавов можно регулировать при этом за счет изменения интенсивности дутья. Можно чаще выпускать металл и шлак, чтобы поддерживать высоту фурм над расплавами в нужных пределах. Можно поддерживать в основном корпусе постоянный уровень расплавов, а их избыток по мере накопления спускать в дополнительный выносной горн – отстойник.

В другом варианте (рис. 2.2) предлагается «конвертерная» компоновка фурм. Доменное дутье и пылегазовая взвесь подаются через систему фурм 1 в центре такого «конвертера». От среза фурмы исходят по радиусам несколько наклонных факелов, перемешивающих расплавы. За счет тяги котла-рекуператора в основном корпусе 2 можно поддерживать небольшое разрежение в несколько мм ртутного столба и тем самым предотвращать выбросы пламени из агрегата наружу.

Преимущество такой компоновки состоит в том, что основной корпус 2 можно сделать подвижным, как и у обычного конвертера. Можно варьировать высоту фурм над расплавами за счет поднимания или опускания основного корпуса 2 самого агрегата при неподвижной системе фурм с трубопроводами от рекуператоров.

Ниже обсуждается переход к сталеплавильной футеровке в таком агрегате и получение в нем стали. При достаточно большом опускании корпуса агрегата 2 в него можно вводить и механизмы для правки сталеплавильной футеровки торкретированием и другими способами, когда этот корпус пустой. Другой вариант – введение в агрегат таких механизмов через специальный люк.

Отходящие газы можно выпускать в котел-утилизатор, как и в случае кислородного конвертера. Объем этих газов не столь велик, и можно примириться с тем, что эти газы не используются далее непосредственно для получения металла. Объем используемого доменного дутья здесь также не столь велик, поэтому можно заменить его кислородным дутьем. Расчетный расход кислорода составит $110 \text{ м}^3/\text{т}$. В процессах типа Ромелт часто расходуется в 7-9 раз больше кислорода. При кислородном дутье рекуператоры могут работать только на металлизацию концентрата и не нужна вторая линия трубопроводов для горячего дутья.

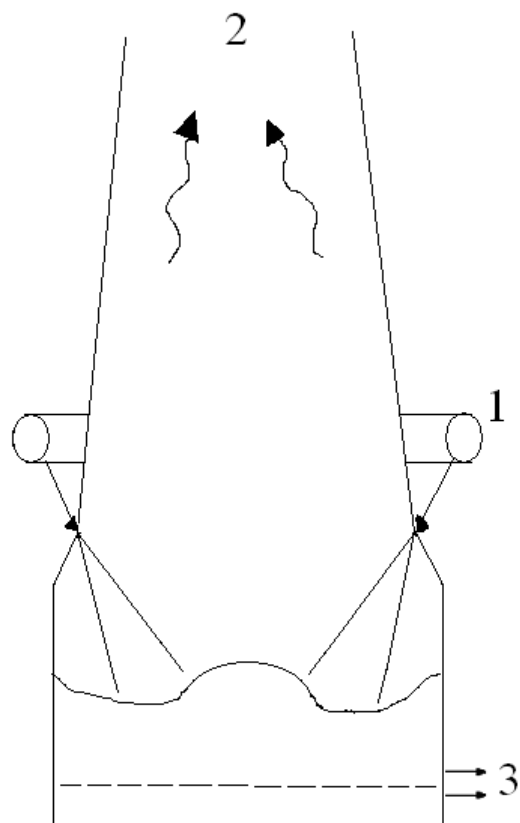


Рис. 2.1. Схема плавки пылевидного концентрата, металлизированного угольной пылью в пылегазовой взвеси. «Доменная» компоновка факелов:
 1 – факелы, 2 – отходящие газы, 3 – летки

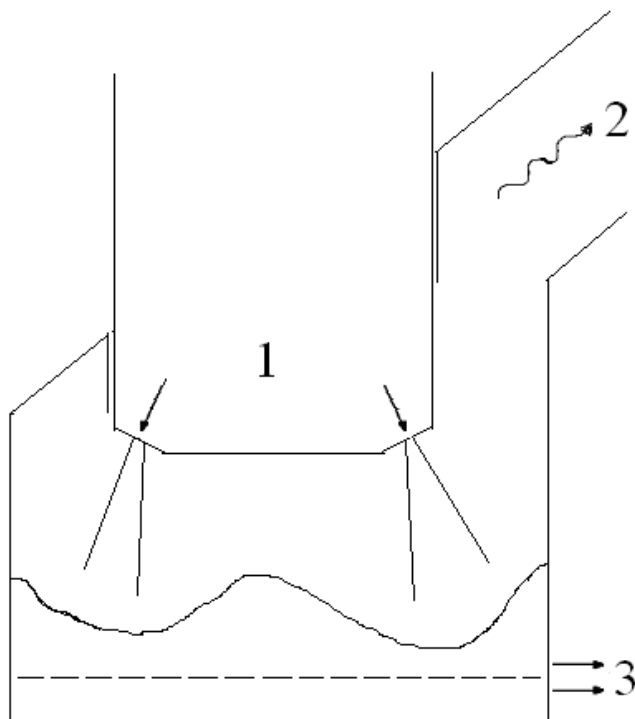


Рис. 2.2. Схема плавки пылевидного металлизированного концентрата при «конвертерной» компоновке факелов:
 1 - факелы, 2 - отходящие газы, 3 - летки

2.12. Плавка стали из пылевидных материалов

Металлурги привыкли мыслить кусками шихты. Возможности реакций порошков в факелах еще только осознаются, а возможности пылегазовых взвесей еще предстоит осознать

Из дискуссии

В домне движение материалов неустойчиво и создает много неожиданностей и «капризов»; к тому же почти нет возможности быстро повлиять на температуру в горне. В предлагаемых схемах движение пылегазовых взвесей описывается хорошо известными и достаточно точными уравнениями аэродинамики. Варьируя соотношение топлива, дутья и концентрата в факеле, можно быстро и эффективно (как в газовой горелке) регулировать тепловой режим. Можно быстро изменять температуру в агрегате, а также окислительно-восстановительный потенциал газов и расплавов. В отличие от домны, остановленный агрегат можно запустить снова, например, за 10 минут, но не за месяц.

Высокая управляемость таких процессов позволяет, в частности, легко перейти от плавки на чугун к плавке на железо или сталь. Если от избытка угольной пыли в факелах перейти к небольшому ее недостатку, сжигать топливо почти на 25 % до CO_2 , то вместо чугуна получится малоуглеродистое железо. Чтобы газы факела были восстановительными по отношению к железу, но окислительными по отношению к углероду, требуется содержание от 1 % до 25 % двуокиси CO_2 . Это видно из диаграммы рис. 1.1. Конечно, при этом нужно иметь уже не доменную, а сталеплавильную футеровку ванны огнеупорами.

Если перейти к сжиганию топлива на 25 % до CO_2 , то выделяется значительно больше тепла, и расчетный расход углерода топлива на прогревание и плавление металлизированного концентрата в факеле составит уже не 120 кг/т, как при избытке углерода, а лишь 45 кг/т (см. приложение). Выплавка железа и стали здесь потребует меньше топлива и кислорода, и будет дешевле, чем выплавка чугуна.

Если использовать не горячий металлизированный концентрат из рекуператора при 1100 °С, а холодный порошок концентрата, то в этом процессе потребуются сжечь уже не 45, а 100 кг углерода (угольной пыли) на тонну металла.

Практически при плавке на железо целесообразно не отделять газы металлизации после рекуператора, а дожигать их в факелах (см. рис. 2.1 и 2.2), тогда здесь не потребуется расходовать угольную пыль. Расчет (см. приложение) приводит к выводу, что в полученных газах металлизации достаточно дожигать в факелах 15 % CO до CO_2 . Если уже в рекуператоре к концу металлизации образуется 10 % CO_2 , то после дожигания 15 % газов в факелах как раз и получатся 25 % CO_2 . В этом случае общий

расчетный расход металлургического топлива (пыли) на получение тонны металла составит лишь $285/1,1 = 260$ кг/т. Получается очень экономичный процесс по этому показателю. Правда, при этом на отопление рекуператоров потребуется расходовать какое-то иное *энергетическое* топливо со стороны, например, излишки доменного газа на заводе.

Если обеспечено хорошее перемешивание ванны факелами дутья, то в таких агрегатах можно переплавлять и лом черных металлов, требуется лишь предусмотреть соответствующий загрузочный аппарат. При недостаточном перемешивании ванны скопления твердого металла могут долго оставаться нерасплавленными на дне ванны, как это бывает при неудачном ведении плавки в электропечи. На переплавку тонны лома, как и на переплавку тонны холодного металлизированного концентрата, также потребуется сжечь примерно 100 кг угольной пыли на 75 % до CO и на 25 % до CO₂.

Если факел дутья «не пробивает» слой шлака, не контактирует с жидким металлом, а лишь греет шлак, то в таком факеле можно сжигать угольную пыль и газы более полно, не на 25 %, но примерно на 80 % до CO₂. В твердом состоянии газы окисляют FeO до Fe₃O₄ лишь тогда, когда содержание CO₂ больше 80 % (см. рис. 1.1); расплавленный шлак также не будет заметно окисляться при содержании CO₂ до 80 %. Такой факел даст примерно в два раза больше тепла, чем при 25 % CO₂ (см. раздел 1.6 и табл. 1.1). Полученный расплав малоуглеродистого железа можно превратить в сталь простой добавкой углеродистых материалов порядка 10 кг/т для среднеуглеродистых марок стали. Вместе с углеродом при необходимости можно добавлять легирующие добавки и раскислители. Сейчас такие добавки углерода и легирующих нередко выполняют даже в ковше, уже после выпуска металла из электропечи.

В агрегате по схеме рис. 2.1 можно накопить жидкий металл, затем спустить первичный (или «доменный») шлак, добавить углерод и легирующие и выпустить сталь. При необходимости можно в конце такой плавки перейти к более восстановительному дутью и за счет этого уменьшить потери железа со шлаком. Можно также перед выпуском наводить рафинирующий шлак и выполнять другие процессы рафинирования, улучшения качества стали. В отличие от современного кислородного конвертера и электропечи, здесь возможно сравнительно дешевое отопление (прогревание) жидкой ванны за счет сжигания топлива, поэтому можно без больших затрат выполнять продолжительное и глубокое рафинирование металла.

Как уже отмечено выше, в обычном кислородном конвертере практически нельзя выполнять длительные операции рафинирования стали; после выгорания легирующих и углерода металл начнет остывать. В электропечи тепло дорого, и длительное рафинирование также обычно нецеле-

сообразно; электропечь часто используют лишь для расплавления металла, а уже добавку легирующих дают в ковш. Кроме того, в электропечи и в кислородном конвертере тепло выделяется в небольшой и очень горячей зоне, что может привести к большому испарению металла.

Плавка на легкокоплавкий чугун была разумна в средневековье, когда практически не умели работать с температурами значительно выше 1200 °С. Сейчас важно увеличить возможности дожигания газов, поэтому предпочтительна первичная плавка на малоуглеродистое железо.

Отметим, что почти безуглеродистое железо и само по себе обладает ценными свойствами. Это мягкий чистый металл, который легче, чем сталь, поддается многим видам механической обработки. Такое железо может найти многие применения. Но сейчас подобный металл, например, *карбонильное железо*, получают обычно лишь специальными дорогими способами гидрометаллургии и в небольших количествах. Этот металл сейчас является редким.

2.13. Другие варианты плавки металлизированного концентрата. Химическая утилизация энергии отходящих газов

Вот и рисуйте себе воображаемые агрегаты,
бумага терпит! А в домну не лезьте!!

В. Пузанов

В доменную печь нельзя вдуть слишком много концентрата, угольной пыли или металлизированного концентрата из-за того, что здесь ограничены возможности доменной (или шахтной) утилизации энергии газов. Если увеличивается доля чугуна, получаемого из пылевидных материалов, и соответственно уменьшается поток кусковой шихты в шахте печи, утилизация химического и физического тепла газов становится хуже. Если весь чугун получать в горне из вдуваемого концентрата и угольной пыли, и использовать только кислородное дутье, то полностью исчезнет утилизация энергии газов и приход тепла с дутьем. Расчетный расход топлива станет неприемлемо большим, 2700 кг/т, как и для других процессов без утилизации энергии газов.

В домне газы СО, исходящие из горна, примерно на 25 % окисляются до СО₂ в шахте печи; газы приближаются к равновесию с системой Fe-FeO. Здесь утилизируется примерно четверть химического тепла газов и основная часть их физического тепла. Если в печи оставить шихту только в горне, сделать шахту пустой, то практически не будет утилизации энергии газов, расчетный расход топлива снова достигнет неприемлемо большой величины 2700 кг/т, тогда как при существующей утилизации как расчетный, так и реальный расход топлива составляет примерно 500 кг/т.

Однако ради такой шахтной утилизации энергии газов приходится готовить хорошо окускованную шихту и тратить на это примерно половину стоимости чугуна.

Чтобы продвинуться дальше по линии пылегазовой металлургии, нужно отладить другую, более дешевую и более эффективную *химическую утилизацию* энергии газов. Такую утилизацию, как и восстановление, также можно выполнить в пылегазовой взвеси. Газы, отходящие из ванны с расплавами или из горна печи, содержат окислы углерода в основном в виде СО и имеют температуру примерно 1500 °С. За счет энергии этих газов можно выполнять прогрев и частичную металлизацию пылевидного концентрата, если в отходящие газы ввести этот пылевидный концентрат.

Рассмотрим процесс, в котором пылегазовая взвесь концентрата и угольной пыли проходит металлизацию в рекуператоре. Затем в горне «пустой» доменной печи из этой смеси формируются факелы горения, в которых горит угольная пыль или газы металлизации в кислороде, как в схеме рис. 2.1. Смесь прогревается в факелах горения от 1100 до 1500 °С и вдувается этими факелами в ванну в виде капелек расплавов.

Следующую порцию железорудного концентрата и часть угольной пыли, предназначенных для нового цикла металлизации, можно в исходном холодном (0 °С) состоянии вводить в газы, исходящие из металлургической ванны. Количество добавляемой угольной пыли целесообразно подбирать с таким расчетом, чтобы в результате получилась пылегазовая взвесь почти без избыточного углерода, близкая к равновесию при температуре немного выше «температуры Мидрекс», например, около 750 °С. При этих температурах процессы металлизации идут достаточно быстро, поэтому газ в пылегазовой взвеси приблизится к равновесному составу 40 % СО₂ и 60 % СО. При избытке углерода получилось бы слишком много СО.

Концентрат и угольную пыль в отходящие газы можно вводить несколько выше горна в виде пылегазовой взвеси при повышенной плотности, например 50 г/л, в 100 раз больше, чем у взвеси, получаемой при металлизации (0,5 г/л). Такая сравнительно плотная пылегазовая струя при соответствующей скорости будет способна пройти до окончательного разрушения значительное расстояние, например, до оси «пустой» домны. Можно обеспечить достаточно равномерное распределение пыли по радиусу печи.

Взвесь можно готовить в смесителе, всыпая в газовую струю СО пылевидные материалы; необходимый газ СО удобно взять в рекуператоре, где идет металлизация. Введение взвеси подобно вдуванию газа, причем его объем примерно в 100 раз меньше, чем объем обычного доменного дутья. Поэтому данная операция будет сравнительно недорогой.

Всем факелам в домне можно придать такое направление, чтобы поднимающиеся газы двигались к колошнику по спирали и с повышенной

скоростью. Такие потоки газа лучше удержат твердые частицы взвеси. В пустом корпусе домы можно добавить к стенкам специальные «ребра», чтобы усилить спиралеобразную циркуляцию газов. В последующем можно придать этому пустому пространству, унаследованному от шахты доменной печи, другие формы, более соответствующие задачам проведения реакций в пылегазовой взвеси.

Пылегазовая взвесь с температурой 750°C , получаемая при утилизации энергии газов, выводится из печи через колошник. Далее из взвеси аппаратом Циклон выделяется основная часть газов и направляется на дожигание в тот рекуператор, который в данный момент прогревается, отапливается. К оставшейся взвеси частично металлизированного концентрата добавляется угольная пыль, и эта смесь направляется на окончательную металлизацию и прогрев до 1100°C в другой рекуператор, работающий на металлизацию. После металлизации пылегазовую взвесь можно вдувать в ванну агрегата, затем снова добавлять в отходящие газы новую порцию концентрата и угольной пыли для утилизации энергии газов и т. д.

В таком агрегате цикл будет состоять из двух стадий:

1) нагревание исходного концентрата и предварительная частичная металлизация его за счет утилизации энергии горячих газов, уходящих из ванны;

2) нагревание до 1100°C и окончательная металлизация концентрата угольной пылью почти до 100 % в рекуператоре, затем еще прогревание смеси в факеле дожигания газов от 1100 до 1500°C и вдувание полученных капелек металла в ванну с расплавами.

Производительность может быть высокой, так как в этой схеме (в пустой домне) нет затруднений с газопроницаемостью агрегата.

В агрегате с доменной футеровкой так можно вести кислородно-капельную плавку на чугун, при сталеплавильной футеровке – плавку на железо или малоуглеродистую сталь, а далее получать нужный состав металла сталь добавкой углерода. Получится кислородно-факельная плавка стали с металлизацией в рекуператоре и с химической утилизацией энергии газов. Агрегат может иметь схему рис. 2.1 или рис. 2.2 с той разницей, что отходящие газы имеют температуру не 1500 , а около 750°C , и направляются не в котел–утилизатор, а на разделение в агрегат Циклон.

При расчете расхода топлива оказываются промежуточными и сокращаются температуры и концентрации газов на выходе из рекуператора, а также на выходе из основного корпуса после химической утилизации. Конечным результатом процесса является восстановление, плавление и нагрев до 1500°C металла за счет тепла дожигания газов металлизации. Расчетный расход углерода топлива в таких процессах составляет 285 кг/т. Расчет по той же методике для доменной плавки дает 500 кг/т. Схемы с металлизацией в рекуператоре значительно экономичнее доменной по этому

показателю. В таких процессах рекуператор дает основную часть тепла, необходимого для процесса, и через рекуператор возвращается в печь вся энергия отходящих газов, тогда как в домне, например, лишь 20 %.

В доменной печи ради утилизации 25 % химического тепла газов и их физического тепла приходится применять дорогое хорошо окускованное сырье и тратить на это примерно половину стоимости чугуна. В данной схеме более глубокая утилизация энергии газов и, соответственно, меньший расчетный расход топлива достигаются без затрат на окусование.

Предлагаемый процесс сейчас может показаться странным, экзотическим, нереальным и др. Но если в обычной доменной плавке будет отлажено вполне естественное вдувание угольной пыли с концентратом, то остро встанет вопрос об увеличении доли пылевидных реагентов, о лучшей утилизации энергии газов. Данный процесс будет выглядеть уже более приемлемым психологически. Главным новым элементом предлагаемого процесса по сравнению с предыдущими окажется лишь вдувание пылевидного концентрата в поток газов, отходящих от ванны вверх, к колошнику.

2.14. Плавление металлизированного порошка концентрата на огнеупорах рекуператора

Любой грамотный металлург, если вникнет, то скажет: конечно, это можно сделать. И нужно.

Из дискуссии

В ряде случаев при металлизации концентрата более удобна не «доменная», а «мартеновская» компоновка рекуператоров (рис. 2.3), она более компактна и не требует передачи горячих газов по трубопроводам.

Схема агрегата может быть подобна схеме мартеновской печи. Пылегазовая взвесь с металлизированным порошком железа поступает, например, из правого рекуператора; из нее формируются факелы горения, которые вдувают капельный металл в ванну. Газы направляются в левый рекуператор, где дожигаются и прогревают этот рекуператор. Затем направление продувки меняется, металлизация ведется в левом рекуператоре и капельный металл получается в левых факелах и т. д.

Интересна возможность плавить крупинки металлизированного концентрата на горячих огнеупорах, при продувке газов с металлизированным порошком железа через кладку огнеупоров или через засыпку кусков огнеупоров (см. рис. 2.3).

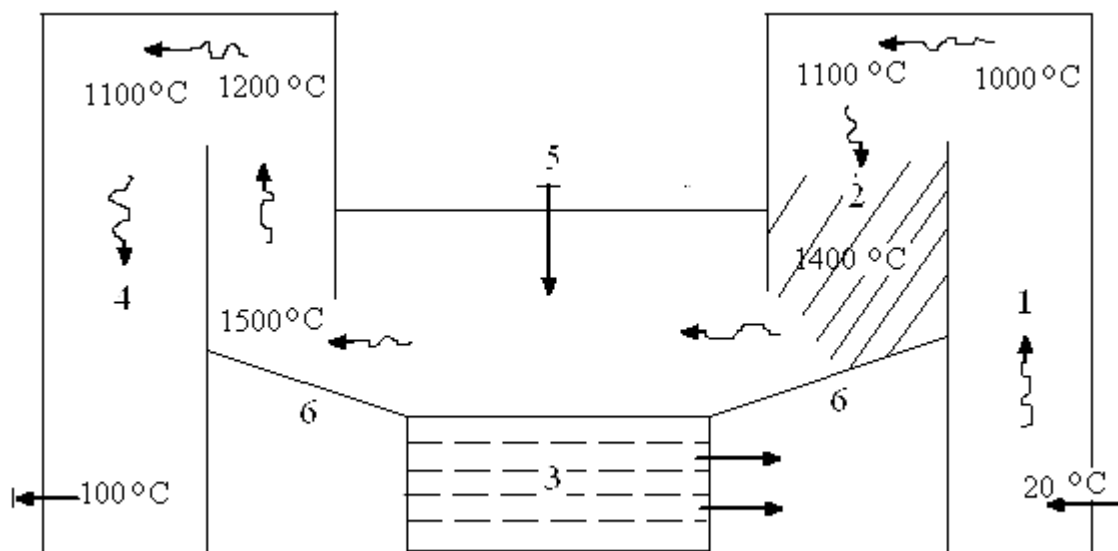


Рис. 2.3. Схема агрегата с плавлением металлизированного концентрата на огнеупорах рекуператора:

1, 4 – левый и правый рекуператоры; 2 – зона плавления; 3 – горн; 5 – дутьё;
6 – наклонный под; цифры – температура газов

Сейчас нередко температура доменного дутья доходит до $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а иногда и до $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем в этом случае кладку рекуператора приходится прогревать уже примерно до $1500\text{--}1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Примерно при таких температурах или даже выше часто работает футеровка электропечей, а также своды мартеновских (отражательных) печей.

Если довести до таких температур кладку рекуператора, то на ее кирпичях могут плавиться крупинки металлизированного концентрата и образовывать натеки расплавов, которые затем стекут в ванну. При этом на последнем высокотемпературном участке рекуператора пылегазовая взвесь должна двигаться сверху вниз, чтобы движение газов не препятствовало стеканию расплавов, а способствовало ему.

Температура плавления чугуна $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$, углеродистой стали при $2\text{ }\% \text{C}$ – около $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Реальная задача расплавления таких металлов на горячей кладке, если ее прогреть ее примерно до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Реально даже расплавление на такой кладке малоуглеродистого железа с температурой плавления около $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Пылегазовая взвесь с металлизированным порошком железа поступает, например, из правого рекуператора, и на последнем участке пути продувается через насыпку огнеупоров 2, которая состоит из кирпичей или их боя. Частицы взвеси плавятся на кирпичях и отдают ванне капельки жидкого металла и шлака с остатками углерода. Расплавы стекают в ванну по наклонному поду 6. Оставшийся газ CO уходит в левый нагреваемый рекуператор, где дожигается и прогревает кладку. Затем направление продувки меняется и охлаждаться будет уже левый рекуператор, а нагреваться до-

жиганием газа СО – правый. В промежутке между двумя рекуператорами в газовую смесь дается небольшое количество кислорода или доменного дутья для прогрева газов примерно на 100-200 °С. Факел такого частичного горения можно организовать так, чтобы он дополнительно прогревал расплавы ванны. Окончательное дожигание газов будет идти уже за счет добавок дутья в самом рекуператоре.

Высокотемпературный участок 2 насыпки огнеупоров будет со временем разрушаться расплавами. Сюда можно добавлять сверху кирпичи огнеупоров или их бой. Сначала, до плавки и разрушения огнеупоров, здесь можно сделать правильную кладку кирпичей. Лишь со временем такая кладка может смениться беспорядочной насыпкой частично разрушенных кирпичей огнеупора, однако для плавления металла такая насыпка также подходит. По мере прогорания такая насыпка пополняется сверху. Кирпичи намного крупнее окатышей, поэтому газопроницаемость такой насыпки можно сделать намного больше, чем у шихты в агрегате «Мидрекс» или в домне. Процесс можно сделать более эффективным, если кирпичи огнеупоров заменить специальными огнеупорными изделиями, разработанными именно для данных функций.

В известной дискуссии обсуждалась возможность замены коксовой насадки в домне насадкой или насыпкой огнеупорных материалов, на которых могли бы плавиться окатыши и стекать в горн расплавы. Но в домне в фурменных очагах температура может превышать 2000 °С, поэтому такая огнеупорная насыпка была бы нестойкой. В предлагаемом рекуператоре (см. рис. 2.3) на огнеупоры такой насыпки действуют температуры не выше 1500-1600 °С, как и на огнеупоры современных рекуператоров или сталеплавильных агрегатов, поэтому стойкость такой «огнеупорной насадки» может быть вполне достаточной. Огнеупорная насадка здесь как бы заменяет коксовую.

Такую «огнеупорную насадку» можно создать в горне «как бы доменной» печи (см. рис. 2.1), если здесь организуются факелы кислородно-капельной плавки металла из пылегазовой взвеси металлизированного концентрата. Выше горна, над такой насадкой может располагаться в «пустой» шахте печи система химической утилизации энергии газов – здесь можно вдувать холодный концентрат, который поглотит часть тепловой и химической энергии отходящих из горна (из насадки) газов СО с температурой около 1500 °С. Такая насадка целесообразна, если пока еще не отлажены наклонные или вертикальные факелы, плавящие металлизированный концентрат и вдувающие его в ванну. Проще организовать обычные горизонтальные факелы и обычное выделение образующихся капелек металла на кусках насадки с натеками расплавов. Примерно так это выделение идет в горне обычной доменной печи.

Если ведется плавка металлизированного концентрата на чугун, то в горне можно насыпать и насадку из кокса, подобную обычной доменной насадке. Если в факелы горения пылегазовой взвеси, работающие в горне, дать повышенный избыток угольной пыли, то она будет быстро поглощать почти весь кислород дутья, и угар кокса будет невелик. Выше насадки энергия отходящих газов будет поглощаться системой химической утилизации этой энергии.

2.15. Устранение всех четырех пороков домны

Все говорят о безкоксовой металлургии,
никто не говорит о безокатышевой металлургии
Из дискуссии

В приведенных выше схемах с химической утилизацией энергии газов (раздел 2.13) и с плавлением взвеси на засыпке огнеупоров (2.14) радикально решается задача устранения всех четырех описанных несообразностей современной металлургии. Предлагаются **полностью пылегазовые** процессы без дорогого окускования какой-либо части шихты. Получается выплавка металла не только **безкоксая**, но, так сказать, еще и **безокатышевая**. Далее, можно полностью сжигать топливо с использованием тепла на металлургический процесс; расчетный расход топлива снижается до оптимальной величины 285 кг/т. Так устраняются пороки № 1 и № 3.

Предлагается вести первичное расплавление металлизированной массы на безуглеродистое железо, что позволит получать сталь простой добавкой углерода, без дополнительного сталеплавильного передела; устраняется порок № 4.

В отличие от домны, здесь движение твердых реагентов в газовых потоках идет под действием простых и хорошо известных аэродинамических сил, не будет явлений типа слипания и спекания кусков шихты, зависаний и обрушений массивов этой шихты и соответствующих расстройств хода плавки. Пылегазовый процесс хорошо управляется, можно на разных стадиях добавлять или убавлять газы и пылевидные реагенты. В отличие от вдувания угольной пыли в домну, здесь добавление твердых реагентов не сопровождается бурными реакциями горения, поэтому реагенты можно просто всыпать в поток газов.

Можно отделять часть газов также аппаратами Циклон. Это – несложные и недорогие операции, и при необходимости их можно выполнять многократно, выстраивать более сложные схемы процесса, чем рассмотрено выше. Можно также уплотнять, концентрировать взвесь в расширениях каналов, где она задерживается при снижении скорости продувки ниже V_0 (см. раздел 2.2).

Плавка становится уже столь управляемой, что приближается к современным химическим технологиям, которые описываются простыми точными формулами физики, тогда как капризный доменный процесс остается в этом плане во многом непонятным процессом древнего ремесла с его таинствами и секретами. Так устраняются несообразность или порок № 2.

Если дутье кислородное (не доменное), то в таких предлагаемых агрегатах уже ничего не остается от доменной печи. Правда, металлизация железорудного концентрата выполняется в рекуператоре, но и рекуператор здесь полезно выполнить с несколькими коленами, то есть иначе по сравнению с доменными рекуператорами.

Если мы радикально преодолеваем доменную идеологию, достигается согласие металлургов в понимании несообразностей современной металлургии и преимуществ предлагаемых схем, то целесообразно сразу же приступить к созданию такого нового агрегата. Если достигается общее понимание вопроса, то разумно принять ответственное решение о разработке такого агрегата.

Если же пока не удастся достигнуть такого согласия, то целесообразно выбрать постепенное, поэтапное видоизменение доменного процесса, и выполнять изменения примерно в той последовательности, как они описаны в разделах 2.1-2.8. Психологически сравнительно легче принять целесообразность всыпания пылевидного концентрата в доменное дутье, чтобы часть чугуна получать «безокатышевым» способом (раздел 2.3), и сделать первый шаг в освоении пылегазовых процессов. Здесь можно, очевидно, достигнуть согласие уже после нескольких обсуждений, и не требуется значительных затрат. Далее, в сочетании с известным вдуванием угольной пыли этот прием дает уже возможность получать часть металла из одних лишь пылевидных исходных материалов, и т. д.

2.16. Поведение серы и фосфора

Как это – частицы железа, взвешенные в воздухе!? Они же тяжелые, упадут.

Из дискуссии

При плавке на железо в предлагаемых агрегатах (см. рис. 2.1 и рис. 2.2) процесс идет при значительно более окислительной атмосфере и при большем окислительном потенциале расплавов, чем в существующих агрегатах. Газы горения содержат до 25 % CO_2 , металл получается практически безуглеродистым. Углерод, если он был в металле, будет окисляться, выгорать при плавлении в такой атмосфере. Шлак будет содержать больше окислов железа, чем в домне; возможно, придется примириться с

несколько большими потерями железа со шлаком. Но современные сталеплавильные шлаки также часто содержат много окислов железа.

В окислительной атмосфере будут лучше удаляться самые вредные примеси металла – сера и фосфор. Сера почти не выгорает при плавке сульфатов меди, если в шахте печи присутствует кокс, но выгорает почти полностью, если плавка ведется без кокса. При продувке чугуна в современном конвертере сера почти не выгорает, пока в металле много углерода, но начинает быстро удаляться, когда содержание углерода понижается.

На рис. 2.4 приведены кривые выгорания примесей в воздушном конвертере. Видно, что сера и фосфор практически не выгорают до тех пор, пока не выгорит основная часть углерода, пока его содержание в металле больше 1%. Интенсивное удаление серы и фосфора практически начинается лишь после того, как выгорят кремний и марганец, а углерода в металле останется несколько десятых процента. Углерод имеет большее сродство к кислороду ΔF^0 , чем сера или фосфор. Для горения углерода до CO_2 $\Delta F^0 = 377$ кДж/моль, тогда как для аналогичного горения серы до SO_2 $\Delta F^0 = 295$ кДж/моль. При совместном горении углерод активно поглощает кислород, и тем самым не позволяет окисляться сере и фосфору.

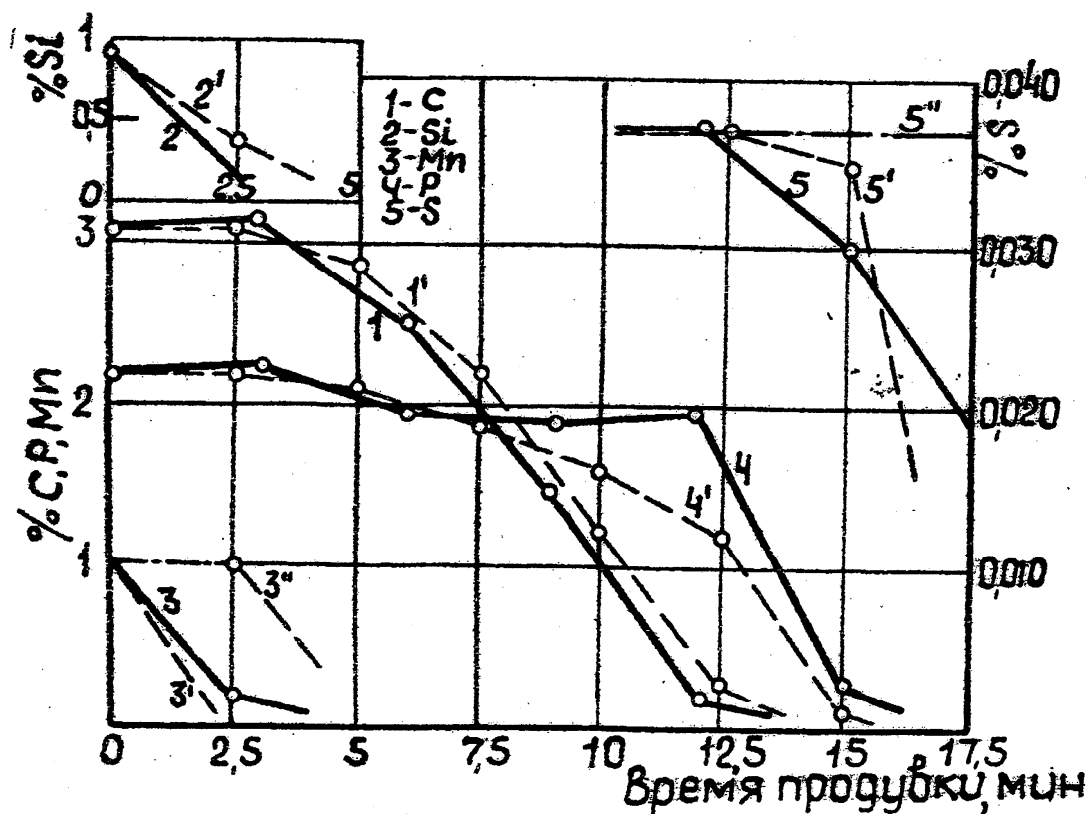


Рис. 2.4. Кривые выгорания примесей в воздушном конвертере [48].

Сплошные линии – опыт, штриховые – расчет, штрихпунктирные – расчет с учетом поверхностной активности. Видно, что сера (5) и фосфор (4) начинают выгорать лишь после удаления основной части углерода

В современной металлургии жидкий металл находится все время в «перевосстановленном» состоянии; он переуглероживается, перевосстанавливается в домне, и эта «перевосстановленность» лишь немного понижается в сталеплавильном процессе. Очевидно, именно поэтому сейчас столь остро стоит проблема серы и фосфора, для удаления которых требуется более окислительный потенциал среды.

Металлизированную пылегазовую взвесь, которая получается в рекуператоре, после отделения газов можно для десульфурации продувать через слой кусковой извести или вводить в эту взвесь немного пылевидной извести, например, 1 %. Общее количество серы в металле невелико, и достаточно немного вещества, поглощающего серу, особенно в том случае, когда у поглотителя такая высокоразвитая поверхность, как у пылевидной извести, и сам металл находится в пылевидном состоянии. Удаление серы будет идти лучше, если система будет иметь более окислительный потенциал, не будет содержать избытка угольной пыли а, наоборот, будет иметь некоторое количество CO_2 , например, 10 %.

Удаление серы из кусков топлива затруднено ее диффузией внутри кусков; в пылегазовой взвеси такое удаление может идти намного быстрее. В диффузионном режиме время t удаления примеси из куска пропорционально квадрату его размера D , $t \sim D^2$. В пылегазовой взвеси частицы пыли примерно в тысячу раз меньше кусков кокса или угля. Поэтому диффузионное сопротивление процесса удаления серы из пылинок будет меньше в 10^6 раз.

Многие сорта угля и даже кокса оказываются непригодными для определенных металлургических процессов из-за высокого содержания серы. Можно рассчитывать, что в пылегазовых процессах окажутся пригодными многие такие сорта топлива.

2.17. Выводы к главе 2

Возможности реакций в факелах еще далеко не полностью осознаны, а возможности реакций в пылегазовой взвеси еще только предстоит осознать.

Из дискуссии

Внедрение пылегазовых процессов в доменную плавку удобно начать с вдувания концентрата. Мелкий (минус 71 мкм) или пылевидный концентрат можно просто всыпать в потоки доменного дутья еще перед воздуходувкой. Потоки дутья пронесут его через рекуператор, и в печь придет воздух, «запыленный» концентратом, который прогреется за счет дешевого рекуператорного тепла. Варьируя подачу концентрата в дутье, можно быстро и эффективно регулировать температуру горения в горне. Можно избавляться от «испуганного смирения перед

капризами неуправляемой домны» и смелее проводить дальнейшие улучшения. Окискование рудного сырья стоит примерно четверть стоимости чугуна, поэтому чугун, выплавленный из концентрата, будет примерно на четверть дешевле, чем чугун из окатышей.

Тепловой баланс домны в целом улучшается от вдувания концентрата, так как поступление в печь холодных окатышей заменяется вдуванием горячего концентрата. В то же время произойдет некоторое перераспределение температур в печи. При той же конечной температуре расплавов в горн будут поступать более горячие материалы, а добавка температуры в горне будет меньше. В этом отношении вдувание концентрата подобно вдуванию угольной пыли или вдуванию природного газа. Последствия вдувания угольной пыли изучены примерно до 30 % всего топлива. Можно ожидать, что и при вдувании концентрата не будет существенных отрицательных последствий, пока он не заменит 30 % окатышей.

При дальнейшем уменьшении доли окатышей в шихте понизятся химические и механические нагрузки на кокс и улучшатся возможности замены кокса тощим углем. В теоретическом пределе такой процесс может превратить домну в угольный газогенератор, выплавливающий чугун за счет вдувания концентрата.

Если на домне отлаживается вдувание угольной пыли, то совместное с пылью вдувание концентрата повысит общую долю пылевидных реагентов. Концентрат может по-прежнему всыпаться в дутье или же впрыскиваться в печь в смеси с угольной пылью через те же форсунки.

Следующим шагом можно отладить металлизацию в рекуператоре смеси концентрата с угольной пылью виде пылегазовой взвеси. Если такой металлизированный концентрат вдувать в домну, то в ней наряду с обычным процессом пойдет переплавка горячего металлизированного сырья – вдуваемого металлизированного концентрата. Далее можно прекратить в домне обычный процесс и использовать печь только для переплавки на чугун вдуваемого металлизированного концентрата из рекуператора. Для этого нужно сформировать в «пустой» доменной печи вертикальные или наклонные факелы, в которых горит угольная пыль, нагреваются, плавятся и вдуваются в расплавы частички металлизированного концентрата. Процесс будет подобен кислородно-капельной автогенной плавке черновой меди. Если в печи сохраняется шихта, то образующиеся капельки расплавов могут налипать на натеки расплавов и куски шихты. Такие факелы могут работать в массиве шихты почти так же, как и в пустой печи. Если в факелы дать не избыток, а небольшой недостаток угольной пыли, то получится не чугун, а малоуглеродистый расплав, который можно превратить в сталь простой добавкой углерода.

Можно организовать также усвоение в печи физического и химического тепла отходящих газов, если впрыскивать в их потоки следующую порцию концентрата, который будет прогреваться и частично металлизироваться данными газами. В этом варианте будут устранены уже все обсуждаемые несообразности процесса. Можно выплавлять не только чугун, но и сталь из одних лишь пылевидных материалов, при полном сжигании топлива и высокой управляемости процесса. Расчетный расход топлива приблизится к «идеальной» величине 285 кг/т, причем значительная его часть может состоять не из металлургического, а из более дешевого энергетического топлива.

Доменный процесс столетиями остается в принципе неизменным. Распространено убеждение, что существенные изменения в нем вообще невозможны, что здесь нельзя «поступиться принципами». Между тем при трезвом физико-химическом анализе выявляются явные несообразности, которые нетрудно устранить. Несложно, например, добавлять в дутье пылевидный концентрат и получать часть чугуна безокатышевым способом. Не видно каких-то чрезмерных технических сложностей, препятствующих применению и других обсуждаемых пылегазовых процессов.

Можно сказать, что мы терпим металлургию с явными несообразностями по недоразумению, по психологическим и идеологическим причинам. Если преодолеть эти психологические сложности, то вполне можно отладить получение стали из концентрата и угольной пыли без окускования. Можно полностью сжигать топливо и за счет этого намного уменьшить его расход почти до 200 кг/т. Рядовая сталь, полученная таким процессом, будет в 2-3 раза дешевле, чем сейчас.

ГЛАВА 3. УСТРАНЕНИЕ НЕСООБРАЗНОСТЕЙ В ШАХТНОЙ ПЛАВКЕ. АГРЕГАТ «УГОЛЬНЫЙ МИДРЕКС»

3.1. Агрегат «Угольный Мидрекс»

Если это раньше нас сделают, например,
китайцы, то нашей металлургии вообще хана!

Из дискуссии

Выше рассмотрено устранение несообразностей металлургии с помощью пылегазовых процессов. Но если мы не считаем больше, что в доменном процессе «ничего нельзя менять», освобождаемся от давления доменной идеологии и начинаем мыслить свободно, то находятся и другие возможности устранения несообразностей металлургии. В этой главе обсуждается устранение несообразностей в рамках шахтной плавки за счет перехода к схеме «Угольный Мидрекс с плавлением». Предлагаемые изменения можно рассматривать как развитие «идей Мидрекс», как продолжение и углубление тех преобразований, которые уже выполнены при переходе от домны к современным агрегатам Мидрекс. Изменения по сравнению со схемой Мидрекс в основном состоят в том, что вместо природного газа вдувается угольная пыль с доменным дутьем, и здесь же в шахтной печи организуется плавление.

Для перехода к этой схеме нужно сверху загружать лишь окатыши, а все топливо вдувать в виде угольной пыли снизу. Потребуется соответственно откорректировать профиль домны так, чтобы он стал похож на профиль агрегата Мидрекс, и чтобы его сечение стало почти постоянным по высоте, без заплечиков. Если угольную пыль давать в избытке по отношению к дутью, то получится безкоксовое получение жидкого чугуна. При этом сохраняются основные преимущества домны – горячее дутье, хорошая утилизация физического тепла газов, высокая производительность.

Как уже отмечено выше, современный доменный процесс самопроизвольно сам эволюционирует в сторону превращения в процесс «угольный Мидрекс». Действительно, постепенно увеличивается доля вдуваемой угольной пыли и уменьшается расход кокса. Еще недавно допустимый минимум кокса определяли как 500 кг/т, сейчас достигнут расход кокса меньше 300 кг/т, а в теории обсуждается уже работа печи при расходе кокса 150 кг/т. Домна демонстрирует хорошие показатели при увеличении доли пыли, она, так сказать, «сама просится» перейти к схеме угольный Мидрекс. За последнее столетие минимальный расход кокса уменьшился более чем на 300 кг/т, и линейная экстраполяция этой зависимости дает нулевой расход кокса к концу столетия.

Однако «чисто доменный» процесс всегда мыслился как продувка кусковой шихты. Вдувание пыли оказывается как бы идейно не вполне закон-

ным приемом и часто считается допустимым лишь в качестве малой поправки к чисто доменному процессу, причем такая поправка не должна изменять суть процесса. Поэтому самопроизвольный переход к процессу без кокса произойдет очень не скоро; такой переход противоречит доменной идеологии и тормозится этой идеологией.

Доменщики не могут «поступиться принципами», не могут представить плавку без коксовой насадки, без фильтрации расплавов через слой кокса. После каждого нового достигнутого увеличения доли угольной пыли следуют многочисленные заявления, что, конечно же, необходима все же коксовая насадка; нельзя обеспечить хороший сход шихты и ее газопроницаемость без разрыхляющего действия кокса, и др., хотя в современных агрегатах Мидрекс и хороший сход шихты, и газопроницаемость обеспечиваются без кокса.

Добавки пылевидного концентрата в доменное дутье, рассмотренные в разделе 2.3, можно наращивать от нуля очень постепенно. Эти добавки увеличивают долю кокса в кусковой шихте и облегчают ее сход. Увеличение доли угольной пыли, наоборот, уменьшает долю кокса и действительно затрудняет сход шихты. В домне из шихты выгорают куски или слои кокса, сход идет через пересыпания, спекания окатышей и разрушения спеков, через зависания и обрушения разного масштаба. Поэтому трудно работать в области большой доли угольной пыли, при малой доле кокса. Доведение угольной пыли до 100 % топлива трудно пройти за счет постепенных малых изменений. Сход доменной шихты действительно идет трудно, если доля кокса мала, преобладают спекающиеся металлизированные окатыши. Переход к такому сходу шихты, какой практикуется в агрегатах Мидрекс, целесообразно пройти скачком. Там в шахте печи одни окатыши, и их масса свободно опускается как единое целое до аппарата выгрузки, без пересыпаний, без разрушения и нового спекания отдельных масс. В агрегатах Мидрекс необходимая газопроницаемость вполне обеспечивается и без кокса. Сход шихты там также лучше, чем в домне, он более ровный, без тех опасных колебаний, которые доменщики стремятся уменьшить за счет увеличения доли кокса, который разрыхляет шихту.

Как уже отмечено выше, зависания и обрушения шихты в домне опасны из-за тех изменений газовых потоков и тех скачков температуры горна, которые они вызывают. При охлаждении горна доменщик часто может лишь добавить кокс в завалку, но этот кокс дойдет до горна лишь через 6-20 часов. Если же все топливо вдувается снизу, с дутьем, то можно варьировать соотношение топлива и дутья. Если вдвое уменьшить подачу угольной пыли, то вместо горения на СО получится горение на СО₂, и выделение тепла в горне намного увеличится при том же объеме дутья. Появляется возможность быстро и эффективно корректировать температуру горна.

Выгоды перехода скачком к процессу без кокса вполне очевидны, поэтому можно рассчитывать здесь достигнуть согласия, даже если для этого потребуется достаточно много обсуждений, чтобы преодолеть давление идеологии. Если мы решаем эту основную проблему, убираем кокс из печи, то достигается безкоксовое получение чугуна при сохранении основных достоинств доменной плавки. Далее открываются возможности уменьшения расхода топлива за счет дожигания отходящих газов; можно перейти также к плавке на малоуглеродистую сталь, которая превращается в сталь нужного состава простой добавкой углерода. В автогенной плавке меди подобное устранение кокса из печи позволило сразу получать в шахтной печи не рудный расплав, а уже готовую черновую медь.

3.2. Плавление спекающейся массы металлизированных окатышей

Ну, расплавить-то мы уж как-нибудь сумеем!
Из дискуссии

Агрегаты «Мидрекс» и факелы дутья с угольной пылью – известные и хорошо отлаженные элементы процесса. Наиболее радикально – новый элемент предлагаемого процесса, не встречающийся в существующих печах – это несколько необычный режим плавления. Масса металлизированных окатышей здесь будет спекаться и опускаться до пода печи как единое целое; необходимо организовать ее плавление на поду или в ванне с расплавами. Оптимизация такого нового плавления может потребовать значительной работы.

Подобный процесс плавления отлажен, в частности, в упомянутых печах автогенной шахтной плавки черновой меди. Там в шахтной печи из кусков сульфита CuS выжигается сера, образующиеся куски металлической меди спекаются и плавятся в горне печи. При переплавке пиритных медных руд в штейн также в горне печи плавятся куски твердой шихты, но там присутствует кокс и, очевидно, не столь явно выражено спекание. В вагранке опускаются в горн и плавятся чугунные чушки, масса которых часто составляет 45 кг. Если какие-то куски металлизированной массы M плотно спекутся и затем попадут в расплавы горна, то плавление их будет близко к плавлению крупного металлического лома в электропечи или в конвертере, а также к плавлению лома на поду печи топливным факелом.

В массе M металлизированных окатышей уже около $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинается некоторое спекание. Чтобы в агрегатах «Мидрекс» спекание не стало слишком прочным и не затруднило выгрузку окатышей, весь процесс проводят лишь немного выше минимальной температуры восстановления окислов углеродом ($720\text{ }^{\circ}\text{C}$), то есть около «температуры

Мидрекс». На поверхность окатышей при окомковании иногда напыляют неспекающиеся порошковые материалы. Возможно, в каких-то случаях такое противодействие спеканию окажется полезным и в предлагаемом процессе Угольный Мидрекс. Здесь масса М окатышей прогревается не до 750 °С, а вплоть до температуры плавления, примерно до 1140 °С в случае плавки на чугун. Спекание массы М в этом агрегате может быть значительно более прочным.

В домне сход шихты идет через ее пересыпания, поэтому считается недопустимым прочное спекание больших массивов шихты, при котором прекращаются пересыпания и которое приводит к зависаниям и обрушениям слишком большого масштаба. Предел уменьшения доли кокса в шихте часто определяют именно тем, что без разрыхляющего действия кокса наступит слишком интенсивное спекание металлизированной шихты.

Здесь предлагается перейти от доменных частичных и неопределенных полуспеканий и разрушений к полному спеканию массы окатышей даже в том случае, если внизу такая спекшаяся масса охватит все сечение печи. Такой спекающийся слой будет оплавляться снизу, опускаться как целое и нарастать сверху за счет добавления новых слоев металлизуемых окатышей. Чтобы начать процесс в таком агрегате, чтобы *задуть печь угольный Мидрекс*, можно сначала насыпать слой кокса, а затем на него подавать уже только окатыши.

Если перейти к такому процессу в домне с обычным профилем печи, то спекающаяся масса М может прочно зависнуть на заплечиках корпуса домны. В пределе могут полностью прекратиться ее обрушения. Эта масса будет лишь оплавляться снизу горячими газами факелов. Ниже такой массы в горне может образоваться пустота над ванной с расплавами. Будут возможны обрушения больших масс окатышей в расплавы.

Целесообразно сделать профиль печи без заплечиков, с практически постоянным сечением, и предоставить спекающейся массе М металлизированных окатышей свободно опускаться до расплавов или до твердого пода печи, не задерживаясь на заплечиках.

При спекании происходит некоторая усадка массы М. По боковым поверхностям этой массы возможно образование зазоров между нею и стенками печи. В такие зазоры, как и в домне, будут засыпаться окатыши сверху, перекрывая эти пустоты и образуя гарнисаж на стенках.

3.3. Схема зоны плавления

Еще пещерные металлурги принялись смешивать руду с топливом, а мы никак от этого не избавимся. То, что укоренялось шесть тысяч лет, быстро не ломается.

Из дискуссии

При обычной продувке в домне около каждой фурмы образуется **фурменный очаг** в виде «газового мешка» диаметром примерно 2 м с интенсивной циркуляцией газов. Из очага газы выходят вверх и в стороны по всем направлениям. Есть данные, что куски кокса в очаг горения поступают в основном снизу. В центре горна часто образуется почти непродуваемая зона, **загроможденный центр**; здесь шихта опускается вниз, а затем подтекает снизу к фурменным очагам. В очаге куски кокса сгорают, а над фурмой потоки газов могут вызвать движение кусков шихты вверх.

В предлагаемом процессе угольный Мидрекс, если спекающаяся масса М приобретет значительную прочность, фурменные очаги обычно не будут засыпаться шихтой. Расплавляя окружающую металлизированную массу, очаги достигнут больших размеров. Очаги соседних фурм сольются, и образуется сплошное кольцо таких газовых мешков вокруг горна. Если всем фурмам дутья придать небольшое отклонение от радиуса печи в одну сторону, то получится циркуляция газов горения вокруг оплавленной массы М, интенсивное омывание поверхности этой массы газовыми потоками. Образуется большая площадь контакта массы М с газами, через которую газы дутья проникают внутрь этой массы. Это повысит газопроницаемость зоны плавления и будет способствовать более равномерному распределению газовых потоков в массе окатышей¹.

Масса М в обсуждаемом агрегате, очевидно, в центре образует конус, плавление которого отстает от тех участков, которые расположены ближе к фурмам, к источникам угольной пыли и высоких температур. Такой конус, сужающийся книзу, будет оплавляться снизу расплавами ванны. Зона плавления может иметь вид, представленный на рис. 3.1.

При плавке на чугун плавление в основном сосредоточится в тонком слое на поверхности массы М, где горячие газы дутья с температурой порядка 2000 °С и с избыточной угольной пылью встречаются с металлизированными окатышами. Проходя в глубину массы М, газы быстро потеряют избыточную температуру и лишнюю угольную пыль.

¹ Отметим, что такую циркуляцию газов полезно организовать также и в обычной доменной плавке. Соседние фурменные очаги в домне часто практически соприкасаются, поэтому при отклонении фурм от радиуса образуется циркуляция газов дутья вокруг горна, сплошное кольцо таких слившихся очагов. Будет достигнуто более равномерное распределение дутья в массиве шихты.

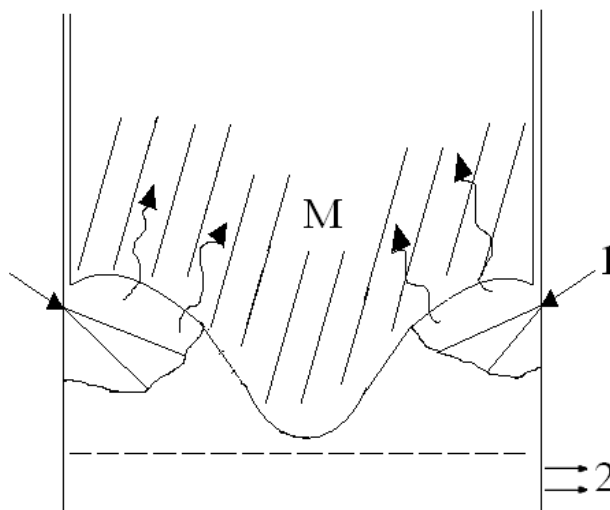


Рис. 3.1. Схема зоны плавления металлизированной массы М наклонными факелами:
1 – факелы, 2 – летки

В глубине массы М, вдали от поверхности, плавления не будет; плавление сосредоточится в достаточно тонком поверхностном слое, который интенсивно омывается горячими факелами.

При избытке угольной пыли в дутье на поверхности массы М из металла и пыли будет образовываться чугун с температурой плавления около 1140°C ; очевидно, и вся масса М здесь будет иметь примерно такую же температуру, которая создается на поверхности, в поверхностном слое плавления. причем в глубине ее температура будет несколько ниже 1140°C .

При избытке угольной пыли в дутье она будет присутствовать также и в шлаке в виде взвеси. При контакте с таким шлаком или с науглероженным жидким металлом масса М будет науглероживаться и оплавляться снизу. Плавление массы М в значительной степени пойдет на ее границе с расплавами (рис. 3.1). Когда уровень расплавов поднимется к зоне факелов, они значительную часть тепла и избыточной угольной пыли будут отдавать в расплавы. Можно придать факелам дутья некоторый наклон вниз и в сторону от радиуса ванны; такие факелы будут инициировать циркуляцию по окружности горна не только газов, но и расплавов.

Если перемешивание расплавов в ванне не столь интенсивное, то образуется большой перепад температуры и концентрации углерода между основной массой расплавов и поверхностью плавления, где плавятся металлизированные окатыши в контакте с расплавами. Если первичный жидкий металл на поверхности плавления будет иметь концентрацию 2 % углерода, то температура плавления здесь составит около 1350°C , а общая величина перегрева металла в ванне над точкой плавления чугуна (1140°C) может быть порядка 200°C . Более интенсивное перемешивание ванны приведет к выравниванию концентрации углерода и температуры, к меньшему перегреву металла.

Уже и плавку на чугун, а не только на сталь, легче организовать при сталеплавильной футеровке печи. При угольной футеровке потребовалось бы, видимо, много мероприятий, предотвращающих ее растворение. Нужно было бы обеспечивать постоянное присутствие в чугуне избыточной угольной пыли и большую глубину ванны, чтобы поглощение углерода из металла плавящимися окатышами не привело к растворению футеровки.

Шлакообразование в данном процессе будет протекать также в зоне плавления, на поверхности массы М, и одновременно с плавлением. Окатыши, плавящиеся на этой поверхности, будут отдавать в расплав и неметаллические примеси, образующие шлак. Преимущество такого варианта плавления по сравнению с доменным плавлением состоит также в том, что образующемуся шлаковому расплаву не требуется проходить длинный и трудный путь между кусками кокса, не требуется трудного фильтрования шлака через слой кокса толщиной порядка 10 м. При таком фильтровании существует опасность понижения газопроницаемости, вспенивания шлака, даже его затвердевания в холодных зонах и др.

В предлагаемой схеме образующийся шлак сразу оказывается вне кусковой шихты, и перечисленные трудности отпадают. На поверхности ванны с расплавами здесь также в принципе возможно некоторое вспенивание, но здесь оно не опасно, так как нет забивания пеной коксовой насадки. Вероятно, по этой схеме можно перерабатывать руды с большим количеством пустой породы и шлака, и обычно не заботиться (или меньше заботиться) о флюсах. Флюсами здесь может служить зола угольной пыли, которая встречается с неметаллическими примесями окатышей в зоне плавления.

Если угольная пыль содержит более крупные частицы, то они по инерции будут пролетать фурменный очаг и интенсивно бомбардировать массу М на конечный участок факела. Видимо, могут сформироваться вытянутые наклонные факелы и зона плавления приобретет вид рис. 3.2.

При плавке на сталь предлагается дополнить агрегат Угольный Мидрекс выносным горном-отстойником 5 (рис. 3.3). В варианте, представленном на рис. 3.3, плавление металлизированной массы ведется на наклонном поду, и полученные расплавы сразу стекают в отстойник.

Возможен другой вариант, когда плавление в основном корпусе ведется так же, как на схеме рис. 3.1, но когда в основном корпусе накапливается жидкий металл выше определенного уровня, он начинает перетекать из основного корпуса в горн-отстойник 5. Предпочтительно перетекание металла в отстойник без шлака, по способу «сифон», как в агрегате Ромелт. Первичный или «доменный» шлак лучше выпускать из основного корпуса, но не из отстойника. Можно отделять шлак при перетекании расплавов в горн-отстойник так, как это делают в доменной плавке «на желобе». В самом отстойнике можно наводить уже рафинирующий или «сталеплавильный» шлак для улучшения качества металла.

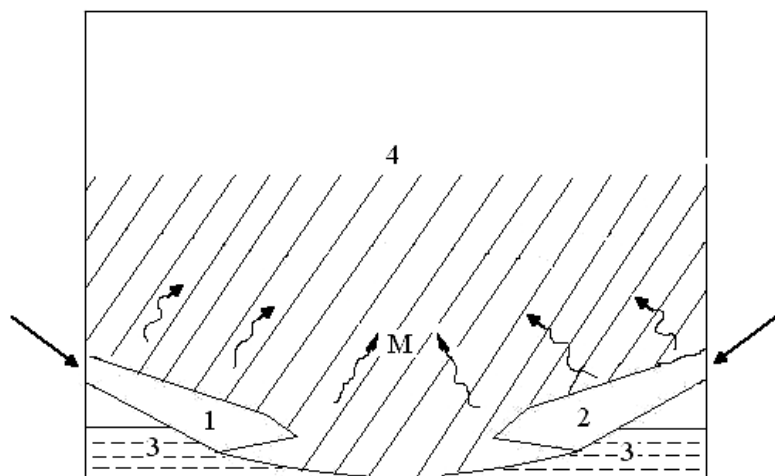


Рис. 3.2. Схема плавления вытянутыми наклонными факелами:
 1, 2 – факелы дутья; 3 – расплав; 4 – зона восстановления;
 М – спекающаяся масса металлизированных окатышей

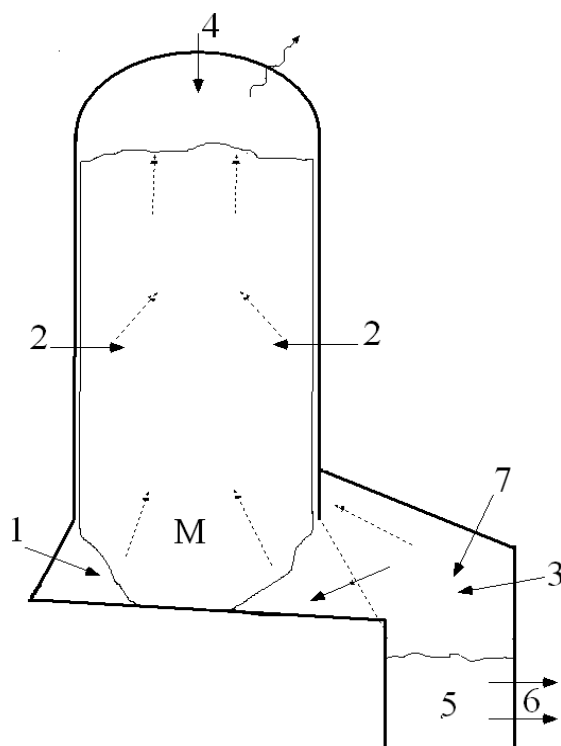


Рис. 3.3. Угольный Мидрекс с горном-отстойником 5:
 1,2 – дутье; 3 – фурма, вынесенная в отстойник; 4,7 – загрузочные устройства основного
 корпуса и отстойника; 6 – летки

Плавку в основном корпусе агрегата нужно вести при пониженном избытке угольной пыли, чтобы получить заниженное содержание углерода. Окончательное «попадание в анализ» по углероду предлагается обеспечивать за счет добавки углерода в отстойнике. В отстойник вынесены одна или две фурмы 3 «доменного» дутья с вдуванием угольной пыли, которые позволяют здесь более точно обеспечить нужную величину перегрева металла и нужное содержание углерода.

3.4. Возможные отрицательные последствия. Газопроницаемость зоны плавления

Да, тут есть вопросы, можно спорить, опасения высказывать.

Из дискуссий

Часто высказывается опасение, что в зоне плавления может быть понижена газопроницаемость. Выше зоны спекания, в основной части печи, где идет восстановление, газопроницаемость будет, очевидно, примерно такой же, как и в обычном агрегате «Мидрекс»; такая газопроницаемость вполне достаточна.

При спекании металлизированных окатышей происходит значительная усадка массы. При высокой температуре и интенсивном спекании уменьшение объема может достигнуть большой величины, например, 15 %. Сечение газовых каналов между окатышами сократится при этом на 10 %; примерно на 10 % понизится и газопроницаемость массы. Можно примириться с таким понижением газопроницаемости в зоне глубокого спекания, которая занимает небольшую часть печи.

В тонком слое на поверхности массы М, где протекает само плавление, газопроницаемость еще понизится за счет появления расплавов. Но в таких случаях заметное понижение газопроницаемости наблюдается лишь на последней стадии плавления массы М, когда доля расплавов велика. При малой доле расплавов они обычно не влияют на газопроницаемость. Так, при обжиге окатышей нередко расплавляется 10-20 % всей их массы, но это практически не сказывается на газопроницаемости. Расплавы остаются каплями внутри окатыша и не влияют на структуру массы М окатышей в целом. Понижение газопроницаемости начинается тогда, когда уже целые окатыши и их комплексы превращаются в большие капли или натеки расплавов. Такие большие массы расплавов образуются в домне, в коксовой насадке, но, видимо, они не смогут образоваться в тонком слое плавления массы М.

Очевидно, невозможно катастрофическое понижение газопроницаемости всей печи, работающей по варианту «Угольный Мидрекс». Давление дутья у фурм домны (3-4 атм и больше) таково, что оно способно поднять весь столб шихтовых материалов. Факелы, исходящие от фурм, имеют высокую температуру порядка 2000 °С, (а при необходимости и 2200 °С), а также избыток угольной пыли. Такие факелы быстро проделали бы «туннели, каналы, свищи» даже в малопроницаемой для газов массе металлизированного сырья.

В доменной печи при интенсивной продувке нередко образуются также «каналы», местные прорывы дутья, «свищи» в массе шихты, нередко около стенок печи. Затем каналы засыпаются окатышами. При чрезмерно высокой интенсивности продувки такие каналы могут образоваться и в

предлагаемом агрегате, причем в достаточно прочной массе М такие каналы могут быть более устойчивы. Засыпать такие каналы могут окатыши верхних слоев, которые еще не спеклись.

Можно выполнять «механические удары» по шихте или толчки, варьируя давление дутья. Такие толчки могут помочь открытию новых путей газа и засыпанию окатышами ранее образовавшихся каналов. В агрегате «Угольный Мидрекс» можно выполнять также и «тепловые удары» по плавящейся шихте. Временный переход к горению на повышенное содержание CO_2 резко повысит температуру газов и может способствовать прожиганию новых путей для газовых потоков.

Возможны неравномерности в движении массы М и всей шихты вниз. Чтобы смягчить такие неравномерности, целесообразно предусмотреть соответствующее автоматическое варьирование давления дутья как при начале интенсивного движения массы М вниз, так и при ее длительной неподвижности.

Конечным итогом неравномерностей продувки, каналов и «свищей» будет как бы исключение из работающего объема печи, из области восстановления, малопроницаемых участков массы М. Как бы уменьшится эффективный объем печи, понизится ее производительность по сравнению с вариантом равномерного распределения газовых потоков. В доменной печи восстановление невелико в большой области коксовой насадки, которая может занимать, например, треть всего объема домны.

Отметим, что уменьшение активно работающего объема печи, некоторое понижение ее производительности само по себе не является очень важным фактором ее общей экономичности. Амортизация печи в стоимости чугуна составляет, например, лишь 1,5 %, тогда как сырье, то есть рудная компонента и топливо, вместе составляют 90 % себестоимости чугуна [7, 8]. Для общих экономических показателей переход на безкоксовый процесс значительно важнее повышения производительности. При прочих равных условиях чугун, полученный на угольной пыли, будет примерно на 25 % дешевле чугуна на коксе.

3.5. Плавка на железо и сталь

Любой грамотный металлург, если вникнет, то скажет: конечно, это можно сделать. И нужно.

Из дискуссии

Если отлажено описанное безкоксовое получение чугуна в перестроенной «доменной» печи, то далее можно устранять и другие несообразности процесса. Последующие изменения можно вносить как по отдельности в различной последовательности, так и вместе. Рассмотрим

плавку на железо и сталь в агрегате «Угольный Мидрекс» по схемам рис. 3.1, 3.2 и 3.3 со сталеплавильной футеровкой.

Варьируя избыток угольной пыли, можно получать более или менее науглероженный расплав металла. Ясно, что при достаточно большом избытке угольной пыли мы получим чугун (4,3 % C), а та часть пыли, которая не сможет израсходоваться в реакциях и раствориться в расплавах, будет выходить из печи в виде примеси, засоряющей шлак, а в случае неполного дожигания – также и в виде пыли колошниковых газов. При меньшем количестве угольной пыли получится горение углерода не только до CO, но отчасти и до CO₂. Как уже отмечено выше, при содержании CO₂ от 1 до 25 % (то есть от 99 до 75 % CO в сумме этих газов) продукты горения в факеле будут восстановительными по отношению к железу, но окислительными по отношению к чистому углероду. Такой факел даст первичное плавление металлизированной массы М на металл с меньшим содержанием углерода, чем чугун. При 25 % CO₂ металл, равновесный с факелом горения, будет содержать всего лишь 0,1 % углерода, а при 3 % CO₂ – около 1 % C. Температура плавления в последнем случае составит около 1300 °С. По-прежнему плавление будет идти на поверхности массы спекающихся металлизированных окатышей, в зоне контакта этой массы с горячими факелами горения угольной пыли.

В отстойник выносятся две или одна фурма (3, рис. 3.3) «доменного» дутья; такая фурма делается наклонной, так что факел интенсивно омывает поверхность расплавов и перемешивает их. Такая фурма с угольной пылью может нагревать металл, науглероживать его или же обезуглероживать, если прекратить подачу пыли. В отстойнике в металл добавляется углерод до нужной концентрации. Здесь можно выполнять и другие операции рафинирования стали, даже наводить здесь рафинирующий или «сталеплавильный» шлак, если поставить соответствующие загрузочные устройства.

В принципе и в схеме без отстойника (см. рис. 3.1, 3.2) можно вести плавку на железо, то есть при недостатке угольной пыли. Можно пытаться после накопления металла здесь же дать избыток угольной пыли в дутье и перед выпуском довести концентрацию углерода в металле до нужной величины, «попасть в анализ». Другой вариант состоит в том, чтобы выпустить из печи металл с заниженным содержанием углерода, а его добавку дать уже в ковш, как это часто делают после расплавления металла в электропечи.

3.6. Дожигание газов

Легко рисовать новый агрегат, а вот попробуй внедрить хотя бы новую заклепку в доменном оборудовании!

Из дискуссии

Следующим шагом в преобразовании доменной плавки можно отладить дожигание отходящих газов. Тем самым можно устранить «несообразность № 1» доменной печи – неполное сжигание топлива.

Как уже отмечено выше, полное горение углерода до CO_2 дает 390 кДж/моль тепла, а неполное горение до CO – лишь 110 кДж/моль, то есть 28 % полного тепла горения. В доменной печи углерод топлива в горне горит лишь на CO , к колошнику газы примерно на 25 % окисляются до CO_2 , и на 75 % остаются в виде CO . Химическое тепло газов, выходящих из горна, утилизируется в печи, усваивается печью лишь на четверть; три четверти этого тепла «улетают в трубу», в колошник.

При горении топлива только на CO расчетный расход углерода на тонну чугуна в доменной печи получается равным 640 кг/т. При обычном в домне горении на 25 % до CO_2 расчетный расход составляет 440 кг/т, что примерно равно реальному расходу кокса на хороших печах, или немного меньше его. Если принять полное горение топлива до CO_2 , то расчетный расход оказывается равным 240 кг/т чугуна (подробнее см. приложение). При плавке на железо не нужно 40 кг/т тратить на науглероживание металла, и расчетный расход снижается до 200 кг/т. Правда, на отопление рекуператоров потребуется потратить еще примерно 85 кг/т сравнительно дешевого *энергетического* топлива. Общий расчетный расход топлива здесь, как и выше, близок к «идеальной» или оптимальной величине 285 кг/т ($200 + 85 = 285$).

Из этих данных видно, что имеются большие резервы уменьшения расхода топлива и, соответственно, увеличения производительности печи при том же дутье, за счет повышения полноты сжигания топлива.

Если в шахте печи нет топлива, только окатыши, то можно подавать дополнительное дутье на повышенных горизонтах печи и дожигать отходящие газы до CO_2 . Такое дополнительное дутье в домне не является вполне новым элементом, который потребовалось бы отрабатывать полностью заново, «с нуля». Подобное вдувание неоднократно опробовано, хотя и не получило распространения. Такое вдувание выполняли, в частности, еще в начале 20-го века в связи с работами по «железококсу», который получался при добавке руды в коксовые батареи. Но в домне всюду избыток топлива, и дополнительное дутье на любом горизонте в основном приводит к горению кокса, но не газов.

В агрегатах типа «Мидрекс» в ряде случаев выполняется и более сложная операция – замена газа на определенном горизонте печи, где отбираются газы, поднимающиеся снизу, и вдуваются новые. В целом вдувание дополнительного дутья и дожигание отходящих газов не представляются технически очень новой или очень сложной задачей.

Если в печи остаются лишь окатыши, убирается кокс, то это уже само по себе приведет к более полному окислению газов до CO_2 . При повышенных температурах > 600 °С окатыши, особенно гематитовые, сами способны интенсивно окислять газы до CO_2 по реакции восстановления; в равновесии они дают почти 100 % CO_2 . В шахте домны эти реакции компенсируются процессом газификации на поверхности кусков кокса. Здесь кокс генерирует CO , окатыши генерируют CO_2 , итоговый состав газов является результатом конкуренции этих двух противоположных процессов. Если убирается кокс, то генерация CO прекращается, и естественно возрастает доля CO_2 . Если в результате устранения кокса содержание CO_2 увеличится с 25 до 40 % (до равновесного значения при «температуре Мидрекс»), то расчетный расход топлива за счет этого уменьшится с 440 до 370 кг/т, то есть на 16 %, еще до дожигания газов.

Оптимальный вариант дожигания такой, при котором опускающиеся окатыши прогреются до максимально высокой температуры, до предплавления, а газы полностью окислятся до CO_2 . Окатыши могут прогреваться без плавления примерно до такой температуры, при которой ведут их обжиг, например, до 1300 °С. Если окатыши не смогут поглотить все тепло дожигания, то придется выпускать из печи недоокисленные или очень горячие газы, и ухудшать тепловой баланс печи. Это – неблагоприятный вариант дожигания. Чтобы не допустить таких потерь тепла, или чтобы уменьшить их, нужно, чтобы ниже зоны дожигания, в зоне восстановления, было достаточно угольной пыли, чтобы там шли интенсивные процессы восстановления, поглощающие тепло. В этом случае газы, поднимающиеся снизу в зону дожигания, будут не слишком горячими и будут содержать не слишком много CO . В этом случае химическое и физическое тепло газов можно эффективно и почти полностью утилизировать в зоне дожигания и при теплообмене выше зоны дожигания, где отходящие газы прогревают опускающиеся окатыши. Соответствующие подробные расчеты приведены в приложении, расчет 26.

В среднюю зону печи, в зону восстановления, здесь сверху поступают горячие (1300 °С) окатыши из зоны дожигания газов, а снизу – горячие (1550 °С) газы из зоны плавления. Чтобы реализовать поступающее физическое тепло, нужно вести в средней зоне интенсивное восстановление. Чтобы доставить сюда угольную пыль, можно вдувать ее с дутьем так, чтобы значительная часть пыли попадала не в зону горения

в факелах, а уносилась бы вверх, в область восстановления. Если не удастся организовать такое вдувание пыли с дутьем, то можно организовать прямое введение угольной пыли с небольшим количеством газа непосредственно в среднюю зону печи.

Ниже зоны дожигания опускающиеся горячие окатыши с температурой около 1300 °С переходят в зону восстановления, встречаются с поднимающимися восстановительными газами. Очевидно, здесь пойдут процессы косвенного восстановления более интенсивные, чем в домне или агрегате «Мидрекс», так как здесь значительно выше температура, и сюда из зоны дожигания поступают горячие (1300 °С) окатыши, которые содержат высшие окислы железа. Восстановимость таких окатышей и их термодинамическое сродство к СО повышены. Магнетит Fe₃O₄ при температуре порядка 1300 °С способен окислять газы до 90 % СО₂, поэтому восстановление магнетита до FeO может полностью пройти за счет косвенного восстановления с увеличением доли СО₂ в газах еще до их дожигания.

В целом в данной схеме трудно полностью использовать тепло дожигания газов и близко подойти к «идеальному» общему расходу топлива 285 кг/т. Ясно, однако, что дожигание газов даст значительное понижение расхода топлива, причем этот расход еще и до дожигания будет значительно меньше, чем в доменной печи. Если в шахте печи нет топлива, одни лишь окатыши, то такой столб шихты значительно лучше утилизирует химическое тепло поднимающихся газов. Окисление газов здесь будет значительно более полным, чем в шахте доменной печи. В агрегатах Мидрекс, где в шахте нет твердого топлива, достигается значительно более полное усвоение печью энергии топлива.

В предыдущей главе отмечено, что вдувание в домну пылевидного концентрата или его смеси с угольной пылью, а также вдувание пылегазовой взвеси с металлизированным концентратом лимитируется возможностями шахтной утилизации энергии отходящих газов. Когда доля вдуваемых пылевидных материалов начинает превышать долю кусковой шихты, каждый раз ухудшается усвоение химического и физического тепла газов в шахте печи. Но если в шахте печи остаются лишь окатыши, то возможности усвоения химического тепла газов увеличиваются, особенно при их дожигании. Шахта агрегата «угольный Мидрекс» утилизирует энергию газов лучше, чем шахта домны. В этом агрегате можно не только все топливо вдувать в виде угольной пыли, но всыпать в дутье и вдувать в печь и значительные количества мелкого или пылевидного концентрата так, как это рассмотрено в разделе 2.3.

3.7. Возможности окислительной зоны дожигания газов

Если все так просто, то почему
этого никто не сделал?

Д. В. Благин

Тепло дожигания газов в печи трудно использовать иначе, чем на нагрев окатышей. Поэтому за счет этого тепла в зоне дожигания следует нагреть окатыши до максимально допустимой температуры, до расплавления, примерно до температуры обжига окатышей, например, 1200-1300 °С. В этой зоне окатыши пройдут как бы *второй обжиг*. Заманчиво было бы в связи с этим отказаться от первого обжига окатышей, который выполняется на ГОКе на конвейерной ленте, составленной из полет. Заманчиво отладить загрузку в шахтную печь дешевых необожженных окатышей. Опасность состоит в том, что при больших механических нагрузках необожженные окатыши будут разрушаться, дадут много мелочи и понизят газопроницаемость в шахте печи.

Чтобы избежать этого, можно сделать окислительную зону «Угольного Мидрекса» несколько меньше, например, 1,5-2 метра, и сократить тот путь, который до обжига должны пройти необожженные окатыши, чтобы не подвергать их чрезмерным нагрузкам. Условия обжига в зоне дожигания газов можно сделать примерно такими же, как и на обычной обжиговой конвейерной машине. Прочность загружаемых необожженных окатышей можно повысить некоторым увеличением добавки вяжущих веществ (например, цемента) при их окомковании. Лотош В. Е. и другие предлагали даже за счет увеличенной добавки вяжущих обеспечивать вообще без обжига всю необходимую прочность окатышей.

Загрузочный аппарат печи нужно видоизменить так, чтобы загрузка окатышей была более «мягкой» и не приводила к их деформации и разрушению. Можно также откорректировать профиль печи в этой зоне так, чтобы здесь не происходило пересыпаний окатышей. В целом имеется достаточно возможностей устранить опасность разрушения окатышей при обжиге в верхнем слое шихты.

Если отлаживается обжиг окатышей в зоне дожигания газов, то почти полностью устраняются все четыре несообразности домны, отмеченные в главе 1. Хотя здесь используется не пылевидный концентрат, а необожженные окатыши, но они получаются из концентрата с помощью недорогой и несложной холодной операции окомкования. Основные затраты при производстве обожженных приходятся на стадию обжига.

В зоне дожигания газов можно создать сильно-окислительную атмосферу со значительным количеством CO_2 и даже с присутствием кислорода в газах. Такая атмосфера благоприятна для выжигания серы и фосфора.

Эти вредные примеси металла имеют меньшее сродство к кислороду, чем углерод, поэтому они почти не выгорают в присутствии углерода. В конвертере концентрация серы и фосфора почти не уменьшается, пока не выгорит почти весь углерод (см. рис. 2.4). В окислительной атмосфере зоны дожигания газов создаются благоприятные условия для выгорания серы и фосфора.

В современном цикле в целом недостаточно условий для развития окислительных процессов, что, в частности, увеличивает трудности с серой и фосфором. В доменной печи всюду избыток топлива, и всюду восстановительная атмосфера; окиси углерода СО в газах везде больше, чем двуокиси СО₂, кислорода практически нет и, соответственно, нет возможностей для развития окислительных процессов. В сталеплавильном агрегате металл уже перевосстановлен, и создание сильноокислительной среды в нем невозможно.

В зоне дожигания газов может идти также окислительный обжиг железорудных материалов в окатышах, если дожигание вести при избытке дутья и создать там значительную концентрацию кислорода. В таком процессе магнетит Fe₃O₄ частично или полностью превращается в гематит Fe₂O₃, и восстановимость руды повышается.

В этой зоне может идти также обжиг известняка или обжиг сидеритовых руд. Эти процессы часто невыгодно вести в присутствии углерода, так как углерод может превращать выделяющийся углекислый газ СО₂ в СО по реакции газификации. Так как тепло в домне дорого, то сейчас эти процессы оказывается выгоднее вести в отдельных печах, проводить дополнительный цикл нагрева-охлаждения, а в домну загружать уже обожженные холодные материалы. Но если в зоне дожигания возникает проблема с избытком тепла, целесообразно выполнять здесь такие процессы обжига. Если в предлагаемом агрегате тепло горения топлива будет примерно в 10 раз дешевле, чем в домне, то предварительные процессы обжига сидеритов и известняка потеряют смысл; будет разумнее совместить их с основной плавкой.

В доменной печи, на ее верхних горизонтах прогревается загруженный кокс; здесь из него выделяются летучие углеводороды и их производные. Они загрязняют «нефтепродуктами» воду, используемую для мокрой пылеочистки колошниковых газов. Это создает значительные экологические проблемы. Летучих выделяется еще больше, если к коксу добавляют уголь. Но если в агрегате есть зона дожигания газов, то все подобные летучие углеводороды сгорят.

Таким образом, в зоне дожигания газов можно провести ряд процессов, нужных для получения металла, и тем самым реализовать избыточное тепло этой зоны.

3.8. Почему не плавят сразу же окатыши в агрегатах типа «Мидрекс»

Что-то подозрительно просто тут
решаются тут вековые проблемы.

Из дискуссии

Окатыши, металлизированные в агрегате Мидрекс при температуре около 750°C , охлаждаются потоком холодного природного газа. Далее они хранятся на складе, причем такое хранение сопряжено с опасностями самовозгорания окатышей, и требует ряда предосторожностей. Затем их плавят в электропечи, и обычно в результате расплавления практически сразу получается рядовая сталь. Электропечь часто используется лишь для плавления окатышей, а легирующие добавки (а иногда и недостающий углерод) добавляются уже в ковше. Возникает вопрос: почему бы металлизированные окатыши не расплавить уже в шахтной печи, сразу после их металлизации? Плавление за счет горения топлива может быть намного дешевле, чем за счет электроэнергии.

«Мидрекс» работает на природном газе, а горение природного газа CH_4 в присутствии углерода идет лишь до CO и H_2 и дает очень мало тепла, всего 4 % полной теплоты горения. Вдувание природного газа в домну приводит к охлаждению горна. Если факел природного газа с кислородом доходит до равновесия с углеродистым металлом, то такой факел даст «отрицательное отопление», будет не нагревать, а охлаждать жидкий металл. Невозможно без окисления (без горения металла) расплавить металлизированную массу на чугун или сталь природным газом.

Если плавить металлизированную массу не на чугун, а на железо, то можно газы CO в факеле на 25 % окислять до CO_2 . Если получится 25 % CO_2 в равновесной смеси CO и CO_2 , то в сопутствующей равновесной смеси H_2 и H_2O будет 45 % H_2O . При таком горении природного газа можно получить больше тепла, но и в этом случае расчетная температура горения составит лишь 1730°C , и такой факел в лучшем случае сможет отдать расплавам лишь $1730 - 1550 = 180^{\circ}\text{C}$, если ванна имеет температуру 1550°C . Плавление практически становится реальным лишь в том случае, если, например, природный газ нагреть в рекуператоре.

Проще к газу, вдуваемому в зону плавления, добавить угольную пыль. Расчетная температура горения пыли в кислороде до 25 % CO_2 составляет 3100°C , а расчетный расход угольной пыли на нагревание железа от 750 до 1550°C и плавление составит 85 кг/т.

Конечно, экономически целесообразно такое плавление металлизированных окатышей, полученных в агрегате Мидрекс. Такое плавление заменяет сталеплавильный передел, дорогую плавку в электропечи.

Обсуждаемый газовый Мидрекс с плавкой стали может быть значительно экономичнее, чем современные комплексы Мидрекс – электропечь. Metallурги не осваивают такие процессы также из-за давления традиционной идеологии, из-за старого убеждения, что «двустадийный процесс эффективнее», а металлизированную массу нужно плавить лишь на чугун. Сейчас часто не рассматривается возможность плавления металлизированного сырья на безуглеродистое железо даже и в электропечи, хотя такой расплав просто превращается в сталь добавкой углерода.

Сейчас не отлажен и сам процесс плавления спекающейся массы окатышей в шахтной печи. Этот неопробованный новый процесс часто представляется пугающе-непонятным, и поэтому весьма сложным. В принципе такое плавление понятно, но действительно сложно предусмотреть заранее все его особенности. Пока процесс не опробован, можно высказывать многочисленные опасения. Ситуация упростится, если выполнить опробование данного плавления хотя бы в лабораторных условиях или на полупромышленной установке.

Правда, если мы введем плавку окатышей на угольной пыли в обычном агрегате Мидрекс, который работает на газе, то естественным следующим шагом будет перевод уже и восстановления также с газа на угольную пыль. Будет целесообразно уже полностью перейти к схеме «угольный Мидрекс» соответственно рис. 3.1 или рис. 3.2, особенно при современных высоких ценах на газ. Станет ненужной дорогая установка конверсии отработанного газа, в которой реакция проводится на катализаторах.

3.9. Металлизация с дожиганием газов

Я уверен, что эти мысли не банальны.

Е. Примаков

Дожигание газов может быть полезно и в процессах металлизации. Эти возможности мы сейчас обычно не только не используем, но и даже и не осознаем, как и многие другие вопросы усвоения в печи (утилизации) энергии отходящих газов.

Возможен следующий процесс металлизации (рис. 3.4). В шахту печи загружаются только окатыши. Внизу создаются факелы дутья из угольной пыли с кислородом, причем кислорода дается немного, так что до СО сгорит только 25 % пыли. Когда такая система приблизится к равновесию, получится взвесь оставшихся 75 % угольной пыли в СО с температурой смеси 880 °С. Конечная температура образующейся взвеси тем выше, чем больше дается кислорода на горение. Данная взвесь угольной пыли и СО, поднимаясь в шахте печи, металлизует окатыши. На верхнем горизонте образующиеся газы дожигаются до СО₂ дополнительным дутьем кислорода или воздуха, и за

счет тепла дожигания загруженные окатыши (еще не восстановленные) прогреваются до предплавления, до 1300°C . Тепла, запасенного окатышами в зоне дожигания, а также тепла вдуваемых снизу горячих газов должно хватить на эндотермические реакции прямого восстановления в шахте. Косвенное восстановление идет с некоторым выделением тепла. Если выявится недостаток тепла, нужно повысить количество кислорода и, соответственно, температуру взвеси, вдуваемой снизу. При большом недостатке тепла можно при необходимости добавлять дутье еще и в средних горизонтах печи, в зоне восстановления. Тепловой баланс нужно подобрать таким, чтобы металлизированная масса выгружалась при температуре около 800°C , как и в обычном агрегате Мидрекс. Здесь целесообразно прессование горячих окатышей в брикеты валковым прессом аппарата выгрузки, как в варианте Хилл-3. Если температура опустится ниже 720°C (ниже «температуры Мидрекс»), то восстановление железа углеродом сменится уже окислением железа.

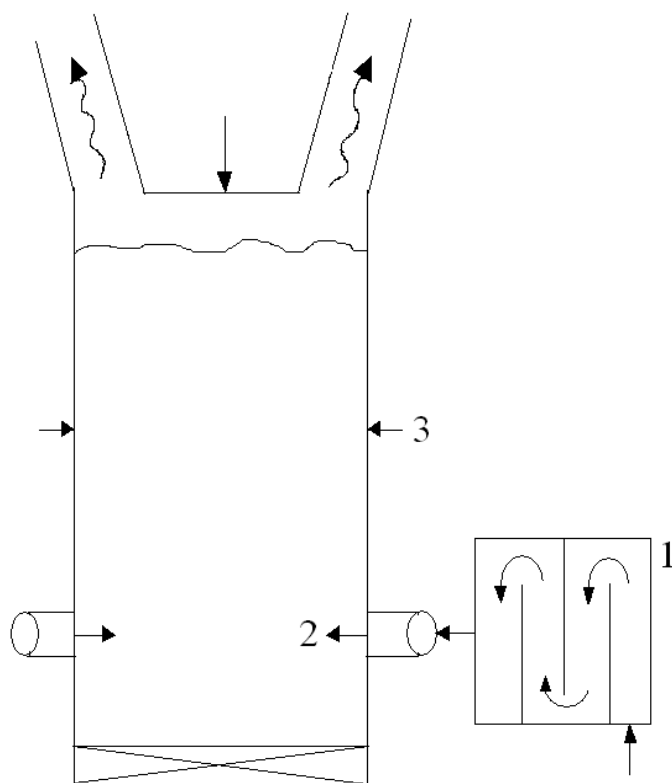


Рис. 3.4. Схема металлургического агрегата «угольный Мидрекс с дожиганием газов»: 1 – реакционная камера с 4-мя коленами; 2 – вдувание угольной пыли и CO ; 3 – вдувание дутья на дожигание газов; 4 – механизм выгрузки металлизированного сырья

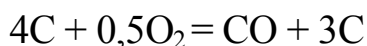
Если магнетит восстанавливается углеродом с образованием CO , то стехиометрический расход углерода составляет 285 кг/т . Практически возможно восстановление с образованием до $40\% \text{ CO}_2$, поэтому расход топлива будет меньше 285 кг/т . Тепла дожигания газов будет достаточно для прогрева окатышей до температуры предплавления.

В обычных процессах металлизации без дожигания газов расход топлива намного больше, например, около 1500 кг/т в упоминавшемся агрегате по способу Хоганес в Монголии.

В предлагаемом процессе выгоднее возможно большую часть дутья расходовать вверху, в зоне дожигания газов. Если окатыши содержат много пустой породы, то их теплоемкость будет выше, и они смогут запастись больше тепла в зоне дожигания. В принципе возможен даже такой вариант, когда внизу вообще не потребуется дутье, и нужно будет здесь лишь впрыскивать пылевидный восстановитель – угольную пыль.

Такой процесс возможен и при использовании не кислорода, а горячего воздуха. Топливом и восстановителем может служить также и природный газ. Такой агрегат металлизации природным газом будет проще агрегата Мидрекс, выполняющего те же функции. Кроме того, в этом случае можно отказаться от дорогой системы регенерации газа на катализаторе, которая необходима в обычном агрегате Мидрекс.

Если снизу вдувается угольная пыль и частично горит в кислороде, то некоторые участки факелов могут оказаться слишком горячими, так что местами начнется нежелательное плавление окатышей. Чтобы этого не случилось, можно реакцию образования восстановительной пылегазовой взвеси проводить в отдельной реакционной камере. Такую реакцию можно записать формулой



Тепло горения углерода до CO достаточно для нагревания получающихся двух грамм-атомов продуктов горения (CO) до 2200 °С или пяти грамм-атомов в данной реакции до $2200 \cdot 2/5 = 880$ °С. Объем реакционной камеры (или реактора) может быть в несколько раз больше объема факела; соответственно, время реагирования в камере также будет в несколько раз больше, чем в факеле, и система ближе подойдет к равновесию. На выходе из камеры температура всюду будет близка к среднему значению 880 °С.

Чтобы не вызвать оплавление окатышей в зоне дожигания газов, в принципе можно и эту реакцию проводить в отдельном реакторе. При этом перед зоной дожигания потребуется изъять из шахты поднимающиеся газы в камеру дожигания, а выше на их место подать уже газы, прошедшие дожигание. Подобная операция замены газов на определенном горизонте делается в агрегатах Мидрекс.

Движение пылегазовой взвеси в обсуждаемой реакционной камере должно быть достаточно быстрым, как и в рекуператоре, чтобы предотвратить оседание взвеси. Камеру (реактор) можно выполнить с несколькими «коленами». Вообще роль такого реактора близка к роли рекуператора или теплообменника при металлизации пылегазовой взвеси (разделы 3.7, 3.8). Реакционную камеру можно рассматривать как неоттапливаемый

рекуператор. Пылегазовую взвесь для вдувания в шахтный агрегат металлизации можно приготовить и в рекуператоре (или теплообменнике), причем можно сжигать там меньше угольной пыли, чем в реакционной камере. Часть тепла, необходимого для нагревания взвеси до конечной температуры 880°C , можно получить от рекуператора, а не от реакции горения.

3.10. Футеровка

Рассуждать легко. Наверное, автор сам никогда ничего не внедрял.

Из дискуссии

При плавке на железо важный новый элемент обсуждаемых процессов – сталеплавильная футеровка ванны и днища шахтной печи. Большое преимущество домны состоит в том, что ее футеровка выдерживает, например, 10 лет непрерывной работы, хотя при этом может раствориться сотни тонн, или даже тысяча тонн угольных блоков на днище печи. Правда, сейчас угольная футеровка домны становится уже ее слабым местом; много аварий происходят из-за чрезмерного растворения футеровки и прорыва жидкого металла из печи в цех.

В сталеплавильных агрегатах не допускается столь большой износ футеровки, измеряемый сотнями тонн. Здесь футеровка часто имеет меньшую стойкость по сравнению с доменной. Однако сейчас стойкость электропечей, конвертеров, ковшей при хорошей футеровке составляет уже несколько сотен, даже тысяч плавок. Стойкость футеровки ванны агрегата (см. рис. 3.1) можно дополнительно повысить за счет использования элементов водяного охлаждения, применения более современных и качественных огнеупоров, путем увеличения толщины слоев футеровки. Можно выполнить футеровку в несколько слоев кирпичей огнеупоров, довести толщину футеровки лещади до доменных значений в несколько метров, причем в каждом ее слое предусмотреть водяное охлаждение. При разрушении слоя его водяное охлаждение придется отключить, но футеровка будет защищена охлаждением следующего слоя. При такой футеровке и в агрегате «Угольный Мидрекс» работа может продолжаться даже при растворении сотен или тысячи тонн огнеупоров на лещади.

Можно использовать более высокую управляемость агрегата «Угольный Мидрекс» при вдувании большей части материалов снизу. Если агрегат можно достаточно быстро остановить и запустить, почти как сталеплавильный агрегат, то во время таких краткосрочных остановок можно также и «заправлять» футеровку сталеплавильными приемами, например, методом торкретирования, если отладить введение соответствующих механизмов в корпус печи. Правда, это очень непривычно для домны, но технически вполне осуществимо.

При плавке на чугун, если в шлаке и металле избыток угольной пыли и углерода, то поверх сталеплавильной футеровки могут образоваться и отложения углерода, подобные угольной футеровке.

Значительно более сложные задачи по футеровке приходится решать при создании процессов типа «Ромелт». В таких случаях приходится выполнять футеровку из чугунных водоохлаждаемых кессонов, на которых нарастает затем слой гарнисажа. В крайнем случае, можно подобную футеровку применить и на каких-то участках «Угольного Мидрекса».

Расходы на футеровку в агрегатах по схемам рис. 3.1, 3.2, 3.3 будут, возможно, более высокими, чем в доменном процессе, но меньшими, чем при современном доменном и сталеплавильном переделе вместе. Агрегат по этой схеме будет, очевидно, также значительно сложнее и дороже, чем эквивалентная доменная печь, но дешевле, чем доменная печь в сумме со сталеплавильными агрегатами, перерабатывающими ее чугун. При этом расходы на футеровку и даже вся амортизация печей не являются самыми крупными статьями в стоимости металла. Вся амортизация составляет, например, 1,5 % себестоимости чугуна [8]. Если будет достигнуто производство стали из окатышей одним процессом, причем без кокса и с экономичным полным сжиганием угля, то такая сталь будет, очевидно, дешевле, чем чугун сейчас, и, например, в 2-3 раза дешевле современной рядовой стали.

3.11. Выносной горн-отстойник. О качестве получаемой стали

Идея проста до глупости
А. Толстой

В варианте рис. 3.3 для лучшего перегрева жидкого металла и для коррекции его состава предусмотрен выносной горн-отстойник, соединенный с основным корпусом агрегата, так что газы из отстойника идут в основной корпус. В отстойнике можно разместить устройство для вдувания в металл углеродистых порошков; с помощью таких устройств увеличивают содержание углерода в металле в современных электропечах. Если мы пока еще не отладили отопление, прогревание расплавов доменной фурмой, вынесенной в отстойник, то можно поставить здесь обычную конвертерную кислородную фурму. Можно при необходимости прогревать жидкий металл с помощью такой фурмы.

В принципе, как регулирование температуры жидкого металла, так и корректировку содержания углерода до попадания в анализ может выполнять доменная фурма с вдуванием угольной пыли. Таковую фурму, вынесенную в отстойник, можно отладить для выполнения обеих этих функций. Фурма может быть наклонной, вмонтированной в стенку, или вертикальной, вмонтированной в свод отстойника. Следует предусмотреть возмож-

ность варьировать интенсивность дутья и подачу угольной пыли в широких пределах. Наклонный факел может обеспечить перемешивание жидкого металла. В настоящее время такое использование доменного дутья выглядит очень непривычным, но здесь не видно каких-то принципиальных технических сложностей.

Отметим, что при добавке углерода температура плавления металла понижается примерно на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ на процент добавки, поэтому науглероживание как бы увеличивает «перегрев» металла над точкой плавления. Для многих технологических целей достаточен такой «перегрев», и можно обойтись без прогревания металла в горне – отстойнике.

Сейчас в сталеварении распространен процесс электропечь – ковш, в котором задача электропечи состоит лишь в том, чтобы расплавить металл, перегреть его, например, на $100\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры плавления и довести до нужного содержания углерода. Тем самым получается рядовая сталь, которую можно использовать сразу как рядовую или же направлять на улучшение качества. Операции легирования, а иногда еще и вакуумирования, раскисления и др. выполняют уже в ковше.

Вполне очевидно, что в выносном горне-отстойнике агрегата (см. рис. 3.1) больше, чем в ковше, возможностей точно довести расплав до нужного содержания углерода и до заданного перегрева, то есть до того качества, которое имеет сталь, полученная расплавлением шихты в электропечи перед спуском в ковш. В отстойнике возможно и более глубокое рафинирование стали.

Обилие дешевого тепла позволяет также при необходимости повысить температуру процесса в основном корпусе. Это позволит при плавке на чугуна более полно восстанавливать естественные легирующие компоненты руды, например, ванадий, марганец, кремний, титан в случае качканарских руд. Не приведет к существенным потерям увеличение расхода известняка для лучшего удаления серы и др.

Если в отстойнике факел дутья (кислородного или доменного) доходит до равновесия с углеродистым металлом, то в самом отстойнике получится неэкономичное горение углерода без утилизации химической и физической энергии отходящих газов. Как отмечено выше (раздел 2.2), ванна получит в этом случае примерно лишь $1/10$ всего возможного тепла горения. Расчетный расход углерода для нагрева металла в отстойнике на $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ получается равным 16 кг на тонну металла (см. приложение). Но отстойник подсоединен к основному корпусу агрегата «Угольный Мидрекс», и для системы в целом получится хорошая утилизация энергии газов. Расчетный расход топлива на нагрев металла для системы оказывается почти на порядок величины меньше – 2 кг/т . В отстойнике по-прежнему потребуются сжечь 16 кг углерода, но будет сэкономлено 14 кг углерода в основном корпусе, где дожигаются и охлаждаются газы из от-

стойника. В целом дополнительный расход углерода получается всего $16 - 14 = 2$ кг на тонну (расчёт 10 приложения). Тепловой баланс самого отстойника плохой, но баланс системы в целом – хороший. Примерно так же в домне горн теряет почти все химическое и физическое тепло отходящих газов, но значительная часть этой энергии усваивается в шахте печи.

Определенный недостаток выносного горна, выполненного вместе с основным корпусом, состоит в том, что обычно в нем нужно поддерживать такое же повышенное давление, как и в горне основного корпуса, поэтому устройство для введения кислородной фурмы должно выполняться герметическим. В горне-отстойнике можно наводить рафинировочный шлак, но небольшие устройства для добавки сыпучих по конструкции должны быть примерно такими же, как и загрузочные устройства домны на колошнике.

При остановке продувки (например, при замене фурм) в выносной горн отстойник можно вводить через соответствующий люк механизмы для торкретирования футеровки и других операций. При возобновлении продувки такой люк должен герметически закрываться. Подобные герметические соединения применяются в агрегатах вакуумирования стали.

Устройство таких герметически закрывающихся люков в стенке конвертера или домны, устройство течек для введения сыпучих в область повышенного давления, сейчас представляется очень непривычным и необычным. Но соответствующие технические сложности вполне преодолимы.

Если управляемость такого агрегата будет примерно такой же, как у сталеплавильных агрегатов, то останавливать и запускать снова его можно будет столь же легко и столь же часто. Можно выполнять много операций, требующих остановки продувки.

В целом агрегат «Угольный Мидрекс» с отстойником получается значительно сложнее, чем доменная печь. Здесь возможны повышенные расходы на футеровку, меньший межремонтный период, более частые остановки агрегата, но эти остановки будут менее затратными благодаря высокой управляемости процесса. Такие неудобства для конечной эффективности процесса оказываются обычно намного менее значимыми, чем качество теплового баланса и экономия на сырье. Все расходы на амортизацию доменной печи составляют лишь 1,5 % стоимости чугуна [8]. Топливо и окатыши вносят около 90 % стоимости металла и экономия на них значительно важнее для экономической эффективности агрегата в целом, чем упрощение его конструкции. По мере развития техники и роста ее возможностей очень многие агрегаты становятся сложнее, это обычный путь развития. Целесообразно пойти на такое усложнение агрегата и преодолеть соответствующие технические трудности.

Несколько столетий вводили дополнительные переделы, чтобы упрощать или не усложнять процесс в шахтной печи. При современном

уровне техники можно несколько усложнить шахтную печь ради уменьшения лишних переделов. При этом можно пойти на некоторое удорожание данной стадии цикла, стоимость которой составляет сейчас всего лишь около 5 %, чтобы получить экономию «в разы» большую на остальных стадиях, составляющих 95 % стоимости цикла.

3.12. Перевод домны на последовательную продувку

В домне все взаимосвязано. Как у человека:
болит голова, а укол ставят в ягодицу.

Из дискуссии

Если в шахте печи остаются только окатыши, то такой столб сыпучих значительно лучше утилизирует химическую энергию отходящих газов по сравнению с обычной доменной шихтой. Переход к такой схеме значительно понизит расход топлива. Далее, в верхней зоне такого столба окатышей можно организовать также дожигание отходящих газов. При полном окислении CO до CO_2 расчетный расход углерода топлива сокращается до 240 кг/т, тогда как при обычном для домны значении 25 % CO_2 получается 440 кг/т.

Если мы не хотим пока отлаживать плавление массы M металлизированных окатышей на поду печи или над ванной, а хотим пока сохранить традиционное плавление на слое кокса, то можно и в этом случае оставить в шахте лишь окатыши. Можно перевести доменную печь на такую последовательную продувку с минимальными перестройками; достаточно над фурмами сделать течи (рис. 3.5), и всыпать через такие течи кокс прямо в факелы доменного дутья. Над каждой фурмой можно разместить трубу диаметром, например, 20-30 см, через которую материалы могут всыпаться или «течь» в газовые потоки факелов, в фурменные очаги – газовые мешки размером порядка 2 м, которые образуются около фурм.

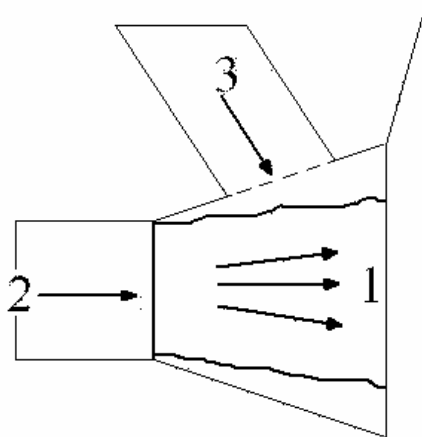


Рис. 3.5. Схема течи для подачи сыпучих:
1 – факел дутья; 2 – фурма; 3 – течь с потоком сыпучих

Конечно, в течки нужно подавать материалы из закрытого бункера, в котором давление газов такое же, как в печи. Засыпное устройство может быть примерно таким же, как и на колошнике домны, но на порядок меньшей производительности, одно на несколько фурм или даже одно на все фурмы. Конструкция должна обезопасить трубу 3 от чрезмерных термических воздействий, а выход такой течки (как и жерло фурмы) от воздействий доменного гарнисажа, расплавов и др. При необходимости можно предусмотреть операции ухода за течкой при смене фурм, когда продувка останавливается. Течка и фурма могут быть объединены в единый конструктивный узел.

При работе фурмы мощный газовый поток факела действует как «эжектор»; в него всасываются, увлекаются окружающие газы и кусочки шихты. Материалы, засыпаемые через течку, будут увлечены этим газовым потоком факела и разнесены по горну печи примерно так же, как куски кокса и окатыши переносятся факелами в доменных печах.

За счет такой подачи кокса можно поддерживать, пополнять коксовую насадку печи, рис. 3.6. Факелы могут разнести поступающий кокс по объему нижней части печи. Можно создать у фурм давление дутья, способное поднять весь столб шихтовых материалов, поэтому в принципе есть возможность заполнять печь кусковым материалом снизу, через течки. В то же время следует подавать угольную пыль в избытке, чтобы горение кокса было минимальным. Кокс здесь нужен не как топливо, но как «заполнитель пространства», как насадка. Теоретически здесь слой кокса можно заменить слоем огнеупорных материалов.

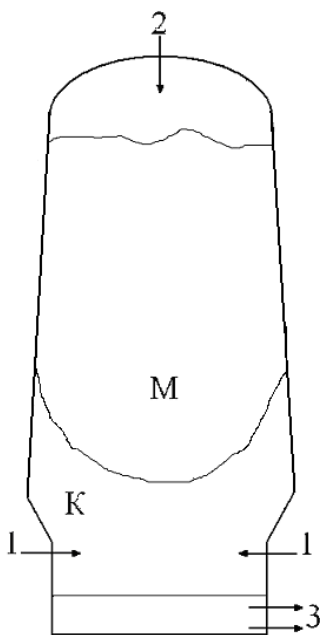


Рис. 3.6. Схема доменного процесса с элементами последовательной продувки:

- М – масса металлизированных и плавящихся окатышей; К – зона кокса;
- 1 – дутье с вдуванием угольной пыли, концентрата и с введением кускового кокса через течки; 2 – загрузка окатышей; 3 – летки

Всыпaeмый через тeчки кокс нужен для пополнения коксовой насадки, на которой традиционно идет плавление металлизированных материалов. Чтобы уменьшить расход кокса и общий расход топлива, нужно давать угольную пыль в избытке по отношению к дутью, чтобы пыль поглощала почти весь кислород дутья и кокс почти не горел. Желательно, как и выше, чтобы избыточная угольная пыль увлекалась потоками газа в более высокие горизонты печи, чтобы пыль участвовала в восстановлении окатышей в массе М и в науглероживании плавящегося металла.

Если коксовая насадка формируется через тeчки снизу, то сверху загружаются одни окатыши. Тем самым создаются условия для более полного горения топлива. В отсутствие топлива легковосстановимые руды при повышенной температуре способны сами достаточно полно окислять газы дутья почти до 100 % CO_2 . Тем самым можно добиться малого расхода топлива в печи, хотя здесь и не удастся подойти близко к теоретическому пределу (240 кг/т, расчёт 1 приложения).

Препятствием к данному изменению процесса будут в основном также не технические, а психологические сложности. Если удастся принять решение о создании течек над фурмами, потеснить в этом пункте доменную идеологию, то при небольших перестройках будет значительно понижен расход топлива в целом и, соответственно, повышена производительность печи при данной газопроницаемости. Топливом в основном будет угольная пыль, расход кокса можно, очевидно, свести до незначительной величины, например, до 50 кг/т.

Распространено определенное предубеждение, что в футеровке доменной печи недопустимы какие-то отверстия, тeчки и др. Между тем подобная тeчка всего лишь непривычна, но не представляет, очевидно, каких-то принципиальных опасностей.

3.13. Способы введения топлива непосредственно в зону горения, в факелы

Только не смешивай руду и топливо, вся премудрость.

Из дискуссии

Возможны различные схемы перевода печи к последовательной продувке. От доменной совместной продувки топлива и руды к последовательной продувке можно перейти, если не загружать топливо вместе с окатышами через колошник, а, минуя шахту печи, доставить топливо, как и вдуваемую угольную пыль, непосредственно в зону горения, желательно в газовые потоки факелов. Рассмотрим способы такой доставки топлива к факелам.

Агрегат с топливным и рудным корпусами, аналог каталонского горна.

Рассмотрим схему (рис. 3.7), в которой топливо загружается в топливный отсек Т, окатыши загружаются в рудный отсек М. Ниже топливо и рудная компонента приходят в контакт, так как разделяющая отсеки перегородка заканчивается. Такой процесс подобен каталонскому процессу получения железа в средневековой металлургии.

Продуваемые газы сначала идут горизонтально из зоны топлива в зону окатышей, затем поднимаются в рудном отсеке с массой М. Если газовые потоки не очень интенсивные и мало влияют на перемещение шихты, то равновесие столба топлива и столба окатышей в схеме (см. рис. 3.7) будет соответствовать закону сообщающихся сосудов.

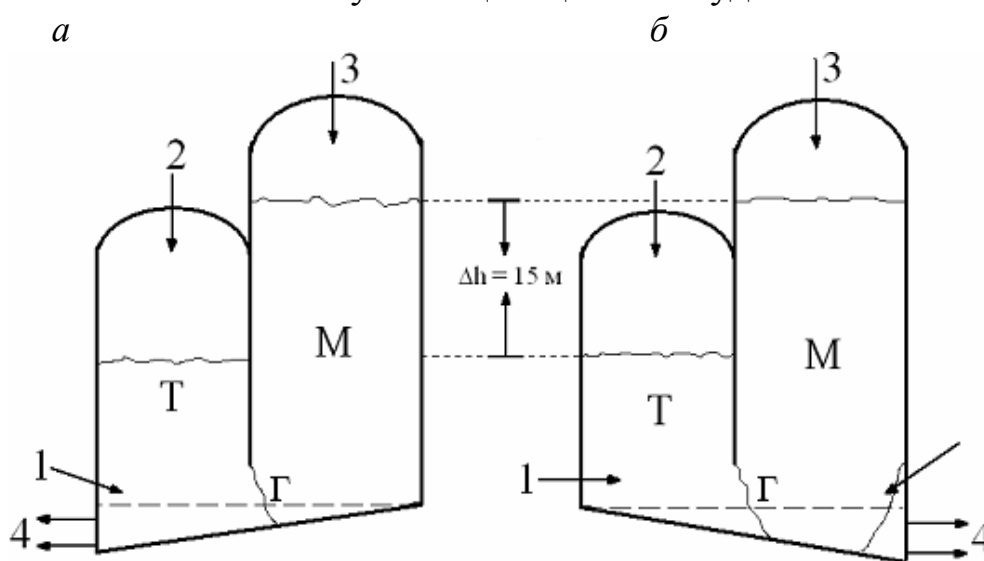


Рис. 3.7. Схема загрузки топлива и руды в разные отсеки:

а – плавка на чугун; *б* – плавка на железо:

1 – дутье; 2 – загрузка топлива; 3 – загрузка окатышей; 4 – летки

Если продувка примерно столь же интенсивная, как и в домне, то и перепад давления дутья ΔP в шихте составит также примерно 1,5 атм, как и в доменной печи. При этом равновесие столба топлива и столба окатышей наступит тогда, когда столб шихты в рудном отсеке М будет примерно на $\Delta h = 15$ м выше столба топлива в отсеке Т. При необходимости можно создать высокую (15 м) коксовую насадку за счет кокса, вводимого через точки над фурмами.

В этой схеме получится «плавка на железо», если жидкий металл будет скапливаться в зоне окатышей, и «плавка на чугун», если жидкий металл скопится под слоем топлива (см. рис. 3.7).

Если топливо загружается в отдельный отсек, то горячее дутье можно прямо из трубопровода, без фурм, просто подавать в верхнюю пустую часть этого отсека.

Часто считается, что дутье через фурмы, формирование интенсивных скоростных факелов в доменной печи обеспечивает достаточно равномерное распределение газовых потоков по всему большому сечению печи, обеспечивает доставку дутья по всей длине радиуса печи, вплоть до центра большой печи. Но практически доменная фурма заполняет дутьем лишь «фурменный очаг» размером около 2 м, дальше газы истекают из этого очага достаточно равномерно уже по всем направлениям, их распределение идет уже практически без влияния инерции исходного потока газа из фурмы.

В агрегатах без фурм (см. рис. 3.7) достаточно равномерное распределение дутья можно обеспечить соответствующей геометрией отсеков. Целесообразна загрузка топлива и окатышей преимущественно ближе к перегородке, разделяющей отсеки. Для равномерного распределения газовых потоков требуется, чтобы различные возможные пути движения газов в шихте имели приблизительно одинаковую длину.

Дутье через фурмы сопряжено с большими потерями тепла газов в водоохлаждаемой фурме, с частыми остановками продувки для смены фурм, поэтому устранение сложного фурменного хозяйства дало бы значительный экономический эффект.

Далее, в этой схеме слой топлива может иметь небольшую толщину, его куски не подвергаются давлению и истиранию, пересыпаниям, как в шахте доменной печи. Поэтому здесь благоприятные условия для частичной или даже полной замены кокса кусковым углем.

Введение топлива через кольцевое пространство и образование топливной оболочки вокруг металлизированной массы М.

Кусковое топливо можно загружать в отдельный отсек, который затем смыкается с основным рудным корпусом агрегата выше уровня фурм, где заканчивается перегородка, разделяющая отсеки. Кусковое топливо можно вводить через кольцевое пространство вокруг основного «рудного» корпуса «Мидрекс» с окатышами (рис. 3.8).

Топливо и окатыши загружаются в разные отсеки, но ниже разделительной перегородки П топливо и рудная компонента приходят в контакт и далее опускаются вместе. Масса М металлизированных окатышей в горне в этом случае окажется заключенной в топливную оболочку по боковым поверхностям. Такая угольная оболочка может работать также в качестве графитовой смазки, которая облегчает движение спекающейся массы М окатышей в корпусе агрегата и уменьшает опасность зависания шихты. При такой загрузке топлива кокс, видимо, можно практически полностью заменить кусковым углем.

Если факелы будут иметь столь же высокую скорость газа, как в доменной печи, то куски топлива будут сноситься газовыми потоками факелов к центру печи, вглубь плавящейся массы М металлизированных окатышей, обеспечивая ее науглероживание и плавление.

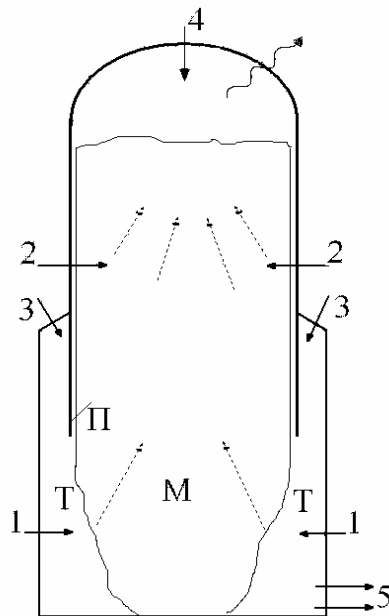


Рис. 3.8. Схема введения топлива Т через кольцевое пространство вокруг основного корпуса:

- 1 – фурмы основного дутья; 2 – дополнительное дутье для дожигания отходящих газов;
3 – загрузка топлива; 4 – загрузка окатышей; 5 – летки; П – перегородка, отделяющая топливо от окатышей

Топливный отсек Т не обязательно должен охватывать всю окружность агрегата; он может состоять из ряда отдельных секторов, каждый из которых «нацелен» на свою фурму. В этом случае топливо на каждую фурму будет подаваться из своей «врезки» в футеровке печи. Каждая «врезка» может иметь размер, например 0,5-1,0 м. Каждая врезка прибавит к потоку опускающейся шихты свой поток топлива размером, например 0,5-1,0 м (рис 3.4).

Газогенератор в отдельном отсеке.

Топливо можно сжигать в отдельных отсеках, в газогенераторах Г (рис. 3.9). Если газогенератор размещается непосредственно около основного корпуса М и горячие восстановительные газы поступают в основной рудный корпус из газогенератора прямо через окно, то можно получать максимально горячий генераторный газ, как и в топливной зоне печи, например, с температурой 2000 °С.

Сейчас в ряде случаев в домну вдувают газогенераторный газ [7, 8], но его доставляют в печь по газопроводу и, соответственно, температура его невелика. При этой схеме невозможно доставить в печь всю возможную энергию газогенерации.

В агрегате «Корекс» излишнее тепло газогенератора тратится на плавление металлизированной массы, которая продувается генераторным газом в другом корпусе, а затем перегружается на поверхность угля в газогенератор. Процесс разделяется практически на два агрегата.

Излишнее тепло горения топлива в газогенераторе можно утилизировать, добавляя в дутье водяной пар, который даст водород, ускоряющий металлизацию. Избыток тепла будет меньше также при использовании углей с повышенным содержанием углеводов.

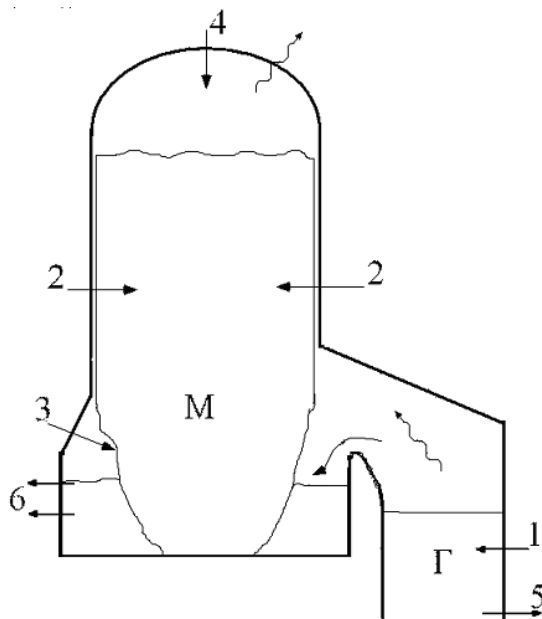


Рис. 3.9. Схема агрегата «Угольный Мидрекс» с газогенератором:

Г – один из газогенераторов; 1 – фурмы основного дутья в газогенераторе; 2 – дополнительное дутье для дожигания отходящих газов; 3 – фурмы корректирующего дутья; 4 – загрузка окатышей; 5 – жидкое золоудаление газогенератора; 6 – летки

В принципе генераторный газ использовали еще в старой печи Виберга. Но через фурмы и трубопровод практически невозможно подавать газ с температурой выше 1300 °С, тогда как теоретическая температура горения углерода в газогенераторе с доменным дутьем превышает 2000 °С, а на кислородном дутье еще выше. Чтобы реализовать такую возможность, газогенераторный отсек должен быть либо рядом с основным корпусом (см. рис. 3.6), либо газогенератором должна служить топливная зона внутри основного корпуса печи.

В данной схеме топливо не контактирует с рудой и металлом, а его жидкая зола удаляется через отдельную летку 5 (см. рис. 3.6), поэтому будет уменьшено загрязнение металла рядом примесей топлива.

3.14. Выводы к главе 3

Если с этим все согласны, то незачем это и писать.
Важно только то, что утверждается через ломку.

О. А. Есин

Рассмотрены возможности перехода от доменной плавки к схеме «Угольный Мидрекс с плавлением». Доменный процесс сам эволюционирует в этом направлении: недавно допустимый минимум кокса определя-

ли как 500 кг/т, сейчас достигнут расход кокса меньше 300 кг/т, а в теории обсуждается уже работа печи при расходе кокса 150 кг/т. Для полного перехода нужно загружать сверху только окатыши, а все топливо вводить вдуванием угольной пыли снизу. Профиль печи нужно откорректировать так, чтобы масса M металлизуемых и спекающихся окатышей свободно, без пересыпаний, опускалась как одно целое до твердого пода или до ванны с расплавами. Плавление сосредоточится на поверхности массы окатышей M , где эта масса контактирует с горячими факелами горения. При значительном избытке угольной пыли в факелах получится безкоксовое получение чугуна при сохранении всех преимуществ домны.

При сталеплавильной футеровке лещади можно уменьшить подачу угольной пыли и перейти к плавке на малоуглеродистый металл, который превращается в сталь добавкой углерода. Такую добавку и другие операции рафинирования стали удобно выполнять в выносном горнотстойнике печи.

Можно дожигать отходящие газы в верхней части печи, добиваться полного горения топлива и значительно уменьшить его расход по сравнению с домной, хотя в этой схеме трудно приблизиться к «идеальному» расходу в 285 кг/т. Металлизацию окатышей для сталеплавильных агрегатов также можно сделать более экономичной за счет дожигания газов.

В целом из рассмотрения технических трудностей процесса можно сделать вывод, что для его отладки по данной схеме потребуется, конечно, большая работа по освоению, наладке, оптимизации новых элементов. В то же время не видно принципиальных препятствий, которые могли бы сделать освоение такого процесса невозможным или чрезмерно трудным. Предлагаемый агрегат сохраняет основные отлаженные элементы и отмеченные выше преимущества доменной печи, а также агрегатов «Мидрекс», но устраняет «пороки» цикла. Новизна схемы сводится, в основном, лишь к перегруппировке известных элементов. Новых элементов значительно меньше, чем, например, в агрегатах типа «Ромелт», в автогенной плавке черновой меди или в процессе «Циклон». Если будут преодолены идеологические и психологические трудности, то такой процесс можно освоить достаточно быстро.

Чтобы легче достигнуть согласия о переводе домны на такую схему, можно сначала создать подобный малый агрегат. Очевидно, 1 млн дол. достаточно для создания такого агрегата, если отлаживать пока лишь безкоксовую плавку на чугун. Для сравнения отметим, что затраты на производство чугуна на большой доменной печи могут составить, например, 500 млн дол. в год, и годовые потери средств из-за обсуждаемых «пороков» на такой печи также составляют величину порядка сотен миллионов долларов.

ГЛАВА 4. ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПРОДУВКИ. ПРОДУВКА РАСПЛАВОВ

4.1. Обеспечение теплом ванны с расплавами.

Отопление сталеплавильных агрегатов

Металлурги вообще не умеют эффективно нагревать жидкий металл, только жгут его.

Из дискуссии

Сейчас практически нет эффективных способов отопления сталеплавильных металлургических агрегатов за счет горения топлива, нет хороших способов такого прогревания жидкой металлургической ванны.

Чтобы обеспечить отопление сталеплавильного агрегата, эффективно прогреть ванну с расплавами, нужно решить все ту же задачу полного сжигания топлива до CO_2 . Здесь также нужно устранить «несообразность № 1», характерную для всей металлургии.

Если бы сталеплавильный агрегат можно было отапливать хотя бы столь же эффективно, как домну, то было бы очень выгодно в таком агрегате получать уже и металл из руды и угля. Дело в том, что в ванну с расплавами эти материалы можно просто всыпать или вдуть неокискованными и экономить на этом примерно половину стоимости чугуна. Но при современных способах получения металла из руды в ванне с расплавами приходится расходовать в лучшем случае примерно 1000 кг топлива на тонну, вдвое больше чем в домне. Если домна получает в 2-3 раза меньше тепла из-за неполного горения топлива, то современное отопление ванны с расплавами еще намного менее эффективно, чем отопление домны.

Ванну современного кислородного конвертера прогревают практически в основном за счет горения в кислороде железа и легирующих примесей. Расчетная температура горения железа в кислороде составляет 5200 °С (расчёт 6 приложения). Факел кислородной фурмы заглубляется в жидкий металл, и первичной реакцией становится горение железа и растворение кислорода в железе, который затем уже окисляет углерод и примеси. С конвертерным шлаком теряется железо и легирующие примеси в виде окислов FeO , SiO_2 , MnO и др. Практически конвертерная ванна прогревается за счет энергии, запасенной ранее в домне при восстановлении железа и легирующих примесей.

К тому же в кислородном конвертере выделение тепла идет в небольшой зоне с очень высокой температурой, в области кислородного факела. Аналогично в дуговой электропечи тепло выделяется в небольшой и очень горячей зоне электрической дуги. В обеих таких зонах идет интенсивное испарение металла и поэтому, иногда до 6 % металла улетает из печи в виде тонкой пыли. К тому же требуется глубокая и дорогая очистка

отходящих газов. В результате при конвертерной плавке (без лома) получается намного меньше стали, чем расходуется чугуна. Поэтому расходы по переделу в конвертере, как и в электропечи, намного больше, чем в доменном процессе. Хотя конвертерный процесс выглядит очень простым и быстрым, он достаточно дорог.

Возможности получения качественной стали, возможности рафинирования металла определяются тем набором операций, которые можно провести с расплавом в данном агрегате. Желательно иметь возможность перемешивать ванну с расплавами с определенной интенсивностью, а также возможность определенное время дать ей отстояться для хорошего разделения фаз. Ценна возможность наводить рафинирующий сталеплавильный шлак, вводить рафинирующие добавки (например, известь для очистки от серы) в жидкий металл, а также легирующие добавки. Хорошо, если можно организовать ровное кипение или «чистый кип»; при этом происходит дегазация металла. Желательно регулировать содержание кислорода в расплаве. Если есть возможность перегреть металл до температуры порядка 1640 °С, то можно провести термовременную обработку стали (ТВО) [16, 29], которая обычно приводит к измельчению зерна твердого металла и улучшению его механических свойств¹.

Отладка эффективных методов рафинирования стали представляется в целом даже более важной, чем задача рационального получения рядового металла. Эффективность многих стальных конструкций или машин в решающей степени зависит от того, насколько улучшено качество стали в сталеплавильном процессе. В других случаях важно получить высокие значения отдельных свойств металла.

Основным базовым условием для проведения всех операций улучшения, рафинирования стали является наличие необходимого количества дешевого тепла, возможность достаточно долго и свободно проводить нужные операции, не сжигая металл. Но современные плавки в конвертере или в

¹ Так, эффективность ракетных двигателей сильно зависит от того, насколько жаростойкие сплавы разработаны для них. Жизненно важная характеристика военного самолета-истребителя, его максимальная скорость резко увеличивается, если удастся повысить жаропрочность и жаростойкость сплавов для лопаток авиационных турбин. Производство подобных сплавов нередко измеряется не миллионами тонн, а килограммами. Здесь совсем другая экономика, установки небольшие, недорогие и широкие возможности экспериментирования.

Так как процессы выплавки рядового металла отрабатываются давно, то значительные улучшения здесь часто считаются практически невозможными. Для исследователей часто представляется более престижной разработка той или иной уникальной стали, даже если она производится в небольших количествах. Анализ старых методов выплавки рядовой стали нередко воспринимается несколько пренебрежительно, как работа по ширпотребу.

электропечи обычно скоротечны, а тепло в этих агрегатах дорого. От многих возможных приемов улучшения металла приходится отказываться из-за недостатка или дороговизны тепла; они станут возможными, если обеспечить в агрегате обилие недорогого тепла без испарения металла, если обеспечить эффективное отопление агрегата за счет сжигания топлива.

Сейчас в электропечи часто выполняют лишь плавление металла, операции рафинирования проводят уже в ковше. Но сталь в ковше быстро остывает, и времени на все процессы мало; после заполнения ковша практически нет возможностей воздействия на расплав, нет перемешивания расплава и др.

4.2. Эффективное отопление невозможно при равновесии факела с углеродистым металлом

Эта простая арифметика почему-то часто остается неосознанной

Из дискуссии

Если горение углерода идет в форме кипения ванны, или факел дутья приближается к равновесию с углеродистым металлом, то горение будет практически на 100 % неполное, лишь до CO, но не CO₂. Горение углерода по первой стадии, до CO, даст лишь 110 кДж тепла, или 28 % от 390 кДж тепла полного горения до CO₂. При этом из полученных 28 % полного тепла 19 % теряется в виде физического тепла отходящих горячих газов, ванна получает лишь $28 - 19 = 9$ % тепла.

Расчетный расход топлива на получение металла при таком отоплении оказывается неприемлемо большим – 2700 кг/т (расчёты 3 и 4 приложения). В агрегатах типа Ромелт подают дополнительное дутье на дожигание газов, и расход топлива удается несколько снизить, примерно до 1000 кг/т. Это соответствует расчетной доле полного горения около 30 %; возможно, этот результат занижен из-за больших потерь тепла через стенки агрегата и в системе водяного охлаждения. Расход топлива примерно вдвое больше, чем в домне, и примерно в четыре раза больше оптимального. Эффективность отопления (или КПД) около одной четвертой и вдвое ниже, чем в домне.

Если удастся получить полное горение топлива до CO₂ с усвоением тепла ванной, то расчетный расход углерода составит 330 кг/т как при кислородном, так и при доменном дутье (расчёт 5 приложения). Оптимальный или «идеальный» расход – 285 кг/т здесь невозможен, так как нет усвоения физического тепла газов. Газы покидают ванну горячими, например, при 1500 °С, и уносят много тепла. Тем не менее, при полном горении расход топлива получается значительно ниже, чем в домне. При таком

отоплении ванны в ней можно эффективно получать металл из рудных материалов и угля, которые просто засыпаются на поверхность ванны. Можно также эффективно проводить длительные операции глубокого рафинирования металла.

Как уже отмечено выше, часто остается не вполне осознанным тот факт, что из-за неполного горения домна получает в 2-3 раза меньше тепла. Еще чаще этот фактор остается неосознанным при отоплении сталеплавильного агрегата, где эффективность отопления и расход топлива, может изменяться из-за этого почти на порядок величины. При горении углеводородов может получиться даже «отрицательное отопление»; например, факел кислорода и природного газа не нагревает, а охлаждает углеродистый металл (если нет горения металла). Доля тепловыделения на первой стадии горения у метана CH_4 составляет лишь 4 %, что в 7 раз меньше по сравнению с углеродом (28 %).

Возможности полного дожигания газов (то есть возможности полного горения топлива) при высоких температурах прослежены в главе 1 по известной диаграмме равновесия основных реакций восстановления окислов углеродом, рис. 1.1, табл. 1.1. Если факел плотно контактирует с расплавами, достигнута хорошая конвективная теплопередача и массопередача от газов дутья к расплавам, то фазы приближаются к тепловому и химическому равновесию. Общий вывод состоит в том, что можно получить полное сжигание топлива с усвоением тепла в окислительной зоне агрегата, если газы контактируют с высшими окислами железа и передают тепло окисленному шлаку. Но если горение идет в восстановительной зоне, дутье греет углеродистый металл или топливо, то придется примириться с неполным горением на 100 % до CO . Получится плохой тепловой баланс без утилизации химического тепла. Можно более экономично плавить металлизированную массу на безуглеродистое железо при значительной (до 25 %) доле полного горения. Если содержание CO_2 в газах меньше 25 %, то газовая смесь восстановительная по отношению к железу, хотя и окислительная по отношению к углероду.

4.3. Возможности полного сжигания топлива в ванне с расплавами

Переубедить никого не удастся. Новые идеи утверждаются только по мере вымирания приверженцев старых идей.

О. А. Есин

Невозможно получить заметную долю полного горения, и невозможно эффективное отопление, если топливный факел плотно контактирует с углеродистым жидким металлом или с твердым углеродом. Но если этот факел «не пробивает» шлак, контактирует лишь со шлаком, то можно

получить достаточно высокую степень полного горения, например, 90 % соответственно равновесию ($\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$) в шлаке. Расчетный расход топлива на получение металла в таком агрегате составит приемлемую величину порядка 380 кг/т (см. табл. 1.1, приложение, расчет 5) вместо 1000 кг/т в агрегатах типа Ромелт. Окислительная зона образуется на границе контакта факела с окисляющимся шлаком.

Можно эффективно прогреть слой шлака, под которым нет жидкого металла, когда под шлаком лишь огнеупоры днища печи. В этом случае даже и в момент «пробивания» слоя шлака в факеле сохранится эффективное полное горение. Даже если факел «пробьет» шлак, он будет лишь греть огнеупоры пода, а не окислять металл.

Возможно полное горение и эффективное отопление в агрегате с такой циркуляцией расплавов, при которой топливный факел греет шлак в одной (окислительной) зоне агрегата, а этот нагретый шлак затем перетекает в другую (восстановительную) зону ванны, где за счет накопленного физического тепла шлака идет восстановление окислов или нагрев жидкого металла. Плотный контакт факела с расплавами и высокую скорость теплопередачи можно обеспечить при вертикальном (или наклонном) и несколько заглубленном факеле, который интенсивно омывает расплав, подобно факелам топливных горелок в электропечах. Параметры факела, необходимые для хорошей теплопередачи, можно определить из теории процессов переноса или из теории подобия, которую изучают в курсе теории металлургических печей.

При кислородном дутье, если весь кислород вводится в одной точке, то образуется небольшая зона очень высоких температур с интенсивным испарением материалов. В агрегатах «Ромелт» кислород приходится разбавлять воздухом. В принципе возможно рассредоточенное введение кислорода так, что тепло горения газов с предыдущей порцией кислорода будет в основном отдано окружающим газам и ванне раньше, чем поступит последующая порция газообразного кислорода. В этом случае максимальные температуры зоны горения будут ниже.

Но пока такое горение газов в кислороде не отлажено, для отопления ванны во многих случаях лучше использовать не кислород, а горячий воздух. Кислородную фурму лучше заменить фурмой доменного дутья, вертикальной, вмонтированной в свод или наклонной, вмонтированной в стенку, как в домне. Правда, доменную фурму невозможно или очень трудно сделать подвижной, но режим обдувки ванны можно регулировать за счет изменения интенсивности дутья.

При «доменном» дутье ванна агрегата будет прогреваться большим объемом газов с меньшей температурой; зона тепловыделения будет большего размера и не столь горячая. Максимальное испарение металла

уменьшится от 6 % в кислородном конвертере до небольшой величины, характерной для домны.

Правда, увеличится объем отходящих газов и, соответственно, потери тепла с ними. Однако в основном это сравнительно дешевое рекуператорное тепло, вносимое с доменным дутьем. Расчетная эффективность отопления, а также расход топлива при кислородном и доменном дутье могут быть примерно одинаковы (см. раздел 1.19). Получится достаточно эффективное отопление ванны с расплавами, соответствующее расчетному расходу топлива 330-380 кг на тонну металла, получаемого из руды. Правда, эта оценка справедлива лишь для достаточно большого агрегата, у которого относительно малы потери тепла через стенки. При таком отоплении возможен также и сталеплавильный агрегат, в котором можно свободно выполнять длительные операции глубокого рафинирования стали.

Если дутье подавать с угольной пылью, то можно разогревать ванну, то есть отапливать сталеплавильный агрегат «доменным» способом, в основном за счет горения угольной пыли, а не железа и легирующих. Варьируя количество пыли, можно регулировать окислительный потенциал дутья, содержание кислорода и CO_2 в дутье, а при необходимости переходить даже и к восстановительному дутью с преобладанием CO .

Такое отопление целесообразно также и для горна-отстойника агрегата Угольный Мидрекс, описанного в главе 3. Лучше вынести в отстойник одну из фурм доменного дутья данного агрегата, чем устанавливать в отстойнике кислородную конвертерную фурму. При таком отоплении отстойника можно экономично выполнять в нем длительные операции глубокого рафинирования стали.

При анализе работы других агрегатов возникают те же самые вопросы. И для топливных горелок электропечей, для факелов мартеновских, нагревательных, кольцевых, вращающихся и других печей, для процессов типа «Ромелт», печей Ванюкова и др., во всех случаях очень важным вопросом остается полнота сжигания топлива, дожигание отходящих газов и степень усвоения металлом тепла такого дожигания.

4.4. Агрегат типа «Ромелт». Получение металла из руды в сталеплавильном агрегате

Это же не печь, это самовар
с чугунными стенками!

Из дискуссии

Много обсуждалось получение стали прямо из руды в сталеплавильном агрегате, известен ряд соответствующих патентов. Сейчас, в эпоху конвертеров, обычно предлагается получать сталь из руды в агрегате типа

кислородного конвертера, например, процессом типа «Ромелт» [36]. Раньше часто предлагали получать сталь из руды в агрегате типа мартеновской печи. Рассматривали также получение металла в электропечи; таков неудавшийся процесс Ремина В. П. Все металлургические агрегаты подобны в том смысле, что основное содержание работы каждого агрегата – это проведение реакций в тройной системе железо – кислород – углерод.

Ясно, что сталь можно получать из железной руды в электропечи [38], если обеспечить достаточно хорошее перемешивание ванны. Но из-за высокой цены электроэнергии тепло будет весьма дорогим, и процесс может оказаться нерентабельным. Вероятно, электропечь не сможет конкурировать с домной по эффективности получения металла. Подобные процессы оправдывают себя, оказываются рентабельными лишь при получении более ценных металлов, например, ферросилиция, ферромарганца и других ферросплавов, которые выплавляют из окислов в электропечах.

Если металл получают в сталеплавильном агрегате, то его можно довести здесь же до качества стали, устранить второй (доводочный) передел, устранить «несообразность № 4». Но под давлением традиций и здесь часто предлагается двустадийный процесс; первичную плавку и в сталеплавильном агрегате предлагается вести на чугун.

Дутье домны на тонну металла примерно на порядок величины больше дутья современного конвертера. Если в конвертере получают металл из руды, то потребуется объем продувки примерно на порядок больше, чем при обычной переработке чугуна в сталь.

Газопроницаемость ванны с жидкими расплавами значительно меньше, чем у столба твердых шихтовых материалов в домне. В домне газы движутся между кусками шихты со скоростью 6-8 м/с, в жидком металле пузырьки газа (СО) всплывают со скоростью порядка 0,5 м/с. Поэтому производительность агрегата типа конвертера в «барботажном» процессе получится значительно ниже по сравнению с домной. Процесс будет сравнительно медленным, особенно при большом удельном расходе топлива.

В агрегатах типа Ромелт достигается намного большая скорость процесса, чем при обычном кипении ванны. Газы проходят слой жидкого металла и шлака не пузырьками, а большими объемами, с образованием местных и временных каналов (или «свищей») в толще расплавов. Высокую скорость процесса можно получить в поверхностном слое металла, если вдувать в него угольную пыль и концентрат. В этом случае газы реакции (СО) выделяются не в объеме ванны, а у поверхности, и легко покидают зону реакции без образования и всплывания пузырьков.

Агрегаты типа «Ромелт» [36] можно рассматривать как видоизмененный конвертер с боковым кислородным дутьем. В ряде случаев такие агрегаты рассматривают также как развитие печей Ванюкова, в которых ведут автогенную плавку медных руд с добавкой топлива, если не хватает тепла.

Данное направление в металлургии (получение металла в агрегате типа конвертера) имеет уже длительную историю. В целом это направление можно оценить, как замечательную по смелости попытку создать совершенно новую металлургию, отбросив большую часть прошлого опыта, преодолевая множество технических сложностей, внедряя много новых элементов, новую футеровку (кессонную), новую систему дутья и пылеочистки, и др.

Если технические сложности преодолены, то эффективность процесса и здесь будет определяться фундаментальным фактором – полнотой горения топлива. Эта задача – более полное горение топлива – в агрегате Ромелт решается с помощью продувки на двух уровнях. Агрегат имеет два ряда боковых фурм. Нижние боковые фурмы служат для барботирования шлакового расплава кислородно-воздушным дутьем, верхние фурмы подают кислород для дожигания отходящих газов в надшлаковом пространстве. Есть опасность, что тепло дожигания не будет усвоено ванной.

Сообщается о дожигании газов на 70 % и даже на 95-98 %. Достигнутый расход топлива 780-1000 кг/т соответствуют расчету при усвоении тепла дожигания примерно на 30 %. Вероятно, такая оценка занижена из-за больших потерь тепла через стенки агрегата и с охлаждающей водой. Получается следующий расчетный (для большого агрегата) и действительный расход топлива.

	Расход углерода топлива, кг/т	Расход кислорода, нм ³ /т
Расчет при горении до СО	2700	2240
Расчет при полном дожигании до СО ₂	330	390
Расчет при дожигании на 30 %	860	650
Достигнутый реальный расход [36]	780-1000	680-750

4.5. Другие возможности получения металла в конвертере

Будущее за пылегазовой металлургией.
Из дискуссии

Неудачный момент в работе агрегатов типа Ромелт – то, что топливо, кусковой уголь, засыпается на поверхность ванны, туда, где для эффективного дожигания газов нужно организовать окислительную зону. В потоках газа, контактирующих с плавающими кусками топлива, продукты полного горения СО₂, практически нацело восстанавливаются обратно до СО. Газы таких потоков удастся дожечь лишь тогда, когда они уже уда-

лятся от поверхности ванны, от плавающих кусков топлива, и уже не смогут передать расплавам много тепла дожигания.

Для более эффективного усвоения ванной тепла дожигания здесь, как и в схеме «Угольный Мидрекс», целесообразно разделить восстановительную и окислительную зоны, потому что успешное и глубокое дожигание газов возможно лишь в окислительной зоне.

Дожигание газов было бы более успешным, если бы топливо в виде угольной пыли вдувалось только снизу, как в схеме «Угольный Мидрекс». В этом случае глубокое дожигание можно было бы организовать не в надшлаковом пространстве, но уже в околоповерхностных слоях шлака, где плавится поступающая руда, куда вдувается кислород, и где можно создать окислительную зону с высоким окислительным потенциалом как расплавов, так и газов. При этом была бы обеспечена и хорошая передача тепла дожигания расплавам. Если обеспечить стопроцентное дожигание с усвоением тепла ванной, то расчетный расход топлива и кислорода снижаются соответственно до 330 кг/т и 390 м³/т (см. приложение). Конечно, реально приблизиться к этим показателям можно лишь в случае достаточно большого агрегата, у которого не слишком велики удельные потери тепла через стенки, в системе водяного охлаждения.

В этом варианте нежелательно чрезмерно сильное перемешивание ванны, приближение к так называемому режиму совершенного смешивания, который понизит различия состава восстановительной и окислительной зон. Если достигается достаточно интенсивное перемешивание ванны, хороший теплоперенос в ней, то можно весь кислород подавать вверху, в зону дожигания. Зона дожигания будет источником тепла для всей ванны. Вдувание кислорода снизу можно заменить вдуванием угольной пыли снизу с нейтральным газом (например, с СО). Вдувание пыли технически менее сложно, чем дутье кислорода.

Очевидно, те же цели можно реализовать и при дутье сверху, которое технически менее сложно. На рис. 4.1 представлен такой конвертер с верхним кислородным дутьем. На центральный участок поверхности ванны вдувается смесь концентрата и угольной пыли с избытком пыли; здесь создается восстановительная зона. На периферийные участки поверхности ванны попадают газы, выделяющиеся в центре, и кислородное дутье. Здесь образуется окислительная зона дожигания газов. Увеличивая заглубление фурмы, можно при необходимости интенсифицировать перемешивание жидкой ванны. Окислительная и восстановительная зоны здесь разделены не по вертикали, а скорее по горизонтали.

В другом варианте (рис. 4.2) ванна с расплавами выполняется круглой подобно горну доменной печи, и над нею размещаются наклонные факелы кислорода или «доменного» дутья, с угольной пылью и с порош-

ком концентрата. Факелы дутья сверху организовать технически легче, чем продувку жидкого металла снизу.

Наклонные факелы обеспечат циркуляцию расплавов по кругу¹. Правда, здесь потребуется корректное определение параметров таких наклонных факелов и степени их заглубления в ванну, чтобы, с одной стороны, не вызвать чрезмерного разбрызгивания расплавов и, с другой стороны, обеспечить достаточно интенсивную циркуляцию расплавов (см. рис. 4.2).

Факелами вдувается в ванну смесь концентрата и угольной пыли. С одной стороны такой ванны можно организовать окислительную зону, давать здесь избыток дутья и вдуваемого концентрата по отношению к угольной пыли, обеспечивать полное дожигание газов до CO_2 и определенный перегрев шлакового расплава. С другой стороны ванны организуется восстановительная зона, угольная пыль вдувается в избытке по отношению к концентрату. Здесь организуется интенсивное восстановление железа. В окислительной зоне расплавы перегреваются за счет тепла дожигания газов; перетекая в восстановительную зону, они отдают запасенное тепло на реакции восстановления.

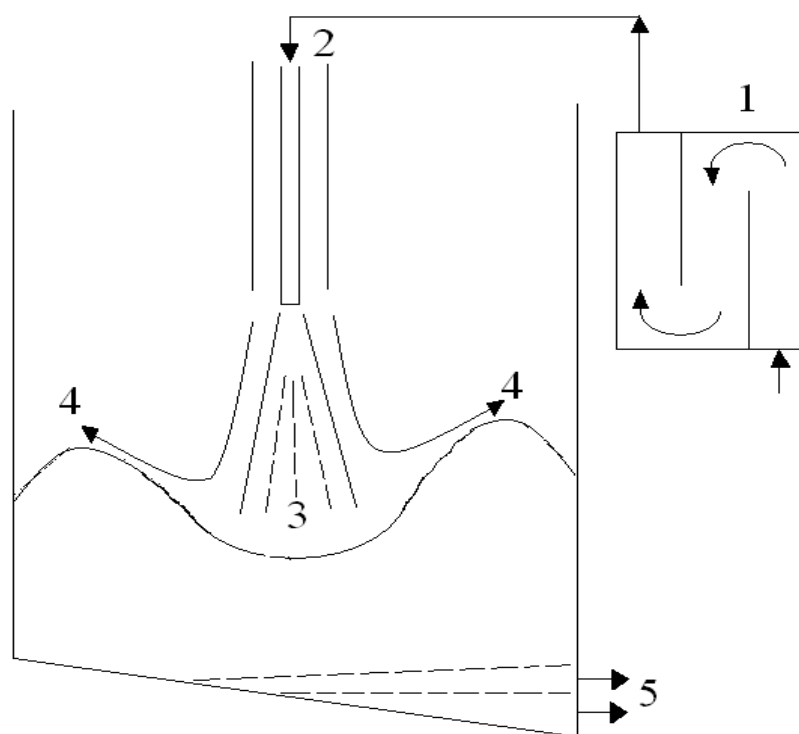


Рис. 4.1. Конвертер для получения металла:

1 – реактор для приготовления пылегазовой взвеси; 2 – фурма; 3 – вдувание частично металлизированного концентрата с избытком угольной пыли, центральная восстановительная зона; 4 – дутье кислорода, периферийная окислительная зона; 5 – летки

¹ Кольцевой конвертер для рафинирования стали предлагал В. М. Лупейко (устное сообщение).

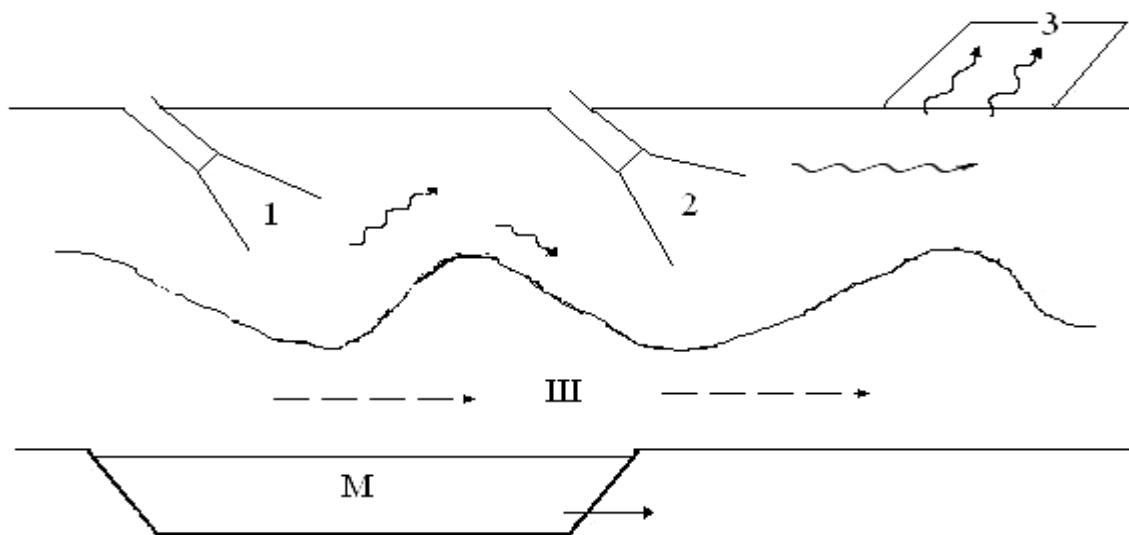


Рис. 4.2. Схема последовательности процессов по окружности конвертера:
 1 – факел с избытком угольной пыли, восстановительная зона; 2 – факел с избытком концентрата, окислительная зона полного горения; 3 – отходящие газы;
 М – металл; Ш – шлак

Под окислительной зоной ванна делается неглубокой, а ее дно – наклонным, так что образующийся здесь жидкий металл стекает в более глубокую часть ванны под восстановительной зоной. Даже если окислительный факел (100 % CO_2) здесь «пробьет» слой шлака, то не получится значительного окисления металла.

Газы восстановительной зоны (в основном CO) переходят в окислительную зону, там эжектируются («всасываются») в факелы окислительного дутья и дожигаются. При необходимости можно часть восстановительных газов отбирать в восстановительной зоне, несколько охладить, например, впрыскиванием паров воды с угольной пылью, и пропускать через центробежный нагнетатель. В окислительную зону этот газ можно вводить в виде жестких факелов, которые помогут организовать нужное течение газов в зоне окисления и дожигания. После дожигания в окислительной зоне газы поступают в котел-утилизатор или в рекуператор, где отдают физическое тепло. Вероятно, для дожигания газов будет достаточно небольшая часть ванны, а ее основная часть может работать как восстановительная зона.

По традиции в подобных процессах ведут плавку на чугуна. В этом случае можно работать при более низкой температуре и легче понижать потери железа со шлаком. Но после контакта с чугуном газы уходят практически при 100 %-м содержании CO , дожигания не получается. Решить главную задачу – полное дожигание газов – и в этой схеме легче в том случае, когда идет плавка на малоуглеродистый металл. Выгоднее работать не у максимального содержания углерода, не при избытке угольной пыли и плавке на чугун, а у минимальной концентрации C . При этом не

только легче достигается полное дожигание газов, но такой металл можно также превратить в сталь простой добавкой углерода, без сталеплавильного передела. Перед выпуском жидкого металла можно понизить концентрацию углерода в нем, а перед выпуском шлака – повысить за счет добавки угольной пыли, чтобы меньше железа потерять со шлаком. Когда потребуется спустить накопившийся шлак, можно на время прекратить подачу концентрата и понизить окислительный потенциал дутья, чтобы не потерять много железа в виде окислов шлака.

Сера и фосфор будут интенсивно выгорать в окислительной зоне, и получаемый металл будет чистым не только по углероду, но и по другим окисляющимся примесям.

При плавке по этим схемам основная масса шлака может содержать железо в двухвалентной форме, в виде FeO . В окислительной зоне может устанавливаться равновесие ($\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$), которое соответствует 90 % CO_2 в газе, дожиганию газа на 90 %. В восстановительной зоне может идти восстановление закиси FeO до железа, соответствующее 25 % CO_2 в газе. Здесь мы примиряемся с горением до CO_2 , максимум на 25 %, соответственно равновесию (FeO/Fe). Дополнительное тепло на реакции восстановления здесь дают расплавы, поступающие перегретыми из окислительной зоны (см. рис. 4.2).

Шлаковый расплав, перегретый на 100 °С, способен за счет этого запасенного физического тепла восстановить примерно 15 % (весовых) железа. Расплав может доходить, например, до 30 % FeO в окислительной зоне за счет добавок рудной компоненты и восстанавливаться до 10 % FeO в восстановительной зоне. Примерно за 7 «оборотов» шлака накопится масса восстановленного металла, равная массе шлака. Капли металла образуются при вдувании угольной пыли в верхних слоях шлака в восстановительной зоне, тонут, проходят всю толщину слоя шлака и собираются на дне ванны. Они проходят примерно такое рафинирующее воздействие шлака, как при электрошлаковом переплаве.

Восстановление окислов железа при данной схеме процесса в основном сосредоточится в поверхностном слое восстановительной зоны, где горит в факеле угольная пыль, а ее избыток вдувается в перегретый и переоxygenный шлак, пришедший из окислительной зоны. Образующиеся у поверхности газы восстановления (CO) здесь не должны проходить значительный путь в расплаве, поэтому процесс не будет лимитироваться возможностями барботажа ванны, ее газопроницаемостью при всплывании пузырьков газа. Процесс скорее будет лимитироваться теплопередачей в шлаке. В перегретом шлаке, пришедшем из окислительной горячей зоны с дожиганием газов, тепло должно передаваться из объема к поверхности, куда вдувается угольная пыль, и где идут реакции восстановления, поглощающие тепло.

В процессах по схеме рис. 4.1 и 4.2 часть реакций восстановления и горения топлива пройдет еще до попадания реагентов в ванну, уже в факеле, где присутствуют угольная пыль, пылевидный концентрат и кислород. Лучше возможно большую часть восстановления провести именно в факеле, а не в поверхностном слое расплавов, где окислы вдуваемого концентрата растворятся, их активность понижается, могут возникнуть трудности с выделением газов, с вспениванием и др. Здесь, как и во многих других случаях, окажется справедливым старое правило доменщиков: лучше возможно большую часть восстановления провести в твердом состоянии, еще до попадания реагентов в расплавы. Реакции в состоянии пылегазовой взвеси проще, понятнее, и по ним больше опытных данных, чем по реакциям в поверхностном слое расплавов.

Но объем факела невелик, время реагирования в нем мало, поэтому здесь так же, как и в разделах 2.10 и 3.9, лучше провести данные реакции в отдельном реакторе (в реакционной камере), где пылегазовая взвесь и кислород придут практически к равновесию. Время реагирования смеси в реакторе во столько раз больше времени реагирования в факеле, во сколько раз объем реактора больше объема факела. Частицы концентрата в реакционной камере частично восстановятся углеродом, а горение избытка угольной пыли в кислороде обеспечит реакцию теплом. В этом случае в ванну будет вдуваться уже металлизированный концентрат в состоянии пылегазовой взвеси со своими газами металлизации (CO , CO_2). В ванне конвертера нужно будет лишь дожигать эти газы металлизации для прогрева расплавов. Здесь будет работать практически топливный факел, вдувающий металлизированный концентрат.

Можно также после реакционной камеры отделить аппаратом Циклон от пылегазовой взвеси большую часть газов металлизации, и вдувать в расплавы отдельно металлизированный концентрат и газы на дожигание.

Отметим также, что металлизацию пылегазовой взвеси выгоднее проводить не в неотопливаемом реакторе, а в теплообменнике или в рекуператоре, за счет дешевого рекуператорного тепла, а не за счет тепла горения угольной пыли. В этом случае расход *металлургического* топлива будет меньше. Рекуператор отличается от реактора тем, что он заранее, до реакции, отопливается *энергетическим* топливом. Правда, в этом случае мы здесь практически вернемся к процессу, рассмотренному выше в разделах 2.11 и 2.12 – к плавке стали или полупродукта из концентрата, металлизированного в рекуператоре.

Если в схемах рис. 4.1 и 4.2 убрать подачу концентрата, оставить лишь горение угольной пыли в факелах дутья, то получится схема отопления ванны с металлургическими расплавами, схема отопления сталеплавильного агрегата. В таком агрегате будет достаточно полное сжигание топлива, и, следовательно, обилие дешевого тепла, поэтому можно сво-

бодно проводить много длительных операций глубокого рафинирования стали. Если такое эффективное отопление будет отлажено в выносном горне-отстойнике агрегата Угольный Мидрекс, рассмотренного в главе 3, то такой «горн-отстойник» можно уже отделить от основного корпуса, сделать самостоятельным сталеплавильным агрегатом без большого увеличения расхода топлива. В отдельном независимом агрегате можно работать свободнее, чем в отделении шахтной печи для получения металла.

В таком агрегате с наклонными факелами «доменного» дутья была бы решена и старая проблема *перемешивания* жидкого металла. Раньше в небольших мартеновских печах нередко реакции практически не начинались из-за недостаточного перемешивания; факел грел и окислял только верхние слои ванны. Чтобы начать процесс, первое перемешивание ванны иногда выполняли деревянным колом через окно печи. После этого ванна вскипала, и дальше перемешивание обеспечивалось кипением.

В современных электропечах часто оказывается выгоднее плавить невосстановленные окатыши с отложениями сажистого углерода, так как в этом случае ванна раньше вскипает [31]. Расход электроэнергии нередко оказывается меньше, если организовать усиленное кипение, и ради этого понизить содержание углерода до аномально низких значений. Конечно нормальное содержание углерода обеспечивается добавкой коксика в ковш. В предлагаемой схеме интенсивное перемешивание обеспечивается наклонными факелами дутья и циркуляцией расплавов по кругу.

4.6. Выплавка других металлов

Почти все деньги уходят на приготовление прочных окатышей и кусков кокса, на обеспечение продувки

Из дискуссии

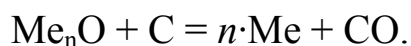
При выплавке чугуна или стали, возможно, более удобными, простыми и эффективными окажутся процессы с восстановлением в твердом состоянии, рассмотренные в главах 2 и 3. Однако приведенная схема рис. 4.1 может оказаться целесообразной и при выплавке ферросплавов, а также других трудно восстанавливаемых металлов. Может оказаться, что такие металлы практически невозможно восстанавливать в твердом состоянии, даже в виде плотной пылегазовой взвеси.

Теоретически в ванне с расплавами можно восстановить из окислов даже любой из 70 металлов, известных в Периодической системе Менделеева. Так как углерод в реакциях восстановления дает газообразный окисел CO с большим ростом энтропии, его восстановительная способность по отношению к твердым окислам возрастает при нагреве, и при достаточно высокой температуре он способен восстановить до металла любой

твердый окисел. Известны опыты по плавке в агрегатах типа Ромелт других металлов, которые восстанавливаются труднее, чем железо.

Известно, что при повышении температуры углерод становится все более сильным раскислителем стали, способным отбирать кислород у все более трудно восстанавливаемых окислов. Известно также, что в электропечах при достаточном нагреве углерод способен восстанавливать марганец, кремний, кальций и др. Так получают соответствующие ферросплавы.

Реакцию восстановления металла Me из окисла Me_nO можно записать в виде



Константа равновесия реакции будет равна давлению CO ($K = P_{CO}$). Температуру T_x , при которой равновесное давление CO по реакции превысит 1 атм, называют температурой «химического кипения». При этом выполняется условие быстрого протекания реакции с интенсивным выделением газов.

Понятие химического кипения применяется по аналогии с понятием кипения жидкости, которое наступает, если давление паров жидкости превышает 1 атм, как у воды при 100 °С. Химическое кипение известняка, то есть его быстрое разложение с бурным выделением CO_2 , наступает при температуре 910 °С, когда $K = 1$ атм.

Температуры химического кипения, то есть начала быстрого восстановления различных металлов углеродом T_x приведены ниже (в градусах Кельвина):

Cu_2O	380	MnO	1700	MgO	2100
NiO	730	TiO_2	1910	CaO	2400
FeO	990	SiO_2	1950	Al_2O_3	2480
				UO_2	2460

Для закиси железа эта температура T_x равна 990 К или 720 °С, что соответствует «температуре Мидрекс», а также условиям средних горизонтов шахты доменной печи, где действительно начинается сравнительно быстрое восстановление вюстита. Для меди $T_x = 380$ К. Для восстановления марганца (или для выплавки ферромарганца) требуется температура около 1700 К или больше 1400 °С. Наиболее трудно восстанавливаются металлы, образующие самые прочные окислы. Для алюминия $T_x = 2480$ К, урана – 2460, для магния – 2100 К, у кальция – 2400 К. Нам не удалось найти металл, температура восстановления T_x которого была бы значительно больше, чем у алюминия (2480 К). Поэтому алюмотермией в принципе можно восстанавливать почти все металлы.

Таким образом, при температурах несколько выше 2480 К или 2210 °С углерод способен восстанавливать из твердых окислов любой из 70 известных металлов.

Теоретическая температура полного горения углерода в кислороде очень высока, 5200 °С, поэтому в принципе есть возможность получить достаточно высокую температуру расплава и восстановить все окислы. Если отладить рассредоточенное введение кислорода, то можно избежать образования небольшой зоны чрезмерно высоких температур.

Как обычно, сложнее решить вопрос не о равновесии, а о скорости процесса. Но ясно, что если восстановление окисла наступает при температуре выше 1000 °С ($T_x > 1000$ °С), то равновесное давление P углекислоты CO_2 при равновесии мало, и скорость восстановления окислов газом будет низкой. Движущей силой восстановления газом можно считать разность ΔC концентраций C углекислоты CO_2 около окисла и около углерода.

Можно ожидать, что будет достаточно высокой скоростью прямого восстановления расплавленных окислов углеродом, в частности, угольной пылью, вдуваемой в окисный расплав. Об этом свидетельствует, в частности, опыт выплавки ферросплавов в электропечах.

Схема процесса может быть следующей. Восстановление идет в описанной выше цилиндрической ванне (см. рис. 4.2), в которой наклонные факелы дутья вызывают циркуляцию оксидных расплавов по кругу. Имеется восстановительная зона с горением топлива в основном лишь до CO ; имеется также окислительная зона, где горение идет до CO_2 , и где дожигаются газы восстановительной зоны. В качестве дутья используется кислород, или горячий воздух, обогащенный кислородом.

Циркулирующий по кругу оксидный расплав на каждом цикле прогревается в окислительной зоне за счет полного горения углерода и затем частично восстанавливается за счет запасенного тепла вдуваемой угольной пылью. В восстановительной зоне под оксидным расплавом накапливается жидкий металл, который периодически выпускается.

Выполним расчеты расхода топлива на выплавку некоторых металлов в таком «конвертере» (см. рис. 4.2), то есть при полном сжигании углерода, но без утилизации физического тепла отходящих газов. Расчет для выплавки стали при 1500 °С окажется повторением расчета 5 приложения и даст тот же расход углерода 330 кг/т.

Расчетный расход углерода для выплавки самого трудно восстанавливаемого металла, алюминия, получается 1840 кг/т, для выплавки титана – 930 кг/т (расчет 14 приложения). По порядку величины эти значения не очень превышают расход топлива при выплавке чугуна процессами типа «Ромелт» (1000 кг/т) или в некоторых других альтернативных процессах получения металла. Если устранена «несообразность № 1», достигнуто полное горение углерода, то получается хороший тепловой баланс при восстановлении любого металла, даже трудно восстанавливаемого.

Так, боксит Al_2O_3 плавится при 2050 °С; при температуре восстановления 2210 °С он превращается в достаточно жидкий расплав с вязкостью

порядка 0,03 Па·С и не дает достаточно устойчивых окислов с меньшим содержанием кислорода. В окислительной зоне он будет только нагреваться без химического взаимодействия, в восстановительной зоне образуются капли алюминия, которые будут собираться на дне ванны.

Подобная выплавка даже трудно восстановимого металла будет стоить по порядку величины не намного больше, чем современная выплавка чугуна в агрегатах типа Ромелт. Но многие металлы из распространенных руд стоят в десятки раз дороже чугуна, поэтому подобная плавка может оказаться весьма выгодной. Если обеспечено полное горение углерода с усвоением тепла в печи, то в принципе возможно углетермическое получение любого металла.

Конечно, если обсуждать выплавку всех металлов, мы столкнемся с множеством технических сложностей. Одна из них – испарение металлов и оксидов. Требуется отладить такой режим горения угольной пыли и газов в кислороде, чтобы один из реагентов поступал в зону горения постепенно, и чтобы температура факела не слишком превышала температуру обогреваемых расплавов. Высокие термические нагрузки придется на гарнисажную футеровку.

Далее, у ряда металлов температура кипения T_K ниже температуры восстановления T_X . Так, у магния температура кипения самого металла всего 1103 °С, тогда как для быстрого восстановления, для «химического кипения» окисла по реакции восстановления необходимо $T_X = 2100$ °С. Такие металлы в основном испарятся и окажутся в отходящих газах в виде пылевидных окислов; их придется извлекать из отходящих газов и из «колошниковой» пыли. Даже у алюминия температура быстрого восстановления T_X (2210 °С) близка к температуре кипения $T_K = 2348$ °С, поэтому существенное испарение возможно и для алюминия. Эти опасности можно понизить, если поддерживать в агрегате повышенное давление, например, такое же, как в домне.

В некоторых системах шлак может получиться «нетехнологичным», например, слишком вязким, гетерогенным или даже в основном твердым. Потребуется вводить флюсы, разжижающие шлак.

Окислы металлов в целом составляют до 99 % земной коры, то есть всех горных пород. Известные 70 металлов Периодической системы составляют в сумме около 50 % вес. горных пород, кислород – 49 % вес [39]. Оставшийся 1 % преимущественно состоит из других металлоидов, часто в соединениях с металлами. Наиболее распространены из этих других металлоидов углерод (0,35 %), водород (0,15 %), азот (0,04 %); галогены – хлор Cl (0,20 %) и фтор F (0,08 %), образующие соли, а также сера S (0,1 %) и фосфор P (0,12 %); образующие сульфиды, сульфаты и фосфаты. Доля остальных металлоидов в земной коре незначительна [39, с. 22].

Предлагаемая плавка при достаточно высоких температурах в принципе способна почти любую горную породу переработать в сплав тех металлов, окислы которых образуют эту породу, за исключением испаряющихся металлов. Сера и фосфор сгорят в окислительной зоне, большая часть солей испарится при высоких температурах.

Такую плавку можно вести не непрерывной, а периодической. Если в печи расплавить породу в окислительной атмосфере, а затем начать восстановление, то сначала будут восстанавливаться металлы с наименьшим сродством к кислороду, с наименьшей температурой восстановления углеродом T_x , такие как медь. Благородные металлы, если они есть, также попадут в эти первые порции полученного металлического расплава. Далее будут восстанавливаться и поступать в ванну металлы в порядке нарастания сродства к кислороду, такие как никель и железо, затем трудно восстанавливаемые, как ванадий, марганец, титан и кремний. В пределе можно дойти до восстановления магния, кальция, урана и алюминия. Если к ванне, в которую сверху поступают капли восстановленного металла, добавить снизу устройство, подобное небольшой установке непрерывной разливки стали, то появляющийся металл можно быстро извлекать из печи в виде твердого бруса, выходящего из печи вниз. Понятно, что здесь возникнут многочисленные технические сложности. Если их преодолеть, то получится процесс сепарации металлов по их сродству к кислороду. Агрегат будет разделять металлы по температуре восстановления T_x , то есть по сродству к кислороду. Примерно так же нефтеперегонная установка разделяет фракции нефти по их температурам кипения: на бензины, керосины, мазут и др. вплоть до гудрона.

4.7. Другие процессы с пылегазовой взвесью в рекуператоре

Мы все ищем правильный ответ,
но не находим нужного вопроса.

В. Высоцкий

Рассмотрим другие применения реакций в рекуператоре. Подробнее эти процессы описаны в предыдущих изданиях 2011 и 2007 г. [19].

1) Получение металлоизделий по схеме «пылегазовая металлизация концентрата плюс спекание»

Если провести глубокую металлизацию порошка железорудного суперконцентрата в рекуператоре или в теплообменнике, то получится порошок железа, соответствующий стандартам порошковой металлургии, пригодный для прямого получения металлоизделий по схеме прессование – спекание. Обычно для порошковой металлургии считается необходимой

степень металлизации 98-99,5 %, при содержании металлического железа Fe_M (98-99) %.

Металлизацию в рекуператоре в этом случае целесообразно выполнить в две стадии: на первой стадии газифицируется угольная пыль, затем твердые частички удаляются методами пылеочистки, а в оставшийся восстановительный газ (CO , H_2) вводится металлизуемый концентрат. Металлизация идет уже без присутствия твердого углерода и частиц его золы, чтобы не загрязнять получаемый порошок железа.

Порошковая металлургия железа по традиции тяготеет к чистым и специально обработанным дорогим порошкам, к небольшим изделиям сложной формы, для которых достаточны небольшие лабораторные прессы и небольшие электропечи. Большая металлургия давно уже мыслится почти исключительно как металлургия расплавов, в которой незаменим доменный процесс.

Одна из первых задач, решенных порошковой металлургией, состояла в спекании платиновой пыли в монеты. Современная порошковая металлургия и сейчас по традиции тяготеет к производству изделий, подобных монетам, к малым точным и сравнительно дорогим изделиям. Стандартный порошок железа по традиции производят в основном дорогими способами типа «Хоганесс» из окалины; проводят длительную (сутки и более) металлизацию окалины в керамических капсулах, которые прогреваются в нагревательной печи. Далее порошок железа проходит обычно еще процесс довосстановления водородом. Пропуская концентрат через рекуператор, можно получать порошок железа дешевле и в больших количествах. Если при этом использовать пыль газовых углей с большим содержанием углеводов, то получится процесс, содержащий и восстановление порошка водородом. Металлизация в рекуператоре позволит, очевидно, получать порошок железа дешевле, чем металлизированные окатыши; сейчас стандартный порошок стоит в 3-5 раз дороже таких окатышей.

Необязательно также использовать суперконцентраты. Совместно с Р. А. Апакашевым мы получали образцы кондиционного металла при спекании рядового (Лебединского) концентрата [45, 46, 27]. Обычное возражение против рядовых концентратов состоит в том, что в конечный металл попадают неметаллические включения концентрата, такие как частицы SiO_2 , Al_2O_3 . Но если эти включения невелики ((5-10) мкм), то они действуют как дисперсионно – упрочняющие добавки, которые нередко специально вводят в металл для повышения прочности.

В СССР возможности получения богатых концентратов из легкообогатимых руд оценивались в 50 млн т в год [15]. Теоретически этого достаточно для производства до половины всех металлоизделий методами порошковой металлургии.

Спекание проводится при температурах 800-1200 °С в контролируемой неокислительной атмосфере, и сейчас его можно провести лишь в электропечах. Но создание нагревательных электропечей для крупных металлоизделий и их эксплуатация дороги. Это еще один фактор, который не позволяет сейчас применять методы порошковой металлургии в крупнотоннажном и массовом производстве. Если будет освоен неокислительный нагрев за счет неполного сжигания топлива, рассмотренный в разделах 1.18, 1.19, то будет снято и это препятствие.

Сейчас на пути от руды до металлоизделия материалы проходят обычно 4-8 циклов нагрева – охлаждения, в том числе два энергоемких расплавления – в домне и в сталеплавильном агрегате. По схеме металлизация – спекание металлоизделие получается за 1-2 цикла нагрева – охлаждения в пределах твердого состояния, и энергозатраты получаются, по оценке Р. Тэлмеджа, в 5 раз меньше [15].

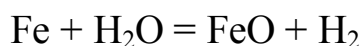
Очевидное преимущество металлургии твердого состояния состоит еще и в том, что металл получается значительно чище. Растворимость примесей в жидком металле обычно в десятки или даже в сотни раз больше, чем в твердом. Основную массу вредных примесей (S, P, а также газов Н₂, N₂, O₂ и др.) металл поглощает в жидком состоянии, после расплавления. Нередко изделия прошлых столетий из кричного металла остаются нетронутыми ржавчиной, тогда как аналогичные изделия современной металлургии уже сильно ржавеют.

Имеется также много металлоизделий, к которым предъявляются пониженные требования по прочности металла; они производятся миллионами тонн. Предельным случаем подобных изделий с минимальными требованиями по прочности и точности формы являются различные грузы – противовесы. Сейчас заготовки для таких изделий обычно вырубаются из стандартного проката. При изготовлении методами порошковой металлургии их можно производить индивидуальными экономичными способами.

В целом современные методы порошковой металлургии малопригодны для производства больших и недорогих рядовых изделий в крупнотоннажном производстве. Если отладить получение дешевого порошка железа металлизацией в рекуператоре, то открывается ряд дополнительных возможностей применения экономичных способов порошковой металлургии.

2) Получение водорода

Водород можно получать по реакции



за счет тепла рекуператора, продувая порошок железа с парами воды. Данная реакция, как и обратный процесс, идут с высокой скоростью.

Водород используется как ускоритель металлургических реакций. В равновесии при металлургических температурах пары воды и водород содержатся в примерно равных количествах. Порошок отделяется методами пылеочистки, вода отмывается при охлаждении смеси газов. Отработанный окисленный порошок FeO можно восстановить, продувая его в смеси с угольной пылью.

3) Газификация угля

Удобно газифицировать угольную пыль, продувая ее через рекуператор с парами воды, по реакции $C + H_2O = CO + H_2$

При обычной газификации в газогенераторе трудно утилизировать тепло полученных горячих газов. Многие кусковые угли непригодны для такого газогенераторного процесса. В рекуператоре тепло утилизируется пропусканием через нагреваемый отдел агрегата. Вода конденсируется и отмывается при охлаждении, остаток пыли отделяется методами пылеочистки.

Рекуператор или теплообменник с пылегазовой взвесью окажется, очевидно, удобным реактором и для ряда других подобных реакций.

4.8. Выводы к главе 4

Драма, драма идей!
А. Эйнштейн

В настоящее время практически нет способов эффективного отопления ванны с металлургическими расплавами за счет горения топлива. Можно обеспечить достаточно полное (например, на 90 %) сжигание топлива до CO_2 с усвоением тепла расплавами, если вести дожигание газов в окислительной зоне агрегата и если топливный факел не пробивает шлак. В этом случае можно эффективно получать металл из концентрата и угольной пыли при расчетном расходе топлива 460 кг/т, а также эффективно отапливать сталеплавильный агрегат и проводить длительные операции глубокого рафинирования стали. Расчетный расход топлива на сталеплавильный процесс получается 35-50 кг/т.

При полном горении угольной пыли в кислороде можно в принципе получить высокие температуры расплавов до $2300^{\circ}C$, при которых углерод способен восстанавливать любой из 70 металлов Периодической системы.

При восстановлении концентрата в рекуператоре в состоянии пылегазовой взвеси можно провести глубокое восстановление и получить порошок железа для переработки методами порошковой металлургии.

ГЛАВА 5 (дополнительная). ТОЧНОЕ ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ И ЭЛЕМЕНТЫ ДРЕВНЕГО РЕМЕСЛА В МЕТАЛЛУРГИИ. ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ СЛОЖНОСТИ ВОПРОСА

5.1. Сведения из истории формирования металлургического цикла

Это уже смешно, а значит, правда. Без правды людей не рассмешишь.

Потан – невец-юморист

При осознании и устранении несообразностей металлургического цикла главным препятствием оказываются, по нашему мнению, психологические и идеологические трудности. Технические и организационные сложности преодолеть легче. Цель данной главы – обсуждение этих идеологических трудностей. Рассмотрены закономерности ломки идеологии на примере недавних процессов такой ломки в металлургии и в физикохимии.

Есть мнение, что в научно-технической работе необязательно или даже неуместно обсуждение таких психологических и идеологических вопросов. Нередко исследователи воспринимают разделы, посвященные идеологии, как досадные посторонние вставки в основной научно – технический текст. При таком подходе можно не читать данную дополнительную главу, посвященную влияниям идеологии. Здесь не обсуждаются конкретные схемы процессов получения металла или их технические сложности. Предметом главы является скорее философия книги.

Приведем некоторые сведения из истории металлургии, по которым можно проследить формирование доменной идеологии, благодаря которой создается обсуждаемая парадоксальная ситуация.

Как известно, металлургия меди зародилась 6 тысяч лет назад, в ту эпоху, когда, согласно Библии произошло сотворение мира, 3,5 тысячи лет назад древние металлурги настолько усовершенствовали процесс продувки руды и топлива, что смогли уже восстановить железо, получить железную крицу, то есть спекшиеся металлизированные куски железной руды [1-3]. Совместная продувка кусков топлива и руды прослеживается в древних сыродутных горнах; видимо, она существует «от сотворения мира». Столь же древними являются и обсуждаемые несообразности.

Древние металлурги, естественно, поступали простейшим образом: смешивали куски руды и топлива и отлаживали горение этой смеси в горне-яме. Нельзя ожидать термодинамической оптимизации процесса от «металлургов» конца каменного века, начала века бронзы. Традиция смешивания реагентов сохраняется в доменном процессе и сейчас, хотя

теперь уже вполне ясно, что нужную скорость процесса можно обеспечить и без смешивания реагентов.

В средневековье дутье в горн-печь подают уже мехами за счет работы водяного колеса. В России ряд металлургических заводов в Карелии и на Урале появились в петровскую эпоху около плотин на реках. В частности, в 1723 году пущен завод на реке Исеть, положивший начало Екатеринбург. Сохранились полосы кричного железа, выкованные лично Петром I.

С 18-го века началась эпоха точного естествознания и, соответственно, с 19-го века – эпоха индустриализации передовых стран. Началось быстрое совершенствование механического оборудования металлургии. Мировой индустриальный металлургический цикл сформировался в 19-м веке; он унаследовал от прошлого основы металлургии и ее пороки. 19-й век стал временем огромного количественного роста черной металлургии. За период с 1800 г. до 1913 г. мировое производство чугуна и стали выросло примерно в 100 раз, по чугуну с 0,8 до 80 млн тонн в год. За последнее столетие выплавка чугуна выросла до 600 млн тонн, примерно в 7,5 раз.

В прошлом не раз начиналось осмысление металлургами преимуществ раздельной продувки. В частности, тысячу лет существовал каталонский способ получения железа, при котором топливо и руда загружались раздельно, в разные отсеки горна [7, 8]. Если бы мировой индустриальный металлургический цикл сложился на основе этого каталонского способа, то сейчас мы имели бы, очевидно, совсем другую металлургию, примерно ту металлургию с раздельной продувкой, которая здесь предлагается, без отмеченных несообразностей. Но индустриализация металлургии началась не в Каталонии, а в Англии; здесь раньше получили распространение мощные воздуходувки с паровыми машинами, плавка на коксе (с 1709 г.), интенсивный подогрев дутья (с 1829 г.), резко вырос размер доменных печей, были изобретены бессемеровский (1855 г.) и томасовский конвертеры. На долю Англии в середине 19-го века приходилось больше половины мирового производства чугуна и стали. В основном здесь и сложился мировой индустриальный цикл. Региональные варианты ремесленной металлургии, включая каталонский, были вытеснены этим индустриальным циклом. В результате по причинам, не зависящим от металлургии, мы получили в наследство от прошлого древнее получение металла на основе совместной, а не раздельной продувки.

В научную эпоху, в 19-20 веках металлурги постепенно разработали научную теорию доменной плавки на основе химии, физики, механики. Еще сотрудниками Лавуазье был написан большой труд «Различные состояния железа». За последнее столетие выполнен термодинамический анализ металлургических реакций. Естественно, возникающая теория доменной плавки полностью унаследовала установки старой доменной идеологии, ее «дух».

В подобных случаях исследователи попадают в особое положение: они должны с позиций точного естествознания изложить такие особенности древнего ремесла, которые нередко просто не поддается анализу этими методами. Требуется в виде закономерной логической схемы изложить то, что столетиями стихийно складывалось под действием многих случайностей. В подобных случаях нередко происходит то, что называют *приданием смысла бессмысленному* [12, 19]. Теории разных видов древнего ремесла обычно стремятся дать научное обоснование стихийно сложившихся особенностей процесса, дать их оправдание, апологию. Особенности ремесла предстают вполне разумными, согласующимися с принципами естествознания, а случайные блуждания технологии предстают как закономерное развитие. В нашем случае часто остаются неосознанными отмеченные огромные потери энергии топлива и другие перечисленные несообразности. Чтобы осознать эти пороки доменной плавки, нужно выйти из-под влияния доменной идеологии, требуется трезвый взгляд «со стороны».

5.2. Формирование доменной плавки

Что толку снова и снова ругать
домну?! Все равно лучше ничего нет.

Из дискуссий

Доменный процесс (то есть выплавка чугуна в шахтной печи) существует почти тысячу лет. Доменная плавка не была внедрена или изобретена кем-либо; она появилась самопроизвольно как процесс древнего ремесла или как продукт народного творчества в результате стихийного развития древнего сыродутного процесса. Сначала появление чугуна было неприятной неожиданностью для металлургов. Несколько столетий металлурги старались избавиться от появлений чугуна в своих печах, но не смогли это сделать, и вынуждены были смириться с ним. Интенсификация продувки в домницах, а также увеличение их высоты и объема, неизбежно вели к повышению температуры, к плавлению металла (около 1140 °С). Неизбежным следствием такой интенсификации продувки уже в 11-м веке стало появление чугуна, сначала в небольших количествах. Вместо привычного мягкого и ковкого кричного железа металлурги получили хрупкий и нековкий чугун, не пригодный для обычных изделий того времени. Чугун выбрасывали, называли свинским железом (по английски – «pig iron»; такой же смысловой оттенок имеет русский термин «чугунная чушка»).

Этот новый металл так и не удалось приспособить к существовавшим тогда способам металлообработки. Также не удалось заставить печи давать жидкий металл, более пригодный к существовавшей переработке. Оказалось легче предоставить печам давать металл, «какой уж сам получится», и искать для него новые применения. Результатом таких поисков

стало литье металлоизделий из чугуна. В частности, в 14-м веке было отлажено литье из чугуна пушечных ядер, а затем и самих чугунных пушек. Чугун стали получать специально, и в 13–15-м веках сформировался, был отлажен почти современный вид доменной плавки [7, 8].

К тому же доменная плавка оказалась плохо управляемой и склонной к пугающим, непредсказуемым и опасным расстройствам хода печи. Неожиданно могло пойти зависание или обрушение шихты, опасное самопроизвольное перегревание горна или еще более опасное его охлаждение со вспениванием шлака. Такое переохлаждение грозило перейти в катастрофическую аварию вплоть до полного «закозления» печи. При этом у доменщика почти нет или мало возможностей быстро изменить температуру горна; добавка топлива в завалку дает эффект, например, лишь через сутки. Случалось так, что топливная насадка печи забивалась вспененным густеющим шлаком, дутье затруднялось, печь полностью застывала и выходила из строя в результате такого «закозления». При этом хозяину печи оставалось только наблюдать, как его печь по непонятным причинам почему-то не принимает дутье, остывает, замерзает, и надвигается его разорение, причем он ничего не может сделать [1-3].

Происходили также случайные перегревания горна, когда жидкий металл иногда разъедал нестойкие огнеупоры и вырывался из печи наружу, в цех, нередко с человеческими жертвами. Подобные аварии случаются и на современных печах.

Приходится вести сложное и рискованное балансирование между чрезмерными зависаниями и чрезмерными обрушениями шихты в условиях принципиально неустойчивого движения материалов, между опасными перегревами и еще более опасными переохлаждениями горна, которые в пределе грозят катастрофической аварией, вплоть до «закозления» домны.

Когда домны стали очень большими, закозления печей стали редкими; огромную современную домну трудно «заморозить». Теперь аварии чаще происходят из-за чрезмерного растворения угольной футеровки, разрывов кожуха печи и прорывов жидкого металла из печи в цех.

5.3. Формирование жесткоконсервативной идеологии, отторгающей любые изменения

Люди умнеть еще не начали
Любят они, чтобы их дурачили
Мюзикл «Чикаго»

Опасные расстройства хода печи, которые нередко переходили в аварии, привели в древности к своеобразной *мистике опасной огнедышащей печи, адского жара*, невиданных температур. Такая доменная идеология или мифология напоминает средневековые религии, например, идеи огнепоклонников. Тогда обычно любая идеология получалась похожей на религию

и содержала много суеверий. От приверженцев религии требуется принятие всех догматов без исключения; доменная идеология также подразумевает принятие всех основных особенностей процесса. Требуется принять процесс целиком, признать, что в нем решительно ничего нельзя изменить¹.

Сформировалась идеология *испуганного суеверного смирения* перед доменным процессом, как перед опасно-капризным, непонятным и грозным явлением природы, почти непознаваемым и почти неуправляемым, которое мы не можем изменить. Мы можем лишь *изучать повадки* домны, ее капризы, и как-то готовиться спастись от этих капризов. Главное спасение состояло в том, чтобы тщательно поддерживать проверенные временем и сравнительно безопасные режимы процесса, по которым накоплен большой положительный опыт. Требовалось оберегать подобный режим, не допускать значительных отклонений от него. Тем более недопустимыми представляются рискованные эксперименты с огромными современными домнами. Metallурги хорошо знают, что и сейчас в ответ на предложение любых существенных изменений *доменички взвоят и скажут, что это будет уже не доменный процесс, что они не пойдут на* значительные коррективы процесса. Примерно так реагируют приверженцы религии на сомнение хотя бы в каком-либо одном ее догмате.

Конечно, доменщики совершенно правы со своей точки зрения. Такое поведение вполне разумно, если главная цель – избежать риска в опасно-капризном и плохо управляемом, малопонятном процессе, не допустить расстройств хода плавки, стабильно выдавать чугун. Важнейшей частью знаний доменщиков становятся *повадки* печи, истории расстройств хода плавки на различных печах, приемы борьбы с ними, статистика удачных и неудачных выходов на нормальный режим, и т. д. При таком подходе уменьшаются риски, но не удастся опробовать и освоить качественно другие и в принципе намного более выгодные варианты той же самой шахтной плавки. Доменный процесс представляется грозным, таинственным, пугающе – сложным, так что в этот процесс и сейчас металлурги не могут решительно вмешаться, не решаются внести улучшения, которые в принципе вполне очевидны с точки зрения физхимии, с позиций точного естествознания.

Интересно, что этот процесс, установившийся в древности самопроизвольно, против воли металлургов, сохраняется практически в неизменном виде до сих пор. Сформировалась доменная идеология, которая объ-

¹К. О. А. Есину когда-то приходил консультироваться П. Бажов, который писал сказы на темы горного Урала. Обсуждался вопрос: доменщики говорят, что перед грозой как человек легче дышит, так и домна «легче дышит». Много подобных поверий и суеверий наложили отпечаток на доменную идеологию и мифологию.

Одна из знаменитых бригад по удачному пуску домен выстилала лещады березовыми вениками, размещала на вениках 13 бутылей керосина (обязательно 13 – магическое число!). Выполняются и другие ритуалы и обряды, подобные религиозным.

вила и сам процесс, и все его особенности незаменимыми, неприкосновенными и т. д. Столетиями укореняется убеждение, что в процессе ничего нельзя менять, нужно лишь тщательно выдерживать установившиеся привычные, сравнительно безопасные режимы плавки.

И сейчас в домне по традиции выплавляется металл по принципу *уж какой сам получится*, поэтому получается чугун, а для доведения металла до нужного состава требуется дополнительный дорогой сталеплавильный процесс. Полнота горения топлива также оказывается такой, «какая уж сама получится», поэтому от горения топлива получается в 2-3 раза меньше тепла.

Представляется немислимым какое-то значительное вмешательство в этот опасно-капризный процесс, какое-то существенное изменение его. Выход состоит в том, чтобы начать изменение доменного процесса с улучшения его управляемости. Как уже отмечено, можно вводить с дутьем мелкий или пылевидный концентрат, и постепенно увеличивать долю рудной компоненты, которая вводится снизу, в виде концентрата, а не сверху, загрузкой окатышей. В этом случае появится возможность, варьируя подачу концентрата, быстро изменять интенсивность реакций восстановления в горне, соотношение выделения и поглощения тепла. Можно будет быстро корректировать температуру горна и не бояться его переохлаждения или перегрева. Можно избавляться от того страха, в котором держит доменщиков капризная домна, и смелее проводить дальнейшие изменения.

Изменения процесса станут психологически более приемлемыми, если перейти к более определенному, устойчивому движению материалов. Если в шахте печи Мидрекс нет топлива, одни металлизуемые окатыши, и нет пересыпаний материалов, то сход шихты намного более ровный, чем в домне. Поэтому удастся применить более сложную и более управляемую, целесообразную схему продувки, например, с двумя зонами ввода газов в шахту и с двумя зонами их вывода. Повышается управляемость процесса, и, соответственно, полнота использования топлива.

Если реагенты переносятся потоками газа в виде пылегазовой взвеси, то их движение также вполне понятно, устойчиво и описывается достаточно точными уравнениями аэродинамики. Можно быстро регулировать такое движение реагентов, всыпая в потоки дутья больше или меньше пылевидных реагентов и варьируя давление дутья. В этом случае не останется причин для того страха перед капризами домны, который не позволяет сейчас что-нибудь изменить в доменной плавке.

Важно отметить, что доменная плавка и ее идеология формировались в раннем средневековье, задолго до появления химии; тогда была лишь алхимия. Не было книгопечатания и вообще не было технических письменных знаний, поэтому даже полуфантастические представления алхимиков тогда можно было почерпнуть лишь из редких пергаментов и рукописей. В пре-

дыдущие «тёмные века» Европа состояла из варварских государств, и была утрачена большая часть знаний античного древнего мира. Первая «техническая литература», два первых трактата с рецептами по металлургии появились лишь в 16-м веке (Агрикола и Пиринсуччо, 1540 г., [44]).

Так как реагенты в домне смешаны, то все реакции развиваются одновременно; горение топлива и восстановление окислов идут совместно, хотя для оптимального проведения этих процессов требуются совершенно разные условия. И сейчас не удастся повлиять на какую-то реакцию, не вызывая многих непредсказуемых изменений по всем другим реакциям. В домне *все взаимосвязано*, и управление этим комплексом процессов затрудняется еще и этой взаимосвязанностью всех процессов. И состав металла, и состав газов, а также полноту горения топлива приходится принимать такими, какие уж сами получатся в этой смеси твердых реагентов. Если горение топлива и восстановление металла вести в разных зонах печи, то можно лучше оптимизировать, регулировать оба процесса.

Как и многие другие процессы древнего ремесла, доменный процесс качественно не изменился за многие столетия своего существования. Основная часть современных научных технологий появилась и прошла многочисленные усовершенствования за два последних столетия, которые образуют эпоху научно-технического прогресса; в доменной плавке в принципе ничего не изменилось и за эти два столетия. Сейчас крупным изменением могла бы стать полная замена кокса вдуваемой угольной пылью, но увеличение доли пыли тормозится доменной идеологией.

Отметим для сравнения, что сталеплавильный процесс, не столь обремененный древней идеологией, успел возникнуть и несколько раз качественно усовершенствоваться за эпоху научного развития, за два последних столетия. Были изобретены пудлинговые печи, которые сменились воздушными конвертерами, затем появились мартены, электропечи, кислородные конвертеры.

Сравнительно быстро изменяются также процессы, предшествующие доменному (агломерация, коксование, окислительный обжиг руд, предварительный обжиг сидеритов или известняка и др.), которые готовят сырье для домны. Эти подготовительные и доводочные процессы не явились сами, самопроизвольно в древности, как некий продукт народного творчества, как ремесло. В отличие от кричного и доменного процессов, они были изобретены и сознательно внедрены уже в научную эпоху. Совершенствуется то, на что не распространяются запреты древней идеологии; неизменным и архаичным остается то, что запрещает идеология. Вместе с этими неизменными принципами сохраняются и обсуждаемые несообразности металлургического цикла.

Считается, что управление доменным процессом, его совершенствование – это совсем особая область. Здесь не очень полезны знания физики

и химии, здесь главное – большой опыт, накопленное знание *повадок* домны. Нужна интуиция, «чутье», даже искусство доменщика. Распространено убеждение, что из попыток изменить процесс *все равно ничего не получится*, а можно и нужно лишь тщательно оберегать отлаженные безопасные и надежные режимы плавки. Предложения серьезно изменить процесс воспринимаются как наивность, идущая от незнания сложностей опасной действительности.

В подобных случаях говорят о глубоких *таинствах* древнего ремесла, о его еще не вполне раскрытых *секретах, о неразгаданных загадках*. Здесь почти бесполезны знания точных наук. Квалифицированным физико-химикам рекомендуют *не лезть в домну*. Действительно, вряд ли физик сможет разобраться в таинствах и капризах домны лучше, чем сами доменщики. Здесь для успеха надо просто помнить больше данных по предыдущим расстройством, по успехам и неудачам прошлых приемов выхода плавки на стационарный режим.

Но совсем не обязательно постигать все таинственные секреты того или иного древнего ремесла; они часто определяются такими силами и эффектами, которые практически не поддаются анализу современными методами точных наук. В подобных случаях прогресс обычно достигается перенесением процесса в научную область, где он определяется хорошо изученными простыми *фундаментальными физическими* силами, хорошо *регулирується* и поэтому описывается достаточно точными уравнениями. В таких процессах *все понятно*, и становятся неактуальными, отпадают *секреты и таинства ремесла*. В современных технологиях материалы движутся обычно под действием таких сил, как электромагнитные, гравитационные, силы инерции, силы давления газа, и др. В таком движении *все понятно*, в отличие от схода в домне спекающихся, слипающихся, пересыпающихся масс, которые движутся через чередование зависаний и обрушений, участвуют в нерегулируемых реакциях.

5.4. Почему установилась плавка на коксовой насадке

Чтобы досадить доменщикам, Сатана придумал фильтрацию шлака через 10-метровый слой кокса, да еще против дутья и со вспениванием.

Из дискуссии

Плавка на чугун установилась в прошлом по историческим причинам, из-за давней традиции работать с избытком топлива. Существовала страшная угроза закозления домны в результате одного из тех случайных переохладений, которые периодически наступали по непонятным причинам. Чтобы защищаться от этой угрозы, *на всякий случай* давали побольше топлива. Не сгоревший остаток топлива скапливался в горне печи и выше. Так сти-

хийно сложилась и за несколько столетий очень укоренилась традиция работать с топливной (сейчас – с коксовой) насадкой.

Еще в домницах, которые предшествовали домнам, давали избыток топлива, чтобы обеспечить достаточно полное восстановление железа. Расход топлива составлял несколько тонн на тонну металла. В кузнечном горне часто горит одно лишь топливо, а металлоизделие помещают в такую топливную засыпку периодически, в перерывахковки, тогда, когда остывающее изделие нужно нагреть.

Такой избыток топлива, который древние металлурги давали на всякий случай, привел к плавке металла на слое топлива, к фильтрации расплавов металла и шлака через слой кокса и, соответственно, к получению чугуна. Позднее теория возвела это следствие естественной предосторожности древних доменщиков в незаменимый, обязательный, незыблемый принцип доменной плавки. В нижней части современной домны обязательно накапливают избыток «лишнего», не сгоревшего кокса, который соответствует расходу топлива за несколько часов работы агрегата. Как и другие особенности доменного процесса, плавление на слое кокса получилось в результате стечения исторических случайностей, а затем было **узаконено** идеологией как единственно возможный способ плавления.

Интересно, что сейчас именно этот избыток топлива, введенный в прошлом для защиты от охлаждения горна, не позволяет при необходимости предотвратить случайное нарастающее охлаждение горна. Именно коксовая насадка, именно избыток топлива приводит к тому, что все горение полностью идет лишь до СО, лишь по первой стадии, и дает мало тепла (28 % тепла полного горения). Если бы в горне не было кокса, можно было бы при необходимости временно дать меньше угольной пыли на единицу дутья и организовать полное горение до СО₂, получить не 28 %, а 100 % тепла полного горения, быстро разогреть горн.

Сейчас именно эта древняя традиция тормозит наращивание доли угольной пыли в топливе домен. Эта традиция не позволяет также перейти на предлагаемую плавку без кокса, на схему «угольный Мидрекс», вводить все топливо вдуванием угольной пыли. Доменщики психологически не могут принять процесс без традиционной коксовой насадки.

В коксовой засыпке, при контакте с кусками кокса восстановленное железо плавится при 1140 °С с образованием эвтектики – чугуна. Восстановленные фрагменты окатышей здесь расплавляются почти сразу после металлизации; они могут насыщаться углеродом и через газ. Такая температура 1140 °С и выше часто достигается в домне на высоте порядка 10 м над фурмами. Образующийся жидкий металл быстро стекает вниз, в горн, а неметаллическая, шлаковая часть окатышей с остатками FeO остается. Здесь могут образоваться высоковязкие шлаковые расплавы, неспособные

стекать в горн, фильтроваться через 10-метровый слой кокса; требуется добавлять в окатыши флюсы, разжижающие шлак.

Если в контакт с коксом приходит шлак с большим содержанием окислов железа, то бурно развиваются процессы прямого восстановления с обильным газовыделением и с поглощением большого количества тепла (160 кДж/моль). Шлак охлаждается реакциями, густеет и вспенивается, так как образующиеся многочисленные пузыри газа не могут быстро покинуть расплав. Потoki дутья переносят этот вспененный шлак в более высокие и более холодные горизонты печи, где он окончательно густеет. В результате может сильно понижаться газопроницаемость больших участков шихты. Большие зоны печи становятся почти *непродуваемыми* выключаются из процессов восстановления. Основная часть того избыточного давления газов, которое создается воздуходувкой у фурм, тратится именно на преодоление газами зоны коксовой насадки [8, с 276]. Это – наименее газопроницаемая часть печи.

Периодически наступают случайные похолодания печи; при таком похолодании возникает угроза загустевания и вспенивания шлака во всей 10-метровой коксовой насадке. Вспененный густеющий шлак, забивающий 10-метровый слой кокса, может резко затруднить продувку, и начинает казаться реальной даже перспектива «закозления» печи, катастрофической аварии огромного агрегата.

Кроме того, коксовая насадка приводит к тому, что в горне слой шлака засоряется не сгоревшими остатками кокса, коксовой мелочью, что нередко затрудняет его спуск, не говоря уже о потерях топлива со шлаком.

Древняя традиция накапливать в печи избыток не сгоревшего топлива была признана благом еще и потому, что фильтрация расплавов через слой топлива позволяет обеспечить высокую степень восстановления окислов железа. В прошлом не умели иными способами понизить потери железа со шлаком. Сейчас вполне достаточная степень металлизации (например, 95 %) достигается в агрегате Мидрекс уже при 750 °С. Если работать без коксовой насадки, то металлизированные окатыши можно сохранять твердыми вплоть до максимальных температур печи, например, до 1400-1500 °С; чистое железо плавится при 1530 °С. Восстановление до конца может оставаться косвенным, экономичным, за счет газа. Массу металлизированных окатышей можно плавить и науглероживать при встрече с факелами горения около фурм, при избытке в факелах угольной пыли. Подобное плавление бывает в сталеплавильном агрегате. Подробнее схемы плавления окатышей рассмотрены ниже, в разделе 3.4.

Косвенное восстановление пористых окатышей газом обычно оказывается не только более экономичным, но еще и быстрым и более полным, чем прямое восстановление расплавленных масс шлака коксом. При расплавлении окатышей остающиеся окислы железа растворяются в шлаке,

образуют расплав с соединениями типа фаялита и с их эвтектиками. В результате термодинамическая активность окислов железа намного уменьшается, их восстановление становится термодинамически более трудным. В зоне насадки идет практически только невыгодное и медленное прямое восстановление. Значительные количества CO_2 и H_2O в газах появляются лишь выше насадки.

Диффузия реагентов в больших натеках шлака идет медленнее, чем диффузия газов в твердых пористых окатышах; при расплавлении уменьшается и величина реакционной поверхности. Хотя это самая горячая часть печи, скорость восстановления здесь мала. Значительно проще было бы выполнить эту часть восстановления в твердом состоянии, до плавления. Нагревание массы металлизированных окатышей также легче выполнять в твердом состоянии. Хотя насадка занимает самую горячую зону домны, она выполняет сравнительно небольшую часть основной работы – восстановления, но создает основную часть сложностей и неприятностей плавки.

Плавка на чугун установилась в прошлом еще и потому, что это самый легкоплавкий эвтектический сплав системы железо-углерод. В древности не умели работать с высокими температурами, и очень важно было получать сравнительно легкоплавкий металл, чугун. В точке эвтектики, при 1140°C , в железе растворяется 4,3 % углерода. При нагревании расплава растворимость углерода повышается, например, на 1 % на каждые 100°C . Около фурменных очагов температура высока (до 2000°C), и здесь в металле может растворяться намного больше углерода. Когда такой металл попадает в более холодные зоны у днища печи, он оказывается пересыщенным, и из него выделяется углерод. На днище печи может отлагаться слой углерода. Это явление подобно намерзанию льда на холодных деталях холодильника, на стенках морозильной камеры. В бытовой печи и ее дымоходе отлагается углерод в виде сажи в более холодных зонах.

Такое отложение углерода на днище было, очевидно, замечено еще в средние века и послужило основанием для перехода к угольной футеровке печи. Если мы устраняем коксовую насадку, то можно пытаться поддерживать металл в состоянии пересыщения углеродом за счет избытка угольной пыли в фурменных очагах, в зоне повышенных температур; в противном случае будет растворяться угольная футеровка. Другой выход состоит в том, чтобы перейти к сталеплавильной футеровке печи огнеупорами уже и при выплавке чугуна, если из шахты убирается кокс и устраняется коксовая насадка.

Таким образом, при *незамыленном* взгляде со стороны вполне очевидно, что было бы лучше убрать кокс из шахты печи, вести косвенное восстановление газами, сохранять окатыши твердыми до достижения максимальных температур. Традиционное плавление металла на коксовой насадке приводит к целому ряду сложностей плавки, к риску многих рас-

стройств процесса. Если бы кто-то поставил целью как можно больше затруднить работу домны, увеличить неустойчивость и капризность процесса, то ему трудно было бы придумать для доменщиков неприятность больше, чем коксовая насадка.

Плавление на насадке установилось по случайным причинам, а сейчас сохраняется в силу традиции, вследствие убеждения, что в доменном процессе ничего нельзя менять. Если убрать топливо из шахты и устранить насадку, предоставить восстановленным окатышам свободно опускаться до пода, и плавить их там, то мы получим целый ряд преимуществ. Правда, при этом во многих случаях придется уже и угольную футеровку пода заменять сталеплавильной.

5.5. Принцип «двухстадийный процесс наиболее эффективен»

Коксовая насадка – застарелая вредная привычка доменщиков. От нее надо закодироваться.

Из дискуссии

Если все топливо вводится вдуванием угольной пыли, то можно вести плавку металлизированных окатышей как на чугун, так и на железо. При избытке угольной пыли получится чугун. При соответствующем недостатке топлива получится такое горение пыли, которое даст газ с содержанием от 1 до 25 % CO_2 в сумме газообразных окислов углерода. Такой газ способен восстанавливать железо, но окислять углерод. При плавлении металлизированной массы факелом с 25 % CO_2 получится почти безуглеродистое железо.

При плавке на железо или на малоуглеродистую сталь отпадает целый дорогой сталеплавильный передел, который сейчас часто оказывается обычно намного дороже самой доменной плавки. В предлагаемой схеме этот передел заменяется простой добавкой углерода в металл. Еще одно преимущество такой плавки состоит в том, что можно при необходимости расплавить почти втрое больше металла тем же количеством топлива, так как горение до 25 % CO_2 дает в три раза больше тепла (см. приложение).

Один из важных принципов современной доменной идеологии состоит в том, что **двухстадийный процесс производства стали наиболее эффективен** и останется таковым в обозримом будущем [7, 8]. Считается, что эффективность двухстадийного процесса доказана еще переработкой чугуна в сталь в древних окислительных кричных горнах. Вера в двухстадийный процесс окончательно укоренилась в 19-м веке, когда высокие результаты показали процессы домна – конвертер и домна – мартен. На основе таких процессов сформировался единый мировой индустриальный металлургический цикл.

Вера в двухстадийный процесс нередко оказывается даже более незыблемой, чем принцип «доменный процесс незаменим». Даже если изобретаются способы прямого получения железа, то и здесь обычно предлагается двухстадийный процесс. В первом агрегате, как и в современном цикле, получается металлизированное сырье, и лишь во втором агрегате оно переплавляется в сталь, примерно как в процессе «Мидрекс» – электропечь, или вращающаяся печь – электропечь. Главное отличие таких процессов от современного процесса домна – электропечь состоит в том, что металлизированное сырье не переуглероживается и обычно остается твердым. Давление доменной идеологии-религии столь сильно, и наша уверенность в необходимости двухстадийного процесса столь велика, что мы не решаемся отказаться от нее даже тогда, когда уже на первой стадии получают металлизированные окатыши, по составу близкие к стали. Простое плавление их дало бы сталь, но мы не решаемся расплавить их уже в шахтной печи, вводим новый передел.

Здесь еще раз идеология объявляет добродетелью, научно-обоснованным и закономерным преимуществом порок плавки, сложившийся вследствие исторических случайностей.

В процессе «Корекс» продувкой в шахтной печи получают металлизированные окатыши, по составу близкие к стали, но плавление их переносят в другой агрегат (или в другой корпус агрегата), причем плавят их не на сталь, а на чугун, на слое топлива (угля). Полученный металл, который имеет состав, близкий к стали, переуглероживается при плавлении, чтобы затем тут же вступить в процесс понижения концентрации углерода до исходной величины в дорогом сталеплавильном процессе.

Но если из шахты печи убрать твердое топливо, отапливать печь только вдуваемой угольной пылью, то можно эффективно вести плавку на железо, которое превращается в сталь простой добавкой углерода.

Подобный процесс удаления твердого топлива из шахты печи произошел в плавке черновой меди в результате ряда блужданий технологии. Классический способ получения черновой меди включал шахтную плавку кусковых пиритов (сульфидов меди CuS) в смеси с коксом; полученный расплав штейна (расплав CuS с примесями, часто с FeS) затем конвертировали с продувкой воздухом, что позволяло выжечь из расплава серу S и получить черновую медь Cu . Этот способ похож на получение стали по схеме доменная печь – воздушный конвертер. Сейчас обычно подобная шахтная плавка ведется без кокса. Горение серы из сульфида CuS медной руды дает много тепла, поэтому в такой шахтной автогенной плавке получается сразу расплав готовой черновой меди. Удаление кокса из шахты позволило сразу получать готовый металл [47]. В черной металлургии также, очевидно, достаточно убрать кокс из шахты «доменной» печи, чтобы сразу получать железо или почти готовую сталь.

Отметим, что шахтные печи для плавки медной руды (пиритов, сульфидов) в штейн создавались по образцу домен и унаследовали их несообразности. Можно отапливать такие печи факелами с угольной пылью, полным сжиганием угля, но их отапливают, как и домны, неполным сжиганием кокса, что в 10 раз дороже. Кроме того, присутствие кокса в шахте печи не дает выгорать сере из руды, так как углерод кокса поглощает кислород дутья и мешает окислению серы. Поэтому здесь мы встречаем еще один пример *явной или грубой несообразности*, которую можно не замечать лишь под влиянием упомянутой идеологической *поразительной слепоты*. Когда убрали из шахты кокс, там пошло выгорание серы из пиритов (CuS , Cu_2S) и получилась не только экономия топлива, но и сразу готовая черновая медь.

5.6. Принцип «доменный процесс незаменим!»

Доменный процесс – это жернов, повешенный на шею металлургии в наказание за ее грехи в научных исследованиях.

С. Смит, американский металлург

Когда резко изменялись условия производства, каждый раз торжествовали принципы «доменный процесс незаменим!» и «доменную плавку нельзя изменять ни в одном пункте!». Металлурги каждый раз не решались отойти от традиционного вида древней доменной плавки, «освященной» идеологией-религией, *не могли поступиться доменными принципами*, не соглашались видоизменить доменный процесс получения металла соответственно новым условиям. Они скорее соглашались ввести новый дорогой передел, подготовительный или доводочный, ради того, чтобы сохранить неизменным доменный процесс, остаться в рамках отлаженных режимов шахтной плавки. В результате к настоящему времени в цикл добавился целый ряд переделов.

При физико-химическом анализе мы можем выделять преимущества доменной плавки и ее недостатки, несообразности, можем определять способы устранения несообразностей. В рамках доменной идеологии мы должны принять процесс целиком, со всеми его особенностями. Предложение изменить какой-то элемент плавки воспринимается примерно так же, как в религии предложение переработать тот или иной догмат для улучшения всей системы; и в религии, и в доменной идеологии такие улучшения неприемлемы.

В средневековом кричном процессе получали в горне домницы из руды спекшиеся куски металлизированного железа, то есть крицу, и затем ковали ее, периодически возвращая в горн для подогревания. Процесс от

руды до изделия тогда проходил за один передел, за одну операцию «нагрев – охлаждение». При этом нагревали материалы до невысоких температур, порядка 800-900 °С.

Но при доменном получении металла к значительным изменениям условий часто приспособлялись тем, что добавляли новые переделы, чтобы сохранить доменную плавку неизменной. Поэтому к настоящему времени металлургический цикл стал довольно сложным нагромождением подготовительных и доводочных производств, «пристроек и приделок» к основному процессу, введенных в разное время и при разном стечении случайных обстоятельств. На пути от руды до изделия материалы проходят теперь не одну, а 4-8 операций нагрева – охлаждения, в том числе два энергоемких расплавления металла – в домне и в сталеплавильном агрегате. В этом плане современный цикл намного расточительнее по затратам тепла. Это особенно ненормально при современном подорожании энерго-ресурсов и при множестве программ энергосбережения.

В Англии уже в 18-м веке выявился недостаток древесного топлива для массовой металлургии, поэтому было введено коксование угля. Обычный уголь при металлургических температурах часто превращается в мягкую или даже жидкую массу; коксование позволило получить из угля куски твердого пористого кокса, подобные кускам древесного угля. Это позволило вести доменную плавку по-прежнему, заменив куски древесного угля кусками кокса. Однако пришлось ввести новый передел – коксование.

Когда в начале 20-го века потребовалось от кусковых руд переходить на концентраты, можно было отлаживать вдувание порошка концентрата в домну. В простейшем случае для этого достаточно просто всыпать концентрат через дозатор в поток воздуха перед воздуходувкой. Технически вдувание концентрата намного проще, чем вдувание угольной пыли; концентрат инертен, и его можно просто всыпать в поток дутья. Такое вдувание концентрата дало бы возможность быстро регулировать температуру горна, а также сделало бы ненужным его окускование, которое достаточно дорого; цена окускования концентрата нередко составляет больше половины всей стоимости доменного рудного сырья и больше четверти стоимости чугуна. Агломерация или обжиг окатышей нередко обходятся дороже, чем сам доменный процесс, взятый без стоимости сырья.

Однако металлурги и в этом случае предпочли не рисковать, не вводить новшества в опасно-капризный доменный процесс, не решились серьезно вмешаться в эту плавку. Предпочли оставить доменный процесс неизменным, хотя для этого снова потребовалось добавить новый передел – окускование концентрата, и потребовалось преодолеть значительные технологические трудности. В частности, потребовалось отладить очень необычную продувку порошка концентрата сверху вниз в тонком слое на агломерационной ленте за счет разрежения, создаваемого эксгаустером.

Порошок концентрата превращался в куски агломерата, а в другом варианте – в обожженные окатыши, подобные привычным кускам руды. Такой передел ввели для того, чтобы доменную плавку можно было вести по-прежнему, заменив традиционные куски руды окатышами. Тогда было естественно для прогрева и спекания концентрата искать способ, подобный традиционной доменной продувке. Но обычные потоки доменного дутья, направленные вверх, унесли бы порошок концентрата с отходящими газами. Поэтому применили продувку сверху вниз, при которой дутье не уносит порошок концентрата, а лишь прижимает его к аглоленте, к «постели». Так «доменная продувка» порошка концентрата трансформировалась в современный процесс агломерации.

Можно было искать такое видоизменение доменного (или шахтного) процесса, при котором устранялся бы самый очевидный недостаток домны – переуглероживание металла. Можно искать способы получения стали (или полупродукта, близкого к стали) уже в шахтной печи, одним переделом. Так, в упомянутом каталонском процессе [7, 8] топливо и руда засыпались в агрегат отдельно, руда восстанавливалась газом, поступающим из топливной зоны. Металлизованные спекающиеся куски руды, а затем спекшаяся крица железа получалась не в угольной засыпке, а в другом отсеке, отдельно от топлива. В таких процессах получаемый металл содержит мало углерода, и его расплавление сразу дало бы сталь. Сейчас подобную массу спекающихся окатышей получают в агрегатах «Мидрекс», и простое расплавление такой массы в электропечи практически сразу дает сталь, которую можно непосредственно использовать как готовую рядовую сталь или же проводить процессы ее улучшения, легирования, рафинирования, вакуумирования и др.

Но металлурги и здесь не решились круто вмешаться в опаснокapризный доменный процесс, серьезно видоизменить его. Предпочли сохранить доменную плавку неизменной, по-прежнему получать в домне металл, *какой уж сам получится*, а для выплавки стали, то есть для исправления переборов и промахов домны, ввели новый дорогой сталеплавильный передел.

Чтобы достигнуть высоких современных показателей доменного процесса, потребовалось намного увеличить размер печей и интенсифицировать продувку. Для этого потребовалось, в свою очередь, намного повысить требования к сырым материалам, готовить *хорошо окускованное* сырье в виде прочных, пористых кусков, устойчивых к истиранию, к химическим и термическим воздействиям. Приходится идти на значительное удорожание подготовительных процессов, чтобы добиться высоких показателей домны, не изменяя характер плавки. Часто больше половины стоимости чугуна обусловлена именно тем, что для домны и топлива, и рудную компоненту нужно готовить хорошо окускованном виде.

Показатели домны повышаются также за счет глубокого и дорогого обогащения руды, а часто также так же и за счет обогащения коксующегося угля. За последние десятилетия быстро возрастает работа обогащения сырья. В ремесленной металлургии можно было отбирать лишь богатые руды, лишь лучшие куски, и каждый кусок руды обрабатывать отдельно.

Окислы пустой породы, которые не удается отделить при обогащении, удаляются потом в доменной печи расплавлением и переводом их в шлак. Пока тепло горения топлива в домне дорого (например, в 10 раз дороже, чем в паровом котле), экономически оправдано глубокое и, соответственно, дорогое обогащение руд. Повышенное содержание шлака приводит также к дополнительным расстройством хода капризной и плохо управляемой доменной плавки, в которой шлак должен совершать длинный путь фильтрации через коксовую насадку. Если же мы отладим отопление шахтной печи полным сжиганием угля, сделаем тепло горения в 10 раз дешевле, а процесс сделаем более управляемым, то намного дешевле станет удаление пустой породы ее переплавкой в шахтной печи. Можно будет не столь быстро наращивать работу обогащения.

Если, например, можно переплавлять не 10 % шлака по отношению к металлу, а 30 %, то есть принять втрое менее глубокое обогащение, то при полном сжигании топлива расчетный расход углерода увеличится лишь на 8 кг на тонну металла (расчет 9 приложения). В этом случае можно не столь быстро наращивать или даже сокращать затраты на обогащение.

В целом получение металла в принципе не изменилось и за эпоху научно – технического прогресса, и за всю тысячу лет плавки чугуна, и даже за 6 тысяч лет существования металлургии. «От сотворения мира» и до настоящего времени металл получают продувкой смеси кусков топлива и рудной компоненты. При изменении внешних условий вводятся новые дополнительные переделы, чтобы сохранить доменный процесс неизменным. Торжествует принцип «в доменной плавке ничего нельзя менять», можно лишь приспособливаться к ней.

5.7. Доменная идеология

Процессы ремесла часто не совершенствуются или даже деградируют. Сейчас никто не сделает дамасскую сталь или скрипку Страдивари.

Из дискуссии

В деталях и в частностях доменный процесс быстро совершенствуется, становится высокотехнологичным, даже высоконаучным. Исследователи давно смирились с требованием идеологии не касаться основ процесса, привыкли к тому, что шансы на успех есть лишь в **периферийных** вопросах, в деталях и частностях, анализировать процесс в целом или цикл в целом **бессмысленно**.

Центральные положения доменной плавки как бы не подлежат анализу и критике; физико-химические исследования сосредотачиваются на деталях и частностях процесса, но *не допускаются идеологией* к решению центральных вопросов, к выбору принципа процесса. Исследователям остается утешаться лишь тем, что масштабы металлургии огромны, и в ней нет такой мелочи, которая не могла бы дать экономию в миллион долларов.

Программное обеспечение автоматического регулирования доменных печей совершенствуется, например, каждые 5 лет, сами компьютеры такого управления – каждые 10 лет; конструкции механизмов механического оборудования, огнеупоры, фурмы и прочее – каждые 20-40 лет. Но основной принцип процесса сохраняется «от сотворения мира», остается неэффективным, архаическим и сохраняет «врожденные пороки». И здесь неизменным и архаичным остается то, что запрещает изменять доменная идеология; быстро прогрессирует то, на что запреты идеологии не распространяются.

Современная огромная доменная печь (например, объемом 5000 м³) может иметь совершенное и мощное механическое оборудование с применением «космических» материалов и технологий, оснащается тысячами приборов, обширной электроникой и автоматикой. Пульт управления доменной печью может выглядеть подобным пульту в Центре управления космическими полетами. Однако внутри такой доменной печи происходит все та же продувка смеси кусков топлива и рудной компоненты, как и в первых сыродутных горнах-ямах у первобытных «металлургов» конца каменного века.

Хотя наша современная металлургия по многим показателям достигла высокого совершенства и в частности даже стала высоконучной, она не может, тем не менее, отказаться от совместной продувки. Мы не можем вырваться из той колеи, в которую нас поставили еще древние пещерные «металлурги» где-то в конце каменного века истории человечества, в эпоху возникновения металлургии и перехода к веку бронзы. Мы покорно движемся по этой колее, нас удерживает в ней огромная сила инерции и традиции.

5.8. Психологические сложности

Доменная идеология старше протестантской религии, но моложе ислама. И по фанатизму приверженцев она посередине между протестантизмом и исламом.

Из дискуссии

Если не учитывать давление идеологии, то сразу же остаются без ответа вполне законные и естественные недоуменные вопросы, которые здесь постоянно возникают, особенно у исследователей со стороны, не пропитанных доменной идеологией. Например, разве могут такие явные несообразно-

сти оставаться сейчас неосознанными при современном уровне знаний? Если несообразности можно устранить так просто, перегруппировкой отлаженных элементов того же шахтного процесса, то почему эта возможность остается не только не реализованной, но и не осознанной? Как уже отмечено, эти вопросы формулируются иногда даже в такой форме: «что же, металлурги все дураки, что ли?». Действительно, в рамках обычной логики нелегко понять, как могла возникнуть такая ситуация.

Оставаясь в рамках идеологии, мы можем отважиться лишь на то, чтобы механизировать обслуживание доменного процесса, интенсифицировать, оптимизировать, автоматизировать этот процесс древних металлургов, совершенствовать его в частностях, но не решаемся выдвинуть свой принцип, свой процесс получения металла, отличный от древней совместной продувки кусков руды и топлива. Технический прогресс быстро и неузнаваемо изменяет оснащение процесса, то есть то, что существует вокруг процесса, но не затрагивает самого его принципа.

Вследствие упомянутой почти религиозной преданности доменному процессу, вследствие чрезмерной веры в него, мы не вполне сознаем его несообразности. В соответствующих публикациях внимание часто сосредотачивается не на огромных потерях энергии в домне, а наоборот, на том, что теплотехнические показатели домны все же лучше, чем у других металлургических агрегатов. Хотя очень много написано об экономии кокса, о соотношении прямого и косвенного восстановления, мы не сознаем вполне, насколько велики потери химической энергии топлива в домне. Нам не встречалась в литературе четкая констатация того факта, что тепло горения в домне в 2-3 раза меньше возможного, и что это тепло обходится примерно в 10 раз дороже, чем в «нормальных» агрегатах. Нередко считается, что потери химического тепла с колошниковыми газами вообще несущественны, так как это тепло используется в рекуператорах. Но через рекуператоры удастся вернуть в печь примерно лишь 20 % химического тепла, потерянного с отходящими газами, а наиболее ценное высокотемпературное тепло можно получить в печи лишь за счет неполного горения топлива.

Мы подчеркиваем высокие показатели домны, ее достаточно низкие затраты, но часто не вполне сознаем, что эти показатели достигаются, грубо говоря, ценой десятикратных затрат на подготовке сырья для домны и еще десятикратных затрат на исправлении перебоев или промахов домны в последующем сталеплавильном процессе. Хотя эти данные являются общедоступными, они остаются как бы на заднем плане сознания, не доводятся до четких, ясных формулировок и остаются, как бы не вполне осознанными. На переднем плане в виде ярких образных формулировок и красочных сравнений фигурируют данные о высокой производительности домен, об их гигантских размерах, и другие выиг-

рышные для домен факты, хотя они могут и не оказывать сильного влияния на общую конечную экономичность производства металла.

Осознание несообразностей идеологии, если и существует, то лишь на уровне неясных предчувствий и смутных ощущений. Требуется большая работа, чтобы превратить такие предчувствия в реальное знание, которое ведет уже к конкретным решениям.

В психологии говорят [12, 19], что в подобных случаях мы проявляем *идеологическую поразительную слепоту* к таким фактам, и здесь *документ против идеологии бессилён*. Так формируется застарелый консерватизм идеологии, глубокое инстинктивное недоверие к любым новшествам, резкое *отторжение* предлагаемых улучшений.

Пока мы находимся под давлением идеологии, само мышление в этих вопросах остается робким и непоследовательным. Если же нам удастся выйти за рамки неадекватной идеологии, быстро найдутся простые решения старых проблем.

Характерные обороты или ключевые слова дискуссий о недостатках домны следующие: *доменный процесс незаменим, он переживет тысячелетия*, предлагайте что-то для других агрегатов, а *в домну не лезьте*, все равно ничего не получится, это *бессмысленно*.

Неполное сжигание топлива в домне и, соответственно, потери от половины до двух третей химической энергии топлива вызваны тем, что здесь нарушаются основные требования термодинамики. Газы не могут догорать полностью при избытке твердого топлива. Такие резкие противоречия с требованиями термодинамики встречаются в древнем ремесле; от древних авторов этих процессов нельзя ожидать учета термодинамики. Такие противоречия с термодинамикой не встречаются, насколько нам известно, в современных химических или физико-химических технологиях. Наоборот, эти технологии часто скрупулезно оптимизируются по термодинамическим параметрам. Один из принципов такой оптимизации – проведение процессов при возможно меньших перепадах термодинамических потенциалов. Из этих приемов термодинамической оптимизации процессов недавно выросла теория эксергии [40].

Еще одна особенность домны, унаследованная от древнего ремесла, – движение материалов под действием нефундаментальных сил трения в пересыпающихся и спекающихся массах, которые не поддаются точному описанию и приводят к неустойчивому движению. Так как эти силы нефундаментальные, то физхимик здесь обычно ничем не может помочь доменщику, и его попытки вмешательства вызывают лишь досаду. К таким элементам следует отнести и совмещение многих реакций, которое не позволяет оптимизировать каждую из них в отдельности. Такие особенности доменного процесса свидетельствуют о законсервированных в нем элементах древнего ремесла.

5.9. Научные технологии и процессы древнего ремесла. Закономерности фундаментальные (точные) и нефундаментальные

Людей слишком долго кормили сладостями, от этого у них испортился желудок. Нужны горькие лекарства, едкие истины.

М. Ю. Лермонтов

Доменная плавка качественно не изменилась за многие столетия своего существования, как и многие другие процессы древнего ремесла. Рассмотрим подробнее различие современных научных технологий и процессов ремесла.

Новые технологии обычно основываются на точных уравнениях и так называемых простых или фундаментальных силах, которые описываются точными общими уравнениями физики, открытыми за последние три столетия. Ясные, простые и общие закономерности позволяют быстро совершенствовать такие технологии. С другой стороны, технологии древнего ремесла основывались на нефундаментальных явлениях и силах, которые не поддаются точному описанию, таких, как силы трения, слипания, спекания на ранних стадиях процесса. Эти силы, и соответствующие явления, и сейчас поддаются лишь постепенному эмпирическому изучению методом проб и ошибок. Накапливаются факты, обобщаются, *нащупываются* закономерности. Сейчас при поиске закономерностей в таких процессах применяется компьютерная обработка данных, статистическое выявление тенденций, корреляций. Создаются программы управления процессом, регулирования, оптимизации, но эти приемы остаются периферийными. В центральных вопросах ситуация качественно не меняется, как в доменном процессе, так и в других процессах ремесла. Такие процессы совершенствуются примерно так же медленно, как веками совершенствовались процессы ремесла. Не следует ожидать более быстрого совершенствования и от элементов древнего ремесла, сохраняющихся в доменном процессе.

Часто идеология точного естествознания конфликтует с идеологией эмпирического изучения нефундаментальных процессов. С этой точки зрения можно рассматривать взаимоотношения физхимиков и доменщиков. Чтобы обсудить взаимоотношения точных наук с эмпирическим «ремесленным» совершенствованием процессов, потребуется на время отойти несколько в сторону от нашей темы и воспроизвести здесь ряд положений из истории науки [41].

Как известно, все силы, встречающиеся в природе, можно разделить на два вида:

а) силы фундаментальные или простые, точные. Сюда относятся основные физические взаимодействия, то есть электрические, магнитные,

гравитационные силы, механические силы инерции ($F = ma$), а также производные от этих сил. Такой производной можно считать, например, давление P газа; оно сводится к силам инерции ударов молекул и в основном описывается простым уравнением $PV = RT$. Фундаментальные силы изучены за последние три столетия, и результаты этого изучения образуют точное естествознание;

б) силы нефундаментальные, не точные. Таковы силы трения, спекания, слипания, силы прочности и упругости твердых тел. Эти силы не поддаются точному описанию, могут резко изменяться со временем, а также при переходе от одной системы к другой. Соотношение фундаментальных и нефундаментальных сил обсуждал, в частности нобелевский лауреат Р. Фейнман [42, с. 217-221].

Как известно [41], начиная с работ Ньютона, были найдены примерно десять общих точных фундаментальных уравнений физики. Сам Ньютон дал основную формулу механики $F = ma$, которую можно рассматривать как определение силы инерции, а также уравнение сил всемирного тяготения ($F = G m_1 m_2 / r^2$). Эти два уравнения полностью описывают небесную механику. Для расчетов по этим уравнениям была разработана даже целая новая математика – дифференциальное и интегральное исчисление (Ньютоном и Лейбницем).

Затем последовали уравнения Кулона (1784) для электростатических сил, Фарадея (1836) для электромагнитной индукции, и уравнения Максвелла, заложившие основы теории поля. На рубеже 19-го и 20-го веков уравнение Планка $E = h\nu$ стало началом квантовой механики, и появилась теория относительности Эйнштейна. Обсуждаемые десять уравнений и те явления, которые они описывают, образуют точное естествознание (иногда всю точную науку относят к физике, включая сюда и физическую химию). Хотя точность измерений быстро возрастает, до настоящего времени не удается обнаружить каких-то неточностей данных уравнений. Говорят, что это – единственное, что мы знаем точно, и в этом смысле это самая ценная часть наших общих знаний. В каждой науке столько точного общего знания, сколько ее закономерностей прямо вытекает из упомянутых десяти фундаментальных уравнений точного естествознания или сводятся к проявлениям фундаментальных сил.

Точное естествознание, созданное за последние три столетия, стало качественно новым этапом развития науки. Раньше не было столь общих точных закономерностей. За созданием качественно новой науки последовало качественно новое развитие экономики – индустриализация хозяйства и современный научно-технический прогресс ¹.

¹ После основных открытий Планка и Эйнштейна уже целое столетие почему-то нет новых уравнений и теорий такого масштаба, хотя число исследований и исследова-

До эпохи точного естествознания уровень жизни в Европе не очень отличался от того уровня, который достигался в античном мире. Но за последние 200 лет, когда развитие шло в основном на базе точного естествознания, уровень жизни в передовых странах вырос примерно в 100 раз, производство чугуна и стали выросло примерно в 1000 раз, и т. д. Важным моментом начала индустриализации было создание паровых машин. После того, как была принята и освоена механика Ньютона, когда лучше стали понимать давление газа, последовало много механических изобретений, включая и паровые машины.

Сама физика и, соответственно, современная техника, которая строится на основе точного естествознания, предпочитают работать с названными фундаментальными силами. Эти силы, открытые за последние три столетия, описываются общими точными уравнениями, и в этом плане вполне понятны и предсказуемы. Фундаментальные уравнения простые, сопровождаются развитой математикой, поэтому из них можно получать много следствий. А так как уравнения совершенно точные, то сколь угодно далекие следствия справедливы. Поэтому техника, основанная на фундаментальных силах, быстро совершенствуется.

Давно идут споры, какие силы важнее изучать? Здесь можно вспомнить старое противостояние Ньютона и Гука. Гук изучал очень актуальные и всюду встречающиеся силы трения и упругости; отсюда известный линейный закон упругости Гука, модули упругости, коэффициенты трения. Ньютон изучал силы небесного тяготения, которые несущественны для практической жизни, но зато являются точными и фундаментальными. Этот спор Ньютона и Гука убедительно разрешен самой жизнью. Работы Ньютона положили начало всему точному естествознанию. А вот в понимании сил трения и упругости мы почти не продвинулись вперед со времени Гука, или даже со времени древнего мира. По выражению Р. Фейнмана, «...коэффициенты трения «стали по стали», «меди по меди» и прочее, – все это сплошное надувательство...», а происхождение сил трения – «вопрос очень запутанный» [42, с. 220].

телей растет в геометрической прогрессии. Может быть, такие фундаментальные закономерности вообще закончились? Может быть, к 10 упомянутым фундаментальным уравнениям, открытым более 100 лет назад, вообще больше не удастся добавить ничего существенного, и нам останется лишь разрабатывать приложения этих законов, лишь технологии на их основе? Остается утешаться тем, что, например, информационные IT – технологии интенсивно изменяют жизнь, хотя и не содержат в себе радикально новых физических принципов. В прошлом очень важные информационные технологии также прогрессировали обычно за счет чисто технических изобретений. Таково книгопечатание Гутенберга (1450 г.). В эпоху точного естествознания изобретения телеграфа Морзе (1837 г.), радиоприемника (1895 г.), разработки транзистора, компьютера, интернета основывались на физических принципах, найденных, например, за 30-60 лет до изобретений.

Но если обсуждаются не глобальные закономерности столетий, а решается конкретная задача, например, почему в данный момент зависла шихта в домне, то полезными оказываются и оценки сил трения и спекания.

Характерная особенность древних ремесел то, что их процессы основываются на нефундаментальных силах, таких как силы трения, слипания, спекания. Эти силы во многом непредсказуемы. Так, движение древнего транспортного средства – волокуши, всецело определялось силами трения, а также силами прилипания к земле того груза, который «волокут». Аналогично силами трения и спекания определяется сход шихты в домне.

В транспорте с изобретением колеса, с переходом от волокуши к телеге, затем к автомобилю и поезду роль сил трения снижается, на первый план выходят фундаментальные точные силы инерции. Для поездов на магнитной подушке и для спутников роль сил трения уже незначительна.

Но доменный процесс в этом плане остался на уровне волокуши. Если металлизуется пылегазовая взвесь в рекуператоре, пылевидные материалы переносятся турбулентными газовыми потоками, то здесь движение материалов становится более похожим на современные технологии, более фундаментальным. Оно сопоставимо уже не с волокушей, а с более современными видами транспорта, например, с газопроводом.

Считается, что управление доменным процессом, его совершенствование – это совсем особая область. Здесь главное – большой опыт, глубокое накопленное знание «повадок» домны, интуиция, «чутье», даже искусство. В подобных случаях говорят о глубоких *тайнствах* древнего ремесла, о его еще не вполне раскрытых секретах. Здесь почти бесполезны знания точных наук. Квалифицированным физико-химикам рекомендуют *не лезть в домну*.

Известны явления, в которых точному естествознанию столетиями не удается заметно продвинуться вперед. Одно из таких явлений – трение. Как уже отмечено, по выражению Р. Фейнмана, коэффициенты трения – «сплошное надувательство». Тем более физику трудно что-нибудь понять в еще более сложном движении материалов в домне, которое определяется силами трения в пересыпающихся, спекающихся, слипающихся, да еще и продуваемых массах. Здесь согласуются мнения крупного физика и доменщиков о том, что с приемами физики и с ее точными уравнениями сюда *лучше не лезть*.

В подобных случаях обычно не удается с позиций физики понять «тайнственные секреты» ремесла. Немало таких секретов вообще утрачено. Например, не удастся сделать некоторые музыкальные инструменты с таким звучанием, как у старых мастеров. Не удастся получить «дамасские» или «булатные» стали, и т. д.

Но совсем не обязательно понимать все «секреты ремесла». В подобных случаях прогресс часто достигается не познанием этих секретов, а пере-

несением процесса в научную область, где этот процесс управляется, определяется уже известными фундаментальными силами и точными уравнениями физики, и поэтому становится простым и ясным. Если мы не умеем предотвращать расстройтва доменной плавки, плохо понимаем «капризы» домны, то из этого совсем не следует, что нужно признать доменный процесс незаменимым, смириться с тем, что он переживет столетия, и т. д.

В нашем случае основные *таинства* доменного процесса отпадут или станут неактуальными в том случае, если оставить в печи одни окатыши и предоставить этой массе возможность свободно, без пересыпаний, опускаться, как в процессе Мидрекс, под действием хорошо известных сил веса и давления дутья. Отпадут зависания и обрушения, перегревы и переохлаждения печи, другие расстройства процесса. Появится возможность в широких пределах регулировать коэффициент недостатка или избытка воздуха, изменять тепловыделение при вдувании угольной пыли. Еще более понятным и определенным, более управляемым станет движение материалов в том случае, если они будут переноситься газовыми потоками в виде пылегазовой взвеси в рекуператоре или в теплообменнике.

В каждой идеологии основные положения принимаются на веру и не подлежат обсуждению, анализу. Такой запрет, «табу» не формулируется, остается не названным, и часто не осознанным, но инстинктивно соблюдается неукоснительно, за счет *внутренней цензуры* исследователей. Иногда коренные, «интимные» понятия идеологии не полагается хотя бы упоминать, их как бы неприлично даже называть.

Насколько нам известно, коренные положения доменной идеологии, ее несообразности, также обсуждаются значительно меньше, чем они того заслуживают. Видимо, поэтому остается неосознанной и возможность более эффективных шахтных процессов, близких к доменному, которые в идейном смысле «расположены рядом» с доменной плавкой.

5.10. Явления, не поддающиеся анализу методами точных наук

Легкость мысли необыкновенная!
Как у Хлестакова.

О. А. Есин

Многие другие явления и кроме обычного трения почти не поддаются анализу методами точных наук. Подобным образом давно и почти безуспешно делаются попытки объяснить – почему лед скользкий? Один из конкурсов научных работ на эту тему привел к важному «побочному» фундаментальному результату, к открытию закона Клаузиуса – Клапейрона для плавления (1851 г. [43]). По этому уравнению определяют, например, давление, необходимое для получения искусственных алмазов. Авторы уравнения пытались объяснить легкое скольжение плавлением

льда, например, под коньками. Это объяснение оказалось неудачным, сам вопрос о причинах аномально легкого скольжения и сейчас остается столь же непонятным, как и упомянутые вопросы о причинах обычного трения. Это еще одно явление, почти не поддающееся анализу методами точного естествознания. Но эмпирический поиск, как в ремесле, так и здесь, постепенно дает результаты: за последние десятилетия разработаны скользкие пластиковые покрытия для прыжков с трамплина летом, для катания на коньках в теплом помещении, и др.

Еще один пример – электризация трением. Древние греки заметили, что янтарная расческа при трении о волосы электризуется и дает характерные искорки. В понимании этого явления мы мало продвинулись со времени древних греков. Но к анализу этого явления возвращались снова и снова, и эти попытки в эпоху точного естествознания, в конце концов, дали важный «побочный результат»: здесь были открыты точные фундаментальные уравнения – законы Кулона, затем Ома, Фарадея и др. В итоге отсюда выросла целая огромная отрасль современной электротехники, радиотехники, электроники. Основная терминология всей этой техники происходит от исходного явления, от электризации янтарной расчески, от греческого названия янтаря – «электрон». Хотя это исходное основное явление мы так и не поняли, но «побочные результаты» изучения этой электризации получились очень внушительные.

Явно существуют процессы и проблемы, в которых точные науки оказываются малополезными или даже беспомощными. За это данные процессы и называют «нефундаментальными», то есть как бы «нехорошими». Те же упомянутые явления трения, электризации или аномально легкого скольжения практически не стали яснее за многие столетия. Видимо, они и останутся непонятными в обозримом будущем. Очень мала вероятность того, что тенденции многих столетий здесь быстро изменятся, и эти явления вдруг станут яснее.

Столь же маловероятно, что точные науки позволят кардинально улучшить элементы доменного процесса, сохраненные от древнего ремесла. Вероятнее возникновение металлургии на новых принципах; в этой будущей металлургии увеличится роль фундаментальных сил и процессов, роль точных закономерностей.

Техника, основанная на фундаментальных точных закономерностях, обычно прогрессирует быстрее, чем техника нефундаментальных процессов. «Нефундаментальная» техника прогрессирует лишь через накопление и обобщение фактов, как и процессы ремесла. Так, электроника прогрессирует быстрее, чем металлургия, компьютеры совершенствуются быстрее, чем домы или ремесло сапожника. При этом прогресс и домен, и ремесла сапожника в последнее время в значительной степени также связан с применением компьютеров или физхимии, и поэтому со-

средотачивается не в принципах процессов, а в периферийных областях. Со временем возрастает «фундаментальная» часть техники и экономики. Прогресс техники часто сопровождается увеличением роли фундаментальных точных сил и «фундаментальных» технологий. Экономисты и бизнесмены давно отмечают разные тенденции старых и новых технологий, старых и новых отраслей промышленности; их акции часто торгуются на разных биржах, описываются разными индексами, например, DJ и NQ в США.

Со временем в нашей жизни все большее место занимают точные науки и соответствующая техника, которой вообще не было 200 лет назад. Понятно, что электротехника и электроника занимают в нашей жизни более важное место, чем электризация трением, из которой эти отрасли начали расти 200 лет назад. При этом возрастание роли точных наук идет не столько за счет освоения наукой старых нефундаментальных явлений, сколько за счет того, что мы сами переходим из области нефундаментальных явлений в область фундаментальных процессов и сил. Нефундаментальные явления мы оставляем или даже забываем о них.

Физики или физхимики, в соответствии с профессией, больше сосредоточены на методах точного естествознания, на фундаментальных явлениях, меньше склонны помнить о нефундаментальных явлениях. Нередко они исходят из того, что все должно анализироваться методами точных наук. В науку, а затем в учебники входят те результаты, которые получились «где достигнут успех». Остаются малоизвестными те же неудачи с попытками объяснить, например, почему лед скользкий или почему идет электризация трением; в учебники не входит то, что «не получилось». Поэтому исследователи точных наук нередко склонны считать, что все нужно объяснить методами точного естествознания. Наоборот, доменщиков их работа вынуждает сосредоточиться на таких явлениях в домне, которые почти не поддаются точным наукам. Это важная причина таких расхождений, как у физхимиков с доменщиками или с представителями ремесла.

Широко известны яркие достижения науки и техники в фундаментальных процессах, и почти неизвестны неудачи науки в непростых (нефундаментальных) явлениях. Наше мышление «переселяется» в фундаментальные, то есть научно освоенные области. Вслед за мышлением мы переносим в эти области и производственные процессы. Обычно, в конечном счете, оказывается легче производство перенести в область, понятную для теории, чем создать хорошую теорию для старого производства. Доменный процесс по ряду позиций еще «не переселен» в новую зону быстрого совершенствования и, видимо, не может быть переселен туда в его современном виде.

Так, древнее оружие стреляло за счет нефундаментальной энергии упругой деформации. Камни катапульт и бомбард метали за счет упругой энергии скрученных жгутов ремней [5], стрелы запускали за счет энергии согнутого деревянного лука. Лук оставался грозным оружием даже в 18-м веке. После изобретения огнестрельного оружия (14 век) постепенно внедрялась стрельба за счет более фундаментальной и более значительной энергии адиабатического расширения пороховых газов.

На минуту представим себе, что принцип огнестрельного оружия так и не был бы открыт, и армии до сих пор стреляли бы из луков. Сейчас такие луки оснащались бы, очевидно, «космическими» упругими материалами, компьютерами, были бы автоматы и пулеметы («стрелометы») с каким-нибудь лазерным наведением и т. д. Доменный процесс нашего времени можно сравнивать с такими воображаемыми луками, которые оснащены многими суперсовременными **наворотами**, но сохраняют ущербный исходный принцип, взятый от древнего ремесла.

5.11. Революции в физике как ломки идеологии

Реформы делают не тогда, когда есть время
и деньги; их делают, когда уже нельзя не делать.

Е. Гайдар

Внедрение почти каждого из 10 упомянутых фундаментальных уравнений (или законов) точного естествознания шло как длительная и трудная ломка идеологии. Такой закон воспринимался сначала как нечто странное, как экзотика, как слишком революционные новации, и, наконец, как некий переворот в данной области.

Так, механике Ньютона потребовалось более 50 лет для того, чтобы она была принята хотя бы научным миром Европы. Даже через 50 лет после основных работ Ньютона Парижская академия наук браковала работы на основе ньютоновской механики. На одном из конкурсов была отклонена работа Эйлера по приливам из-за того, что Эйлер объяснял их на основе ньютоновской механики. Зато вскоре после того, как эта механика была окончательно принята и усвоена общественностью, быстро последовало множество важных механических изобретений. Появилась паровая машина Уатта, затем пароход Фултона (1806), паровоз и др. Менее знамениты, но экономически не менее значимы изобретения прядильной машины и механического ткацкого станка.

Сейчас нам очень трудно восстановить доньютоновское мышление в механике, трудно осознать – что же может быть непонятного в простой формуле $F = ma$? Почему лучшим ученым Европы потребовалось столетия для осознания этой простой механики, которая для нас

давно стала школьной, простейшей, очевидной, *классической*, и которую сейчас изучают в средней или даже в начальной школе?

После появления квантовой теории в начале 20-го века она тоже долго воспринималась как слишком революционная, экзотическая, непонятная, странная, даже как «большевистская физика». В течение первой половины 20-го века множество работ было посвящено тому, чтобы как-то сделать эту новую механику не столь экзотической, менее революционной, более похожей на традиционную механику, или хотя бы ограничить область «экзотики». Эти попытки начал сам Планк сразу после того, как он же вынужден был в 1900 г. впервые ввести понятие кванта с энергией $E = h\nu$, (иначе не удавалось описать спектр черного тела). Лишь через 50 лет с квантовой механикой как-то свыклись, смирились, как-то ее освоили, и тогда последовало множество достижений, в частности, в квантовой электронике, в том числе транзисторы, элементы компьютера, интернет и др.

История внедрения квантовой механики в 20-м веке похожа на историю внедрения механики Ньютона в 18-м веке. Ту и другую историю нередко называют «революцией в физике». При этом мы еще вполне чувствуем «экзотичность» квантовой механики и представляем сложность ломки от классической механики к квантовой. Но мы уже почти не в силах понять – как механика Ньютона тоже могла казаться «экзотической» и психологически неприемлемой в течение половины столетия.

Здесь хорошо проявляются закономерности ломки научной идеологии. Можно ожидать, что аналогично пройдет и ломка идеологии в металлургии, и что вскоре будет трудно понять – как можно было быть уверенным в незаменимости доменного процесса и всего цикла с явными несообразностями. Было бы очень полезно, если бы кто-то, например, убежденный доменщик, уже сейчас дал бы развернутое и подробное изложение своих взглядов, своей доменной идеологии «изнутри» ее, а не извне, не с позиций выявления несообразностей. Позднее сделать это будет труднее.

Переход к квантовой механике также начинался с выявления ряда несообразностей, которые тогда называли «катастрофами классической физики» при описании спектра черного тела, дифракции электронов, их выбивания из металла излучением (фотоэффект). В металлургии подобные несообразности сейчас уже достаточно понятны.

5.12. Нефундаментальные явления сосредоточены в теории твердого тела

Да, идеологии сильны! Вот попробуйте вашей жене привить идею ислама, что вторая жена в доме – это даже престижно для семьи. Глаза выщарапает!

Из дискуссии

Большая группа нефундаментальных явлений, плохо поддающихся анализу, группируется вокруг отличительных свойств кристаллического состояния [19], прочности твердых тел, упругости, сил их трения, спекания, слипания, а также процессов затвердевания.

Интересно в связи с этим, что из обычных молекулярных сил в атомарной компьютерной модели вообще не удастся получить прочность твердого тела. Таким методом молекулярной динамики не удастся получить в модели и затвердевание. «Вещество» в атомарной компьютерной модели при всех температурах вплоть до абсолютного нуля ($T = 0$ К) сохраняет кинетические свойства плотного газа или простой жидкости [19], перегруппировки атомов остаются беспрепятственными ($E = 0$), нет жесткости структуры. Затвердевание удастся получить в модели при определенном введении атомарных квантовых эффектов, при учете квантового «вымораживания» атомарных степеней свободы. При классическом движении атомы практически беспрепятственно ($E = 0$) перегруппировываются, и «вещество» в модели получается легкотекучим. Затвердевание в модели получается, если наложить на движение атомов квантовые запреты. Например, можно принять, что на нулевом энергетическом уровне ($E = 0 \cdot h\nu = 0$) атом вообще *не имеет права двигаться* в силу квантового запрета. Атом может смещаться лишь после того, как он перейдет с нулевого на первый энергетический уровень. В такой модели перегруппировки атомов затрудняются не энергетическими барьерами, но квантовыми запретами. В этом варианте затвердевание в модели предстает в виде перехода или скачка атомарной системы из классической области в квантовую. Затвердевание и прочность кристаллов определяются в этом случае не обычными молекулярными силами, но атомарными квантовыми эффектами.

В этом, видимо, и заключается причина нефундаментальности явлений данной группы, связанных с отличительными свойствами кристаллов, их твердостью, с жесткостью атомарной структуры.

Раньше мы могли только отметить, что в теории данных свойств почему-то столетиями нет реального прогресса. Компьютерное моделирование на атомарном уровне показало, что эти явления принципиально нельзя получить из обычных межатомных взаимодействий при классическом движении атомов. Видимо, они обусловлены качественно иными эффектами, квантовым вырождением атомарной системы, квантовым «вымора-

живанием» атомарных степеней свободы. По мере охлаждения все больше атомов (степеней свободы) переходят на нулевой энергетический уровень ($E = 0 \cdot h\nu = 0$) и движение по ним прекращается.

Раньше казалось вполне понятным, почему кристалл твердый; согласно Я. И. Френкелю, «твердое тело подобно толпе, плотно сжатой в закрытом помещении» [19]. Предполагали, что для вычисления твердости из обычных межатомных сил требуется лишь преодолеть вычислительные сложности. Компьютер преодолел эти сложности, но в результате в модели не только не получилось реальных значений твердости, но не оказалось никакой твердости вообще. Структура оказалась легкотекучей. Теперь ясно, что твердость, прочность и затвердевание – это «нефундаментальные», свойства, непонятные при традиционном подходе.

Спекание также не получается в атомарной компьютерной модели. Два образца, приведенные в соприкосновение, практически мгновенно (за 10^{-9} с) «спекаются» или сливаются в один кусок под действием межатомных сил при любой температуре. Между тем реальное спекание – трудный и длительный процесс, даже при сжатии кусков металла прессом. При реальном спекании атомам металла приходится преодолевать высокие энергетические барьеры E , выявляются высокие энергии активации, например, $E = 30RT$, тогда как в модели спекание идет беспрепятственно ($E = 0$), нет энергетических барьеров, препятствующих процессу. Когда из железного порошка прессуют изделие, то спекание такой прессовки в порошковой металлургии занимает, например, несколько часов при 1000 °С. При низких температурах время спекания больше, и в геологических процессах спекание занимает время геологических эпох, например, миллион лет. За такое время слой песка превращается в камень песчаник, а слой глины – в глинистый сланец.

Честная и последовательная теория здесь должна признать, что мы действительно не понимаем – в чем трудность спекания? Почему атомы соприкасающихся кусков, даже будучи прижатыми друг к другу внешними силами (прессом), **не хотят** образовать химические связи и, тем самым, прочное соединение двух кусков? Ионы разных кусков должны взаимодействовать по закону Кулона еще издали, еще при сближении кусков, на значительных расстояниях между ними. Непонятно, что препятствует возникновению химических связей между контактирующими атомами, которые принадлежат разным кускам, что препятствует спеканию, что создает эти энергетические барьеры $E = 30RT$, которые приходится преодолевать атомам в трудном реальном спекании? Не выдерживают проверки и обычные объяснения трудностей спекания неровностями поверхностей или поверхностными пленками. Выход состоит в том, чтобы признать: спекание, как и другие явления прочности, определяется не обычными притяжениями и отталкиваниями атомов, но качественно иными квантовыми эффектами.

Явно не получится и атомарное компьютерное моделирование трения, так как в модели соприкасающиеся куски мгновенно спекаются или сливаются. В компьютерной модели не получится и аномально легкое скольжение, как у льда. Эти явления также не сводятся к обычным межатомным взаимодействиям.

Обычное заключение по теории таких явлений состоит в том, что процесс очень сложный. В теории доменного процесса также часто можно прочесть, что это очень сложный процесс, что он определяется действием целого ряда взаимосвязанных и взаимообусловленных явлений, что он многофакторный и трудно учесть влияние всех факторов. В этом случае полезно вспомнить, что это характерное заключение по всем нефундаментальным явлениям. Если явление не сводится к понятным фундаментальным простым силам, то не удастся создать и ясной теории. Остается совершенствовать процесс эмпирически, *ощупью*, как ремесло.

5.13. Квазикристаллические свойства жидкости и приемы улучшения металла

Если доменная идеология устоит еще двадцать лет, я потеряю веру в человечество.

Из дискуссии

Отметим, что в молекулярной теории газов и простых перегретых жидкостей не обнаружено нефундаментальных явлений. Насколько нам известно, здесь нет таких явлений, которые не поддаются точным наукам, как трение или электризация. Разреженные газы имеют достаточно точную молекулярную теорию еще с 19-го века, со времени Больцмана, Максвелла и др. Их свойства сводятся к классической механике молекул и их столкновений. Плотные реальные газы и состояния около критической точки описываются такими уравнениями, как формула Ван-дер-Ваальса и последующими усложнениями таких теорий. На основе обычных межатомных взаимодействий, на основе притяжения и отталкивания атомов (или молекул), описываются как термодинамические, так и кинетические свойства таких систем около критической температуры. В этих системах перегруппировки атомов проходят беспрепятственно ($E = 0$), атомарная структура «текучая», нет жесткости структуры.

«Нефундаментальность» начинается в жидкости при значительном охлаждении от критической точки и при значительном повышении вязкости, когда жидкость уже начинает загустевать или как бы «затвердевать», когда появляются заметные энергии активации вязкости, диффузии ($E > RT$), когда появляется жесткость структуры и «зарождаются» свойства твердого тела, квазикристаллические свойства. Здесь начинается расхождение реальных свойств с молекулярной теорией.

Согласно теории, у кристаллов есть комплекс отличительных свойств, которых у жидкости нет в принципе. В число таких свойств входят: прочность; упругость сдвига; способность к хрупкому разрушению; дальний порядок и его скачкообразные изменения – полиморфные превращения; зернистая структура; длительная «память» о внешних воздействиях; «наследственность».

Согласно современной молекулярной теории, эти отличительные свойства кристаллического состояния обусловлены дальним порядком, кристаллической решеткой, и возникают при кристаллизации. У жидкостей, в отсутствие дальнего порядка, такие свойства невозможны в принципе. Такие свойства невозможно получить в компьютерной модели жидкости с обычными взаимодействиями атомов. Однако каждое из перечисленных свойств в той или иной форме находили экспериментально у жидкостей [19]. По каждому свойству проходили длительные дискуссии. Такие «квазикристаллические» свойства металлургических расплавов регулярно **открывают** экспериментаторы и столь же регулярно **закрывают** теоретики.

В данный вопрос упирается в конечном счете, теория многих широко применяемых приемов улучшения качества жидкого металла. Таковы, в частности, воздействие ультразвуком, инфразвуком, потоковая обработка, использование «наследственности и памяти» расплава. Если последовательно, **честно** разбирать эти явления с позиций современной молекулярной теории жидкости, то получится вполне очевидный вывод: этих явлений не должно быть, эти приемы металлургов не должны работать. Между тем это реальные и эффективные производственные процессы улучшения металла.

Так, максвелловское время релаксации структуры жидкости составляет для жидкого металла примерно 10^{-10} с:

$$\tau = G/\eta,$$

где G – модуль сдвига; η – вязкость.

По теории расплав должен очень быстро (за 10^{-10} с) «забывать» о любых внешних воздействиях. Между тем реальная жидкая сталь долго «помнит» о воздействии ультразвука и при кристаллизации после такого воздействия дает слиток с измельченным зерном. Жидкая сталь «помнит», также свою «наследственность», например, то, что она получена плавлением крупнозернистого слитка; при обратной кристаллизации такая сталь снова дает крупнозернистую структуру.

Эти вопросы здесь излагаются по материалам предыдущей книги [19], которая также посвящена «несообразностям» и ломке идеологии, но не в металлургическом цикле, а в кинетической атомарной теории затвердевания и прочности.

Ожесточенные споры по подобным свойствам расплавов то затихают, то вновь обостряются уже в течение примерно 100 лет, со времен Таммана [13] и Швидковского [19], без существенного продвижения вперед. Отметим для сравнения, что радиотехника и электроника за эти же 100 лет прошли весь свой путь развития. Радиотехника – от первого радиоприемника Попова, а электроника – от исходного открытия электрона, до мощных современных электронных средств связи, развитых информационных технологий, до всемирной системы Интернета и др. Мощность компьютеров возрастает, например, в 10 раз каждые 10 лет. В этом сопоставлении электроники и металлургии наглядно видна разница между отраслью, изначально основанной на современной научной идеологии, на фундаментальных явлениях, и металлургией с ее законсервированными особенностями древнего ремесла, с застаревшими идеологическими табу.

5.14. Термовременная обработка стали (ТВО)

Мужик – что бык. Втемяшится в башку какая блажь,
колом ее оттудова не выбьешь. Упираются, всяк на своем стоит.
Н. А. Некрасов

Рассмотрим подробнее дискуссии теоретиков и экспериментаторов по одному из приемов воздействия на жидкий металл – по термовременной обработке (ТВО) жидкой стали, которая часто позволяет получить мелкозернистые слитки с повышенными механическими свойствами [19].

Еще в 1960-е годы появился цикл работ по расслоению двойных расплавов при центрифугировании, начиная с работы А. М. Самарина и А. А. Вертмана [30]. Сейчас уже многократно показано, что раствор свинца и олова «расслаивается» в вертикальной трубке и без центрифугирования. В нижней части трубки со временем нарастает доля тяжелого свинца, в верхней – доля легкого олова.

Эти эксперименты привели к выводу о существовании в однофазных бинарных расплавах достаточно крупных кластеров чистых компонентов, например, кластеров свинца и олова в их растворе, углерода в чугунах. Такой вывод резко противоречит обычной физической теории растворов. Затем было показано, что в жидкой стали около 1650 °С подобные кластеры или зерна исчезают, здесь происходит что-то наподобие полиморфного превращения, или фазового перехода в жидком металле. При перегреве выше 1650 °С жидкая сталь «теряет память» о предыдущих воздействиях на нее и «теряет наследственность». Около 1650 °С был зафиксирован скачок вязкости жидкого металла (по другим данным – излом политепмы или аномалия вязкости). Дифракционные исследования показали, что око-

ло этой температуры резко изменяется атомарная структура жидкого металла [29]. Полиморфные превращения в кристаллах как раз и выявляют по скачку физических свойств и структуры при определенной температуре

Позднее на подобных представлениях была основана Термовременная Обработка (ТВО) жидкой стали – перегрев ее выше 1650 °С [29]. Такая обработка позволяла получить мелкозернистую структуру слитка и улучшенные механические свойства стали.

Однако уже в 1960-е годы ряд известных физиков выступили против таких представлений, считая их противоречащими молекулярной теории. По теории полиморфные превращения – это скачкообразные изменения типа дальнего порядка; так как в жидкости нет дальнего порядка, то не может быть и полиморфных превращений. Еще более интенсивная волна критики металлургических представлений и приемов со стороны физики поднялась в 1980-х годах. В 1985 г. журнал «Известия вузов. Черная металлургия» провел широкую дискуссию о возможности подобных превращений в жидкой стали при температуре $T \approx 1650$ °С. Физики «переспорили», продемонстрировали лучшее знание молекулярной теории, уличили металлургов в недостаточной физической грамотности, и дискуссия завершилась как бы опровержением представлений металлургов [28]. Под давлением таких дискуссий даже большинство экспериментаторов пришли к выводу, что при соответствующей постановке экспериментов не получаются особенности на поллитерах вязкости и плотности стали [28, табл. 29].

Из публикаций многих металлургов на 10-15 лет исчезли описанные представления, как бы не соответствующие молекулярной теории. Однако постепенно они возродились снова. Термовременная обработка металла (ТВО) применяется сейчас на десятках заводов. Как это часто бывает в идеологических спорах, дискуссии мало помогают прояснению вопроса [12, 19].

Вмешательство физиков в эти металлургические представления выглядело примерно так же, как если бы они попытались учить сапожников, или если бы физхимик попытался учить доменщиков бороться с расстройствами хода печи. С равным успехом физик мог бы выдвинуть еще одну теорию о том, почему лед скользкий, в чем затруднения спекания, отчего идет электризация и др. Здесь явно нефундаментальные явления, которые столетиями не поддаются современному анализу точной науки. В компьютерной модели при обычных межатомных взаимодействиях для таких явлений получаются результаты, противоречащие опыту. Например, в модели вообще нет затвердевания и соответствующего нарастания вязкости при охлаждении.

5.15. Различия в мышлении физхимика и доменщика

- Физхимики – бумажные металлурги.
Видели домну только на картинке
- Доменщики мыслят чугунами чушками и болванками. Бесплезно толковать с ними об атомах.

Из дискуссии

В курсе «Теории металлургических процессов» рассматриваются те вопросы металлургии, которые поддаются анализу методами точных наук, методами физхимии. К сожалению, часто это периферийные вопросы металлургии, поэтому теория в какой-то мере также приобретает периферийный характер. Часто здесь просто переносятся на металлургические реакции и реагенты те методы изучения, которые сложились в физике и химии. Центральные вопросы, в том числе выбор принципа, схемы процесса, решаются на основе древних традиций, или обусловлены нефундаментальными процессами, которые не поддаются теории. Успех каждого нового процесса получения металлов обычно определяется тем, насколько хорош тепловой баланс, обеспечено ли обилие недорогого тепла. При достаточном нагреве реакции обычно успевают пройти, поэтому работы физхимиков часто не очень популярны у металлургов-практиков. Сохраняется разрыв между «духом» металлургии, ее идеологией и физико-химическим анализом процессов.

Поэтому у доменщиков часто остаются неосознанными такие важные вопросы, как огромные потери тепла вследствие неполного горения топлива. С другой стороны, для физхимика вполне очевиден, но мало интересен тот факт, что на первой стадии горения углерод дает лишь 28 % тепла, и что можно получить все тепло, если дожигать газы в окислительной зоне. Это далеко от переднего края науки, где физхимик может проявить высокую профессиональную квалификацию. Доменщики почему-то не используют эти явные возможности, но для выяснения причин этого надо разбираться в истории, идеологии, психологии исследований, в поверьях доменщиков, то есть отойти от чистой физхимии.

Обычно исходят из того, что современный цикл не подлежит сомнению; цикл в целом не анализируется. Ни список специальностей вузов, ни список специальностей ученых степеней не предусматривают специалистов для анализа цикла в целом или анализа схемы процесса. Наши специальности привязаны к отдельным стадиям существующего цикла и закрепляют его структуру. Существующая теория металлургических процессов также занимается физхимией отдельных взятых реакций, не занимается анализом процесса или цикла в целом.

Многие улучшения процесса, простые и очевидные с точки зрения физхимии, остаются не только не реализованными, но и неосознанными в практической работе.

В доменщиках в большой степени воплощается практический опыт и традиционный дух металлургии, в том числе дух старой металлургии с ее элементами, заимствованными у древнего ремесла. Поэтому на взаимоотношениях физхимиков и доменщиков видны отношения традиционного духа металлургии, доменной идеологии с точным естествознанием. Эти отношения отнюдь не являются вполне гармоничными.

Способы мышления физхимика и доменщика обычно остаются весьма различными. Часто не удается наладить их совместную работу, даже если оба они являются сотрудниками одного исследовательского института. Дискуссия физхимика и доменщика часто «не получается, закичивается», как и многие другие идеологические диспуты.

Существует официальная установка на взаимообогащение металлургической практики и точного естествознания, на преодоление различий мышления физхимиков и доменщиков. В принципе все согласны с тем, что теория и практика доменщиков должны обогащаться выводами физхимии. Проводятся совместные конференции физхимиков и доменщиков. Однако совместным оказывается обычно лишь общее организационное собрание конференции; предоставленные сами себе, участники тут же расходятся на секции по интересам, после чего почти нет общения физхимиков с доменщиками.

В работах и книгах доменщиков часто большое место занимают физико-химические разделы, а приемы устранения расстройств доменной плавки могут иметь физико-химические обоснования. Но часто это оказывается просто данью моде, данью официальной установке на научную металлургию, своего рода украшением книги, *бантиком на шляпке*. Самыми значимыми для авторов часто представляются разделы по расстройствам процесса и сами приемы устранения расстройств. Именно на этих разделах обычно основываются реальные результаты работы, заводские внедрения и доходы исследователей.

Будет естественно, если новую схему процесса предложит специалист теории металлургических процессов, то есть физхимик. Однако в предложениях физхимиков нередко встречаются досадные «ляпсусы» из-за недостаточного знания технических сложностей и опасностей реальных процессов. Часто такие «ляпсусы» удается устранить при последующей доработке предложений, но для этого весьма желательна совместная работа с доменщиками, которую, к сожалению, часто не удается отладить.

Конечно, нелепо было бы выяснять: кто лучше, физхимики или доменщики? Та и другая идеология имеют свои истоки, свои основания и свою сферу применения. Важно лишь поточнее определить эти сферы и не

пытаться с позиций данной идеологии решать вопросы за пределами ее применимости.

Так, если обсуждаются расстройства хода доменной печи, их опасности, способы предупреждения и устранения этих расстройств, то мнение физхимиков часто можно не учитывать. Если же нужно быстро термодинамически обсчитать многие схемы получения металла, оценить их тепловой баланс по разумной методике и, соответственно, экономичность, то такую работу целесообразно поручить именно физхимику.

5.16. Особенности идеологических дискуссий

Человеческое, слишком человеческое
Ф. Ницше

В настоящее время вырос интерес исследователей к закономерностям эволюции идеологий, к процессам ломки идеологии. Выясняется, что эти закономерности близки для разных идеологий, как в научно-технической сфере, так и религиозной, социально-политической области и др. Кризисы, революции разных идеологий проявляют общие закономерности; сейчас эти закономерности привлекают повышенное внимание философов и социологов и интенсивно изучаются [12]. В России такой интерес социологов резко вырос во время глубокой и драматической ломки социальной идеологии в конце 20-го века. Дискуссии по несообразностям металлургического цикла, которые закреплены идеологией, также могут дать очень интересный и обильный материал по психологии такой ломки.

Естественно, в литературе очень подробно рассмотрены ломки или кризисы социальной идеологии, которые наглядно проявляются бурными социальными революциями. Много написано также о ломке религиозной идеологии. Из кризисов научно-технической идеологии особенно подробно исследованы психологические трудности «революции в физике» начала 20-го века, когда прошла ломку идеология классической (ньютоновской) механики. Эта идеология господствовала в физике примерно 200 лет и прошла быструю ломку, «революцию» около 1900 г., но «попытки контрреволюционных переворотов» в этой области продолжались половину столетия, и их рецидивы проявляются иногда и сейчас. Об этой «революции в физике» ряд книг написан виднейшими физиками. Не столь масштабные кризисы в более узких областях науки и техники часто остаются малоизвестными, но психологически они подобны широко известным глобальным кризисам.

Выявление и устранение идеологических пристрастий, предрассудков, несообразностей из каждой системы взглядов А. И. Солженицын называл «изгнанием демонов».

Если дискутируют представители разных идеологий, дискуссия приобретает особый характер; идеологические дискуссии резко отличаются от обычных деловых рабочих обсуждений. Диспуты представителей разных религий в прошлом часто заканчивались тем, что один из участников добивался казни своего оппонента (так были заживо сожжены после диспутов Ян Гус в Чехии, Джордано Бруно в Италии, протопоп Аввакум в России и др.). Если начинается дискуссия болельщиков соперничающих футбольных команд, то она чаще заканчивается дракой, а не уяснением истины. Представители враждующих научных идеологий, к счастью, обычно не имеют возможности физического подавления идеологических противников. Когда такие возможности все же появляются, могут пойти кампании типа «лысенковщины» в СССР.

При обычном наблюдении дискуссии доменщика и физхимика видно, что по мере обсуждения нарастает их взаимное раздражение и непонимание. Диалог напоминает религиозные дискуссии прошлого.

5.17. Формирование идеологии, ее устойчивость

И твердо верю я, товарищ Сталин,
что как бы тяжело не было здесь мне,
но будет много чугуна и стали
на душу населения в стране.

В. Высоцкий, песня зэка

Каждое научное положение после достаточно большого числа повторений представляется уже *самоочевидным, тривиальным, само собой разумеющимся*, и больше не повторяется вслух, но подразумевается. Говорят, что это *давно всем известно*, повторять это нет смысла, и даже не солидно. Такое неназываемое положение со временем переходит в более глубокие области памяти, затем в область бессознательного, и потом его бывает нелегко вспомнить. Подобные положения входят в идеологию, в *коллективное бессознательное*. Иногда эти положения приходится с трудом припоминать, когда ставится задача компьютеру, у которого нет *бессознательного*, есть лишь сознательная программа. Так, в первых программах для игры в шахматы компьютер иногда пытался обойти противника через поля вне доски. В правилах для людей никто не пишет, что за пределы доски выходить нельзя, это *и так всем понятно*, но для компьютера это надо припоминать и точно формулировать.

Физики целое 18-е столетие работали в основном с парными центральными силами взаимодействий – с силами тяготения Ньютона и с электростатическими силами Кулона. Незаметно сложилось представление, что фундаментальные взаимодействия всегда парные центральные.

Поэтому, когда Савар открыл взаимодействия тока с магнитом (1820 г.) и эти силы оказались нецентральными, поворачивающими, наступило *длительное трудное недоумение* [41].

Отметим, что межатомные взаимодействия и сейчас по традиции обычно представляются именно парными и центральными; сейчас выясняется, что в атомарной компьютерной модели при таких взаимодействиях нет прочности и затвердевания, в модели невозможны все «нефундаментальные» свойства. Эти результаты также ведут к «длительному недоумению».

Когда спорят сторонники разных идеологий, бывает нелегко выяснить суть спора, потому что расхождения оппонентов лежат в бессознательном. На поверхности бывает видно лишь взаимное раздражение.

Обычно человек не чувствует своей идеологии и считает, что он мыслит вполне свободно, но на самом деле его мышление движется лишь в рамках идеологических установок, которые лежат в области бессознательного. Эти неосознанные идеологические рамки мы начинаем чувствовать обычно лишь при столкновении с человеком иной идеологии, причем после того, как пройдет отмеченное *длительное трудное недоумение* [41]. Мы не сознаем того, что мы мыслим в рамках определенной идеологии. Ситуация соответствует известному афоризму: рыбы не знают, что они живут в воде, они начинают понимать это лишь после того, как их вытаскают на берег.

На научных конференциях или семинарах часто приходится видеть, что дискуссия *не получается*, если у собеседников различны идеологии. Иногда дискуссия сразу же принимает ожесточенный характер, *заикливается* на первых же вступительных положениях. Участники чувствуют взаимную нарастающую враждебность, причем каждому его правота настолько очевидна, что даже непонятно – да о чем же тут можно серьезно дискутировать?! Остается непонятой исходная причина расхождений.

Причина этого именно в том, что многие установки идеологии – это *коллективное бессознательное*. Поэтому бывает нелегко понять и четко сформулировать, в чем же именно расходятся сторонники разных идеологий. Главная трудность (почти по Фрейду) как раз и состоит в том, чтобы перевести установки участников из бессознательного в сознание. Трудно осознать истоки расхождений, кроющиеся в бессознательном, трудно *поставить* вопрос, выяснить, что именно раздражает участников? О чем же все-таки реально здесь идет спор? Много времени тратится на то, чтобы правильно поставить вопрос, а его решение достигается уже сравнительно быстро. Ситуация соответствует известному высказыванию: «мы все ищем правильный ответ, но не находим нужного вопроса». Если удастся понять, в чем вопрос, о чем же здесь все-таки идет спор, каковы его исто-

ки, то разрешить спор оказывается уже сравнительно легко. Здесь хорошо поставленный вопрос содержит в себе уже часть ответа.

Много обсуждалась упоминавшаяся *поразительная слепота* по отношению к фактам, которые противоречат господствующей социальной идеологии [12, 19]. Такие факты часто просто не проникают в сознание, остаются неосознанными, *попадают в уши, но не проникают дальше*. С этим столкнулся, например, Солженицын А. И., когда он и его единомышленники в 70-е годы указывали на несообразности советской идеологии, высказывали положения, противоречащие идеологии того времени. Затем наступило время *ломки идеологии*, когда такие положения стали широко востребованы, быстро приобретали все новых и новых сторонников. Книги Солженицына бурно издавались Самиздатом и жадно прочитывались, несмотря на официальные запреты. Сейчас подобные положения настолько усвоены, поняты, выглядят настолько очевидными, что они даже неинтересны. Спрос на такие книги сейчас невелик, и они нередко образуют нераскупленные завалы в книжных магазинах.

Можно ожидать, что и наша доменная идеология также скоро пройдет ломку, в чем-то похожую на недавнюю драматическую ломку социальной идеологии в России.

После ломки идеологии многие говорят, что «я всегда это знал». Так, сейчас многие уверены, что они и во времена СССР понимали несообразности советской идеологии. Но анализ действий и высказываний ясно показывает, что до ломки подавляющее большинство действовало и высказывалось в духе старой идеологии, а после ломки – в духе новой идеологии. «Знание» нового до ломки, если и существует, то лишь в виде неких *смутных ощущений, неясных предчувствий*. Реальное ясное знание, которое прямо ведет уже к соответствующим действиям, наступает лишь в результате большой психологической работы, после длительной и трудной ломки идеологии. Осознание несообразностей металлургического цикла сейчас также обычно не идет дальше *смутных ощущений* и далеко не достигает той степени ясности, при которой становятся возможны уже конкретные решения и действия по устранению пороков.

Идеологии (как и религии) устойчивы и могут сохраняться столетиями, даже тысячелетиями. Идеология играет роль стержня, на который нанизываются фактические знания человека. Если идеология разрушается, то знания рассыпаются в бесформенную кучу, наступает резкий психологический дискомфорт. Поэтому появляются интенсивные эмоции, человек готов бороться за сохранение своей идеологии, *за идею*, нередко даже вопреки своим другим вполне реальным интересам. Идеология дорога человеку, и обычно он отнюдь не склонен согласиться с тем, чтобы ее ломали.

Человек обычно не соглашается просто отказаться от своей идеологии, сколько бы веских доводов ему не приводили. Но иногда он

соглашается, преодолевая большие психологические сложности, сменить одну идеологию на другую или одну религию на другую. При большой необходимости и при значительных усилиях, рассыпавшуюся систему знаний удастся перестроить в другую систему. Удастся нанизать свои знания на другой стержень, перейти к другой идеологии.

Влияния научно-технической и социальной идеологии могут сочетаться. Так, основные труды классиков марксизма создавались в эпоху бурного роста металлургии во второй половине 19-го века, и данные о производстве металла часто были в этих трудах основным показателем развития страны. В связи с этим в СССР стройки металлургических заводов пользовались особым вниманием. Вплоть до распада СССР основными показателями пятилетних планов было производство чугуна и стали, хотя передовые страны уже вступали в эпоху постиндустриального информационного общества, а металлургические производства переносили в страны третьего мира. Здесь также видно влияние идеологии на металлургию – в данном случае уже влияние социальной идеологии.

Идеология металлургии намного старше мировых религий и устоялась, затвердела не менее религий. Для металлурга, который всю жизнь мыслил традиционно, смена идеологии не менее трудна, чем смена религии для глубоко верующего человека.

Для идеологий характерно длительное пребывание в почти неизменном состоянии, а затем быстрое крушение, резкая ломка, когда накопится критическая масса противостоящих идей и фактов.

Если положения данной книги оформить в виде нескольких патентов, то они почти наверняка окажутся «заживо погребенными» в огромном массиве нереализованных патентов по прямому получению железа. Можно надеяться на лучший результат, если разобраться с идеологическими и психологическими основами вопроса.

Сейчас осознание несообразностей цикла стало настолько ясным, что длительное сохранение этих несообразностей представляется уже невероятным или маловероятным. В прошлом несообразности разных концепций не сохранялись надолго после того, как их удавалось вполне ясно понять.

5.18. Выводы к главе 5

Правда, в это верил весь мир.

Но мало ли во что верил весь мир!

Ф. Ницше

Новые технологии обычно основываются на фундаментальных физических силах, которые описываются точными общими уравнениями. Такие технологии быстро совершенствуются. Процессы ремесла часто базируются на не фундаментальных силах и эффектах, которые почти не поддаются описанию методами точного естествознания. Сход материалов в домне определяется силами трения в пересыпающихся, спекающихся и слипающихся массах. Такое движение принципиально неустойчиво, идет как чередование зависаний и обрушений шихты. Отсюда опасо-капризный характер процесса, плохая управляемость и столетиями сохраняющиеся несообразности, *таинства и секреты* ремесла, которые остаются не до конца понятыми. В таких случаях прогресс достигается перенесением процесса в научную область, где он определяется фундаментальными физическими силами и, соответственно, описывается точными уравнениями. Однако такой переход требует трудной ломки идеологии.

Рассмотрены известные процессы такой ломки идеологии в прошлом. Сознание несообразностей металлургии сейчас достигло такой степени ясности, при которой несообразности уже не могут долго сохраняться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ну, дорогие товарищи, глупости ведь делаем!

Ну, давайте сознаемся в этом и исправимся!

Из дискуссии

Доменный процесс и, соответственно, металлургический цикл имеют ряд врожденных пороков или несообразностей, унаследованных от древнего ремесла металлургов. Причина несообразностей – совместная продувка кусков руды и топлива, которая практикуется с эпохи зарождения металлургии, «от сотворения мира». Некоторые несообразности обсуждали Д. И. Менделеев, основоположник русского металловедения Д. К. Чернов, из современников – В. Б. Алесковский, американец С. Смит и другие. Сейчас достигнуто уже столь ясное понимание несообразностей, они настолько понятны, что вполне назрело их устранение, ломка господствующей доменной идеологии и соответствующее изменение способов получения металла.

Несообразности радикально устраняются, если перейти к схеме металлизации пылегазовой взвеси концентрата и угольной пыли в рекуператоре. При этом полностью устраняется окускование рудной компоненты и топлива, стоимость которого составляет около половины всей стоимости чугуна.

При плавлении полученного металлизированного порошка на кладке или засыпке огнеупоров весь процесс идет за счет дешевого рекуператорного тепла. Если плавление выполняется за счет сжигания угольной пыли, то в дальнейшем это топливо экономится на химической утилизации энергии отходящих газов. Расчетный расход угольной пыли будет близок к «идеальной» величине 285 кг/т, причем почти половина этого топлива может быть не металлургическим, а более дешевым энергетическим топливом, которое идет на отопление рекуператора. В доменной печи используется дорогой кокс, причем он сжигается не полностью, в основном до СО, поэтому печь получает в 2-3 раза меньше тепла. В целом тепло горения топлива обходится в домне примерно в 10 раз дороже, чем тепло горения в рекуператоре или в паровом котле.

Движение шихты в домне принципиально неустойчиво, сопровождается зависаниями и обрушениями и многочисленными расстройками хода печи. Процесс плохо управляется; чтобы запустить остановленную домну, требуется до месяца кропотливого регулирования. Движение пылегазовой взвеси в потоках газа определяется простыми хорошо известными силами и хорошо регулируется. Можно в разных точках добавлять пылевидные реагенты, аппаратами Циклон отделять газы. Можно выбирать из нескольких вариантов процесса.

Можно организовать глубокое восстановление и получать из богатого концентрата порошок железа, пригодный для порошковой металлургии.

В доменной печи неизбежно переуглероживание металла, получение чугуна, поэтому необходим еще дорогой сталеплавильный передел. В предлагаемой схеме целесообразно выполнять плавление металлизированного материала на почти безуглеродистое железо в атмосфере, восстановительной по отношению к железу, но окислительной к углероду. Расплав безуглеродистого железа превращается в сталь простой добавкой углерода в горне-отстойнике, или даже в ковше.

Основные несообразности металлургического цикла можно в основном устранить и в рамках шахтной плавки, если оставить в шахте печи лишь окатыши, а все топливо вводить в виде угольной пыли с дутьем. В такой схеме «Угольный Мидрекс» часть шихты – окатыши – остается окускованной, и часть утилизации энергии отходящих газов выполняется на противотоке шихты и газов, как и в домне. Газы можно дожигать в верхней части печи, в окислительной зоне. Процесс получается «наполовину пылегазовым». Здесь также целесообразно первичное расплавление металлизированной массы на безуглеродистое железо и затем превращение его в сталь добавкой углерода, без дополнительного сталеплавильного передела.

В этом варианте плавки можно предоставить спекающейся массе металлизированных окатышей опускаться без пересыпаний как единое целое до пода печи, примерно как в агрегате Мидрекс. Это позволит избавиться от лавирования между зависаниями и обрушениями шихты, между опасными перегревами и переохлаждениями горна, сделать сход шихты более ровным.

Почти все предлагаемые новые элементы процесса можно последовательно вводить в существующих доменных печах. Такие нововведения удобно делать во время капитального ремонта печи, когда обычно вносятся существенные изменения в ее конструкцию, профиль и др. В пределе доменная печь может превратиться в агрегат с металлизацией пылегазовой взвеси в рекуператорах и с химической утилизацией энергии газов в основном корпусе. В другом варианте домна после ряда нововведений превращается в «Угольный Мидрекс». Сравнительно легко можно ввести вдувание в домну порошка железорудного концентрата; в простейшем случае для этого достаточно установить загрузочное устройство, всыпающее концентрат в поток воздуха перед воздуходувкой.

Проблема полного горения топлива остается главной и при отоплении металлургической ванны с расплавами. Сейчас практически нет эффективных способов обеспечения теплом сталеплавильной ванны за счет горения топлива. Конвертер отапливается за счет горения железа и легирующих примесей металла, электропечь – за счет дорогой электроэнергии. И в кислородном конвертере, и в электропечи тепло выделяется в неболь-

шой и очень горячей зоне, что приводит к значительному испарению металла. Плавка в этих агрегатах скоротечна. Процессы глубокого рафинирования стали, необходимые для получения высококачественного металла, сейчас обычно не практикуются на рядовом металле, так как эти процессы требуют проведения ряда длительных операций.

Топливо можно сжигать полностью, до CO_2 , если организовать в ванне окислительную зону. Целесообразен топливный факел, который «не пробивает шлак», так что газы горения не контактируют с жидким металлом. При полном горении возможны не только длительные процессы глубокого рафинирования стали, но возможно и экономичное получение металла из руды в ванне с расплавами. Расчетный расход топлива получается 330-460 кг/т. В таких современных агрегатах типа Ромелт не удастся обеспечить полное горение топлива с усвоением тепла, и расход топлива составляет 800-1000 кг/т и больше.

Если полностью устранена несообразность № 1, обеспечено полное горение топлива, то в принципе можно в таком агрегате восстановить углеродом из окислов любой металл таблицы Менделеева, или восстановить все металлы, содержащиеся в горных породах.

Процессы по предлагаемым новым схемам позволят получать рядовую сталь в 2-3 раза дешевле, чем сейчас. Фирма, которая отладила бы новый процесс, а затем проконтролировала его распространение, смогла бы получить прибыль, соответствующую огромным масштабам мировой металлургии.

Расчеты теплового баланса, расхода топлива, теоретической температуры горения

Если предлагаемый процесс не связан с чрезмерными техническими сложностями, то часто решающим фактором для его успеха является хороший тепловой баланс, обилие недорогого тепла в агрегате, не слишком большой расход топлива и, соответственно, высокая производительность. Многие предлагавшиеся ранее изобретения были обречены с самого начала на неудачу из-за недостатка тепла.

Практически из-за недостатка тепла потерпел неудачу, например, процесс В. П. Ремина – получение стали из руды в электропечи при «глетчерной» плавке. Если в шлаке окислы железа реагируют с кусками угля или с угольной пылью, то могут бурно развиваться процессы прямого восстановления, поглощающие тепло и выделяющие газ; шлак охлаждается эндотермической реакцией, густеет, пузырьки газа не успевают его покидать, наступает аварийное вспенивание шлака. Так заканчивались многие плавки В. П. Ремина.

Если анализируется ряд физико-химических схем процессов, их варианты, то очень важно иметь быстрый способ оценки теплового баланса, расхода топлива по данной схеме или теоретической температуры горения. Часто важно не столько получить точные значения расхода топлива, сколько соотношение этих величин в разных вариантах процесса. В обычных способах подобных расчетов часто содержится много допущений; расчет становится громоздким, и часто предпочитают обойтись вообще без расчета. В других случаях расчет выполняется формально по какой-то компьютерной программе, которая действует как не очень понятный черный ящик, преобразующий одни данные в другие. Физическая суть результатов остается не вполне ясной.

Часто требуется собрать много данных и потратить много времени, чтобы учесть температурную зависимость теплоемкостей, выполнить интегрирование соответствующих уравнений.

Мы для быстрых оценок принимали теплоемкости C , взятые на грамм-атом вещества, равными классической величине $C=3R$ в соответствии с правилом Дюлонга-Пти, а также в соответствии с теорией теплоемкостей Эйнштейна-Дебая:

$$C = 3R = 3 \cdot 8,31 = 25 \text{ Дж/г-ат-град} = 6 \text{ кал/г-ат-град},$$

где R – газовая постоянная.

В действительности теплоемкость легких элементов (H , C и др.) при низких температурах меньше этой величины, особенно если эти атомы входят в состав молекул. Теплоемкости тяжелых веществ при высоких температурах больше $3R$, особенно в расплавах. Однако соответствующие ошибки не очень велики.

Если теплоемкость равна $3R$, то физическое тепло нагревания вещества от 0°C до температуры T будет равно $N \cdot 3RT$, где N – число грамм-атомов. Полное теплосодержание H вещества (сумму химического и физического тепла) можно записать в виде $H = H_{298} + N \cdot 3RT$, а тепловой баланс процесса выразится уравнением

$$\Sigma H_{\text{пр}} = \Sigma H_{\text{исх}}, \text{ где } H = H_{298} + N \cdot 3RT. \quad (\text{П. 1})$$

Эта формула теплового баланса процесса позволяет быстро, «в одно действие» рассчитать расход топлива на получение металла в данном агрегате, теоретическую температуру горения и др. Стандартное теплосодержание продуктов процесса и исходных веществ H_{298} можно взять из термодинамических таблиц.

В металлургическом процессе бывает полезно выделить реакцию восстановления металла, которая поглощает тепло, и реакцию горения топлива, выделяющую тепло. Для каждой реакции физическое тепло $Q_{\text{и}}$, поступающее с исходными веществами процесса, выразится суммой $3R \cdot \Sigma N_{\text{и}} T_{\text{и}}$, а физическое тепло $Q_{\text{п}}$, уносимое продуктами процесса – $3R \Sigma N_{\text{п}} T_{\text{п}}$, где $N_{\text{и}}$, $N_{\text{п}}$ – количества грамм-молей исходных веществ и продуктов реакции; $T_{\text{и}}$, $T_{\text{п}}$ – их температуры, К. Суммарное тепло реакции выразится формулой:

$$Q = \Delta H_{298} + Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}} = \Delta H_{298} + 3R \cdot \Sigma N_{\text{и}} T_{\text{и}} - 3R \cdot \Sigma N_{\text{п}} T_{\text{п}}, \quad (\text{П. 2})$$

где ΔH_{298} – стандартная теплота реакции по данным термодинамических таблиц, Дж/моль.

Во всех металлургических агрегатах идут реакции в тройной системе: железо – углерод – кислород. Происходят реакции восстановления окислов углеродом с поглощением тепла и реакции горения углерода в кислороде дутья, которые обеспечивают агрегат теплом. Рудная компонента, кислород и топливо обычно поступают в агрегат холодными, и не вносят тепло, доменное дутье имеет температуру воздуха порядка $T_{\text{д}} = 1200^\circ\text{C}$ и вносит много тепла. Металл и шлак покидают агрегат при высокой температуре $T_{\text{м}}$. Отходящие газы покидают дому с температурой $T_{\text{о}}$ порядка 200°C , а из ванны сталеплавильного агрегата они уходят с высокой температурой, например, $T_{\text{о}} = 1500^\circ\text{C}$.

Хотя такие расчеты очень приблизительны, полученные цифры могут все же служить определенным ориентиром, особенно в том случае, ко-

гда обсуждается не абсолютная величина расхода топлива, а относительная эффективность разных схем процесса.

Термодинамические данные разных источников несколько расходятся и, соответственно, приводят к несколько отличающимся конечным результатам. Результаты несколько изменяются также в зависимости от принятых способов округления чисел. Здесь также нет необходимости в тщательном выборе термодинамических данных и в высокой точности вычислений; в основном обсуждаются качественные зависимости и оценки.

Тепловой баланс в нашей схеме определяется температурами исходных веществ и продуктов плавки T_0 , T_M , T_D , а также долей полного горения углерода, то есть долей CO_2 в суммарном объеме газообразных продуктов горения $\text{CO} + \text{CO}_2$.

Например, в доменной печи металл (железо) получается по реакциям типа $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} = 3\text{Fe} + 4\text{CO}$, а необходимое тепло обеспечивается реакциями горения углерода типа $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$ и $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ в газообразном кислороде вдуваемого воздуха. Воздух дутья содержит 21 % кислорода и в 3,76 раз больше азота N_2 (79 %). Воздух **в реакциях** можно записывать формулой $(\text{O}_2 + 3,76 \text{N}_2)$. Итоговое тепло Q каждой реакции вычисляется по формуле (П. 2).

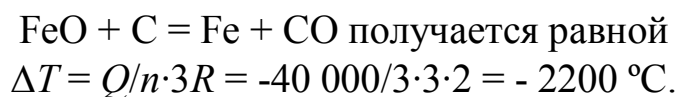
Практически расчет ведется здесь для химической реакции чистых веществ, например, чистого окисла железа с чистым углеродом и при получении чистого железа; предполагается, что необходимое для реакции тепло дает горение углерода в чистом кислороде или в воздухе. Не учитываются потери тепла на переплавку пустой породы, на потери через стенки агрегата, и др. Поэтому полученный этим способом расчетный расход углерода можно понимать как минимальный расход топлива, к которому будет стремиться реальный расход при снижении дополнительных не учитываемых потерь.

Топливо всегда содержит также золу, углеводороды и другие компоненты, поэтому получаемый здесь расчетный расход углерода можно понимать как расход «условного топлива», эквивалентного углероду. Калорийность (или теплотворная способность) чистого углерода составляет 7800 ккал/кг или 33 000 кДж/кг, что соответствует хорошему углю, но значительно меньше калорийности нефти (45 000 кДж/кг) или природного газа. Присутствие углеводородов в угле повышает его калорийность, а присутствие золы понижает, и эти два фактора могут примерно компенсировать друг друга.

Если все тепло реакции Q расходуется на нагрев ее продуктов, то величина нагрева ΔT составит $\Delta T = Q/n \cdot 3R$, где n – число грамм-атомов (г-ат) веществ (исходных или конечных) в уравнении реакции. Величина ΔT имеет смысл теоретической температуры горения.

Так, теоретическая температура горения углерода ΔT в холодном воздухе получается 740 °С при горении до СО и 1480 °С при горении до СО₂ (расчёт 6 приложения).

Аналогичная величина для основной реакции восстановления:



Отсюда следует, в частности, что если горячую смесь недовосстановленных окислов с углеродом засыпать в какое-то хранилище при 1000 °С, то она может там самопроизвольно металлизироваться на 10 % за счет собственного тепла, остывая на 220 °С, от 1000 до 780 °С. Теоретически такая смесь может полностью, на 100 % металлизироваться за счет собственного тепла остывания на 2200 °С, например, от 3000 °С до 800 °С, если в исходном состоянии удастся приготовить столь горячий оксидный расплав с угольной пылью.

Рассмотрим ряд конкретных расчетов.

Расчёт 1.

Расчет расхода топлива. Дано: воздух поступает в шахтную печь из рекуператора с температурой 1200 °С; колошниковые газы имеют температуру 200 °С; углерод и окислы железа загружаются холодными (0 °С); железо выпускается в виде жидкого металла при 1500 °С; теплота плавления железа – 15000 Дж/моль. Требуется определить расход углерода, если в колошниковых газах нет СО₂, горение полностью идет до СО.

Реакция горения будет иметь вид:

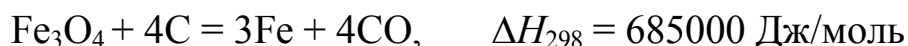


Итоговая теплота Q реакции горения с учетом притока физического тепла с исходными веществами (с дутьем) и оттока физического тепла с продуктами реакции (с колошниковыми газами) составит, согласно формуле (П.2):

$$Q = -\Delta H_{298} + Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}} = \Delta H_{298} + 3R \sum N_{\text{и}} T_{\text{и}} - 3R \sum N_{\text{п}} T_{\text{п}},$$

$$Q = 220000 + 25 \cdot 2(1 + 3,76)1200 - 25 \cdot 2(2 + 3,76)200 = 450000 \text{ Дж} = 450 \text{ кДж},$$

где $3R = 25 \text{ Дж/г-ат}\cdot\text{К}$. Реакция восстановления:



будет иметь общую теплоту

$$Q = -685000 - 3(25 \cdot 1500 + 15\,000) - 25 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 200 = -885\,000 \text{ Дж} = -885 \text{ кДж.}$$

Здесь учтена теплота плавления железа, составляющая 15 000 Дж/моль.

Чтобы обеспечить теплом реакцию восстановления ($Q = -885$ кДж), потребуется «провести $885/450 = 1,96$ реакций горения», так как одна реакция горения дает 450 кДж. Можно сказать также, что реакцию горения потребуется провести с коэффициентом $960/450 = 1,96$. Всего на 3 г-ат железа ($3 \cdot 56 = 168$ г) потребуется израсходовать $2 \cdot 1,96 = 3,92$ г-ат углерода на горение и 4 г-ат углерода на восстановление, всего $2 \cdot 1,96 + 4 = 7,92$ г-ат углерода, или $7,92 \cdot 12 = 96$ г углерода. Удельный расход углерода составит $96/168 = 0,57$ или 570 кг углерода на тонну железа. Из них почти 50 % углерода потребуется сжечь кислородом дутья, и 50 % окислится кислородом окислов железа.

Отметим, что физическое тепло дутья (то есть тепло исходных веществ в реакции горения), равное

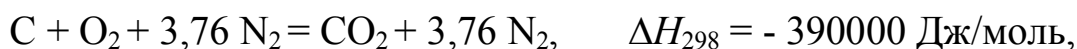
$$Q_{\text{и}} = 25 \cdot 2(1+3,76)1200 = 290000 \text{ Дж},$$

больше тепла горения, которое составляет $\Delta H_{298} = 218000$ Дж.

Расчёт 2.

Решим ту же задачу при условии, что газы дожигаются, так что углерод горит до CO_2 .

Реакция горения даст 630 кДж тепла:



$$Q = 390000 + 25 \cdot 2 \cdot 4,76 \cdot 1200 - 25 \cdot 200(3 + 2 \cdot 3,76) = 630000 \text{ Дж} = 630 \text{ кДж};$$

На реакцию восстановления потребуется 560 кДж:



$$Q = -335000 - 3(25 \cdot 1500 + 15000) - 25 \cdot 6 \cdot 200 = -525000 \text{ Дж} = 525 \text{ кДж}.$$

Для обеспечения расхода 525 Дж на восстановление потребуется реакцию горения, дающую 630 Дж, провести с коэффициентом $525/630 = 0,83$. На 3 г-ат железа (168 г) потребуется $0,83 + 2 = 2,83$ г-ат углерода или 34 г. На 1 тонну железа потребуется $34/168 = 200$ кг углерода или почти в 3 раза меньше, чем при горении до CO (570 кг). Из этих 200 кг углерода $0,83/2,83 = 0,3$ или 29 % потребуется сжечь кислородом дутья и 71 % окислится кислородом окислов железа.

Отметим, что при сделанном предположении относительно теплоемкостей ($C = 3R$) такие задачи решаются точно и быстро. Если в колосниковых газах доменной печи 10 % CO_2 и 30 % CO , их соотношение 1:3, то на тонну углерода можно получить $250/200 + 750/570 = 2,5$ тонны железа. Удельный расход топлива составит $1/2,5 = 0,4$ или 400 кг/т железа. С учетом 40 кг/т углерода, которые необходимы на науглероживание металла, получится 440 кг/т.

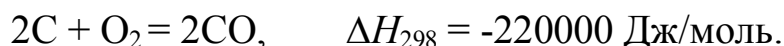
Это примерно равно или несколько меньше расхода кокса на хороших печах. Расхождение можно объяснить тем, что некоторые статьи расхода тепла здесь не учтены.

Чтобы оценить расход кокса в реальных условиях, нужно пересчитать углерод на кокс, учесть углеводородную часть топлива, а также затраты тепла на шлакообразование, на потери с водоохлаждением печи, и т.д. Придется сделать много допущений и намного удлинить и усложнить расчет, сделать его намного менее ясным. Но полученные величины расхода топлива будут не очень отличаться от приведенных значений. Останется примерно тем же интересующее нас соотношение расходов топлива при полном его сжигании до CO_2 (200 кг/т) и неполном сжигании до CO (570 кг/т), или 240 кг/т и 610 кг/т с учетом науглероживания. Важный вывод состоит в том, что расход топлива и эффективность процесса сильно зависят от полноты сжигания топлива, от $\% \text{CO}_2$ в сумме газообразных окислов углерода. Отметим также, что в приведенных расчетах определяется лишь расход *металлургического* топлива, сжигаемого в печи, и не учитывается расход *энергетического* топлива (например, доменного и коксового газа) на отопление рекуператоров. Чтобы определить полный расход того и другого топлива, исходную температуру дутья нужно подставить не $T = 1200^\circ\text{C}$, как на входе в домну, а $T = 0^\circ\text{C}$, как на входе в рекуператор. Тогда общий расход топлива получится во втором расчете не 200, а 285 кг/т. На отопление рекуператора потребуется 85 кг *условного* топлива, соответствующего углероду по калорийности.

Расчёт 3.

Рассчитаем расход топлива в агрегате типа «Ромелт» или «Циклон» при неполном горении топлива в кислороде до CO . Дано: кислород поступает в печь с температурой 0°C ; отходящие газы имеют температуру 1500°C ; углерод и окислы железа загружаются холодными (0°C); железо выпускается в виде жидкого металла при 1500°C ; теплота плавления железа – 15000 Дж/моль. Требуется определить расход углерода, если горение полностью идет до CO .

Реакция горения будет иметь вид:



Исходные вещества поступают холодными, и не приносят тепла, $Q_{\text{и}} = 0$. Итоговая теплота Q реакции горения с учетом оттока физического тепла с продуктами реакции составит, согласно формуле (П. 1):

$$Q = \Delta H_{298} + Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}} = \Delta H_{298} + 3R \cdot CN_{\text{и}} T_{\text{и}} - 3R \cdot CN_{\text{п}} T_{\text{п}},$$
$$Q = 220000 - 25 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1500 = 220000 - 150000 = 70000 \text{ Дж.}$$

Реакция восстановления:



будет иметь общую теплоту

$$Q = -685000 - 3(25 \cdot 1500 + 15000) - 25 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1500 = -1150000 \text{ Дж.}$$

Для обеспечения расхода тепла 1150 кДж на восстановление потребуется провести реакцию горения, дающую 70 кДж, 17 раз, или с коэффициентом $1,150/70 = 17$. Всего на 3 г-ат железа ($3 \cdot 56 = 168$ г) потребуется израсходовать (в горении и восстановлении) $2 \cdot 17 + 4 = 38$ г-ат углерода, или $38 \cdot 12 = 460$ г углерода. Расход углерода составит $460/168 = 2,7$ т или 2700 кг углерода на тонну железа. Из них $34/38 = 0,9$ или 90 % углерода потребуется сжечь кислородом дутья, и 10 % окислится кислородом окислов железа.

Кислорода потребуется 17 молей на 3 г-ат железа (168 г), или $17 \cdot 10^6/168 = 100000$ молей на тонну, то есть

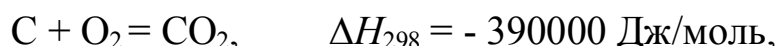
$$100000 \cdot 22,4 = 22400000 \text{ л} = 2240 \text{ м}^3.$$

Здесь использовано правило: при нормальных условиях моль газа занимает 22,4 л.

Расход и углерода (2700 кг/т) и кислорода (2,240 нм³/т) получается весьма большим. Так есть еще неучтенные потери тепла, то при неполном горении топлива только до СО процесс практически неосуществим.

Расчёт 4.

Решим ту же задачу для агрегатов типа «Ромелт» при условии, что газы дожигаются, так что углерод горит до СО₂, тепло дожигания поглощается ванной, утилизируется.



$$Q = 390000 - 25 \cdot 3 \cdot 1500 = 390000 - 113000 = 277000 \text{ Дж};$$



$$Q = -335000 - 3(25 \cdot 1500 + 15000) - 25 \cdot 6 \cdot 1500 = -718000 \text{ Дж.}$$

Для обеспечения расхода 718 000 Дж на восстановление потребуется реакцию горения, дающую 277000 Дж, провести с коэффициентом $718/277 = 2,6$. На 3 г-ат железа (168 г) потребуется, на горение (2,6) и восстановление (2) $2,6+2=4,6$ г-ат углерода, или 55 г. На 1 тонну железа потребуется $55/168 = 0,33$ или 330 кг/т углерода, в 8 раз меньше, чем при горении до СО (2700 кг). Из этих 330 кг углерода $2,6/4,6 = 0,56$ или 56 % потребуется сжечь кислородом дутья и 44 % окислится кислородом окислов железа.

Кислорода потребуется 2,6 моля на 3 г-ат (168 г) железа или $2,6 \cdot 10^6 / 168 = 15500$ молей на тонну, или $15\ 500 \cdot 22,4 = 350000$ л = 350 м³.

Из этих данных видно, что для успеха подобных процессов решающее значение имеет обеспечение высокой полноты горения топлива до CO₂. Если обеспечивается полное горение топлива с усвоением тепла ванной, то даже при потере всего физического тепла газов, отходящих с температурой 1500 °С, расход топлива невелик, 330 кг/т. При неполном горении только до СО расход топлива и кислорода получается столь большим, что процесс практически неосуществим.

Расчёт 5.

Приведем результаты расчетов расхода топлива и кислорода по той же схеме для ряда других процессов, а также полученные выше результаты.

В рамках принятой расчетной схемы тепловой баланс агрегата и его экономичность определяют 4 фактора: Температура дутья T_d , температура отходящих газов T_o , температура металла как продукта процесса T_m , % дожигания отходящих газов, или % CO₂ в сумме CO₂+СО (доля полного горения топлива). Все полученные данные сведём в таблицу.

Процесс, дутьё, доля полного горения	T_d , °С	T_o , °С	T_m , °С	Доля полного горения, %	Расход углерода, кг/т	Расход кислорода, м ³ /т
Домна, воздух, 0 % CO ₂	1200	200	1500	0	600	-
Домна, воздух, 25 %CO ₂	1200	200	1500	25	490	-
«Угольный Мидрекс», 100 % CO ₂	1200	200	1500	100	200	-
«Угольный Мидрекс», с ре- куператорами	1200	200	1500	100	285	
«Циклон», на порошок желе- за, кислород, 0 % CO ₂	0	900	900	0	1500	1180
«Ромелт», кислород, 0 % CO ₂	0	1500	1500	0	2700	2240
«Ромелт», кислород, 100 % CO ₂	0	1500	1500	100	330	350
«Ромелт», воздух	1200	1500	1500	100	310	
«Ромелт», кислород, 0 % CO ₂	0	1500	1500	30	860	-
«Ромелт», достигнутый рас- ход топлива и O ₂	0	1500	1500	30	780-1000	680-750

Расчетный расход топлива на получение металла и на сталеплавильный процесс при равновесии факела с различными нагреваемыми материалами. горении на разных стадиях восстановления. % CO₂ – доля полного горения, (%CO₂), α – доля полного тепла горения, получаемого ванной.

Нагреваемый материал	% CO ₂	α, %	Расчетный расход топлива, кг/т	
			получение металла	сталеплавильный процесс
Чугун, сталь, топливо	0	9	2700	300
Малоуглеродистое железо, система Fe/FeO	25	26	1100	120
Окислы FeO/Fe ₃ O ₄	90	63	380	40
Высшие окислы Fe ₃ O ₄ /Fe ₂ O ₃	100	82,00	330	35
То же, но почти без потерь физического тепла (рекуператор)	100	~100	285	30

Расчёт 6.

Расчет теоретической температуры горения T_{Γ} выполняется по той же формуле (П. 2), определяющей тепловой баланс реакции. В отличие от расчета расхода топлива, в данном случае неизвестной является конечная температура реакции T_{Π} (то есть температура продуктов реакции, $T_{\Gamma} = T_{\Pi}$). Общая теплота реакции Q равна нулю, так как все тепло реакции расходуется на нагрев ее продуктов.

$$Q = \Delta H_{298} + Q_{\text{И}} - Q_{\text{П}} = \Delta H_{298} + 3R \cdot CN_{\text{И}} T_{\text{И}} - 3R \cdot CN_{\text{П}} T_{\text{П}} = 0.$$

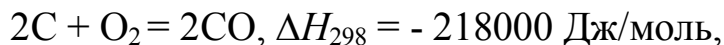
Расчет температуры горения T_{Γ} приведён в таблице.

Реакция полного горения (ПГ) или неполного горения (НГ)	ΔH_{298} , кДж/моль	T_{Γ} , °С
$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$, углерод в кислороде, полное горение (ПГ)	390	5200
$\text{C} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}$, неполное горение (НГ)	110	2200
$\text{C} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}$, углерод, растворенный в жидком металле, 1500 °С, (НГ)	110	2950
$\text{C} + \text{O}_2 + 3,76\text{N}_2 = \text{CO}_2 + 3,76\text{N}_2$, углерод в воздухе, ПГ	390	1480
$\text{C} + \text{O}_2 + 3,76\text{N}_2 = \text{CO}_2 + 3,76\text{N}_2$, углерод в воздухе, НГ	110	740
Углерод в воздухе, 25 % CO ₂ , 75 % CO	160	930
Углерод в доменном дутье, 25 % CO ₂ , 75 % CO	160	2200
Железо в кислороде, $2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$	270	5200
$\text{CH}_4 + 1/2(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) = \text{CO} + 2\text{H}_2 + 1,88\text{N}_2$. Природный газ в воздухе, НГ	30	105
$\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,56\text{N}_2$, природный газ в воздухе, ПГ	890	1480
$\text{CO} + 1/2(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) = \text{CO}_2 + 1,88\text{N}_2$, генераторный газ в воздухе, ПГ	280	1650
Доменный газ в воздухе	-	700

Расчёт 7.

Углерод жидкого металла, имеющий температуру 1500 °С, горит в холодном кислороде O₂ до СО (2С + O₂ = 2СО). Рассчитать теоретическую температуру горения T_Г.

Реакция горения будет иметь вид:



$$Q = 218000 + 25 \cdot 2 \cdot 1500 - 25 \cdot 4 \cdot T_{\text{Г}} = 0,$$

откуда T_Г = 2950 °С.

Итоговое тепло Q равно нулю, потому что все тепло реакции расходуется на нагрев продуктов горения (2СО) до температуры T_Г.

Рассмотрим еще смесь (3Fe + 4СО) при 1100 °С, которая образуется при металлизации магнетита углем (Fe₃O₄ + С = 3Fe + 4СО) в рекуператоре. Если газ СО на 25 % дожигается до СО₂ холодным (0 °С) кислородом, то полное тепло реакции горения (СО + 0,5O₂ = СО₂) при 1100 °С составит

$$Q = 280000 - 25 \cdot 1100 = 254000 \text{ Дж}.$$

Этого тепла достаточно для расплавления металла (ΔH = 15000 Дж/г-ат) и нагрева смеси на

$$\Delta T_{\text{Г}} = (254000 - 3 \cdot 15000) / 25 \cdot 11 = 760 \text{ °С}.$$

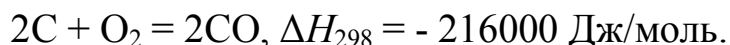
Здесь 11 – число грамм-атомов вещества в смеси (3Fe + 4СО).

Практически требуется прогрев смеси на 400 °С, и для этого нужно дожигание 0,6 моля СО из 4 молей смеси, то есть дожигание на 15 %. Кислорода потребуется 0,6 · 0,5 = 0,3 моля на 168 г железа, то есть 0,3 · 10 · 6 / 168 = 1800 молей или 40 нм³/т.

Расчёт 8.

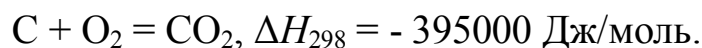
Рассчитать расход углерода топлива на реакцию разложения CaCO₃ в печи обжига известняка при неполном горении топлива до СО и при полном горении до СО₂. Считаем, что при неполном горении углекислота СО₂, выделяемая при разложении известняка, также восстанавливается углем до СО. Для простоты не учитываем расход тепла на изменение температуры реагентов в процессе.

При неполном горении до СО:



Для баланса тепла вторую реакцию нужно взять с коэффициентом (355/216) = 1,65, тогда на моль СаО (40 г) потребуется 2 · 1,65 + 1 = 4,3 моля углерода или 4,3 · 12 = 47 г. Расход углерода составит 47/40 = 1,18 тонны углерода на тонну известня.

При полном горении до CO_2 :



Для баланса тепла вторую реакцию нужно взять с коэффициентом $(175/395) = 0,45$, и на моль CaO (40 г) потребуется 0,45 моля углерода или $0,45 \cdot 12 = 5,4$ г. Расход углерода составит $5,4/40 = 0,13$ тонны углерода на тонну извести.

В этом случае неполное горение до CO приводит к очень большому расходу топлива 1,18 т на тонну известняка, в 9 раз больше по сравнению с полным горением до CO_2 ($1,18/0,13 = 9$).

Расчёт 9.

Рассчитаем расход углерода топлива на перегрев до 1400°C и плавление шлака в количествах 10 и 30 % по отношению к металлу, то есть 100 и 300 кг на тонну.

Если углерод горит до CO_2 в дутье с температурой 1200°C , отходящие (колошниковые) газы имеют температуру 200°C , то тепло на моль углерода составит (см. расчёт 2) величину:

$$Q = 390000 + 25 \cdot 2 \cdot 4,76 \cdot 1200 - 25 \cdot 200(3 + 2 \cdot 3,76) = 630000 \text{ Дж} = 630 \text{ кДж}.$$

Для нагрева грамм-атома шлака до температуры 1400°C потребуется $3R \cdot T = 25 \cdot 1400 = 35000 \text{ Дж} = 35 \text{ кДж}$. Теплоту плавления примем, по правилу Гильдебранда, равной $RT_{\text{пл}} = 8,31 \cdot (1400 + 273) = 14000 \text{ Дж}$. Всего на грамм-атом шлака потребуется $35 + 14 = 49 \text{ кДж}$.

За счет моля (12 г) углерода можно довести до 1400°C и переплавить $630/49 = 13$ г-ат шлака.

Средний атомный вес шлака можно принять таким, как у расплава $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, то есть $(40 + 28 + 3 \cdot 16)/5 = 23,2$. На килограмм шлака потребуется $12/23,2 \cdot 13 = 0,04$ кг углерода, на 100 кг шлака – 4 кг топлива, на 300 кг шлака – 12 кг углерода.

Таким образом, при полном горении расчетный расход топлива получается небольшим, и увеличение количества шлака от 10 до 30 % приведет к увеличению расхода углерода на $12 - 4 = 8$ кг на тонну металла.

Расчёт 10.

Рассчитаем расход топлива (углерода) для нагрева жидкого металла в горне-отстойнике на 200°C при обдуве ванны доменным дутьем (1200°C) с угольной пылью.

Если газы из отстойника переходят в основной корпус агрегата, где дожигаются до CO_2 и охлаждаются до температуры 200°C на колошнике, то общее тепло реакции горения на моль углерода составит (см. расчёты 2 и 7) величину:

$$Q = 390000 + 25 \cdot 2 \cdot 4,76 \cdot 1200 - 25 \cdot 200(3 + 2 \cdot 3,76) = 630000 \text{ Дж} = 630 \text{ кДж.}$$

Для нагрева грамм-атома железа на 200 °С потребуется

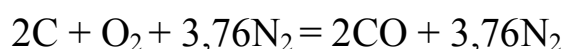
$$Q = 25 \cdot 200 = 5000 \text{ Дж} = 5 \text{ кДж.}$$

За счет горения грамм-атома углерода (12 г) можно нагреть на 200 °С $630/5 = 126$ г-ат железа. Расчетный расход углерода на нагрев металла составит

$$12/(126 \cdot 56) = 0,002$$

или всего лишь 2 кг на тонну металла.

Если горн-отстойник выполнен как отдельный агрегат, газы из отстойника с температурой 1500 °С идут не в основной корпус, а в атмосферу, горение идет лишь до СО. Общая теплота реакции горения



составит, как и в расчёте 3,

$$Q = 218000 - 25 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1500 = 218000 - 150000 = 68000 \text{ Дж.}$$

Этого достаточно для нагрева на 200 °С $68/5 = 13,6$ моля железа. Расход топлива составит $12/56 \cdot 13,6 = 0,016$ или 16 кг на тонну.

Если горн-отстойник выполнен вместе с основным корпусом агрегата, то в самом отстойнике потребуется сжечь 16 кг углерода на тонну, но на 14 кг/т сократится расход топлива в основном корпусе, где догорают и охлаждаются газы из отстойника. Дополнительный расход топлива в агрегате в целом составит $16 - 14 = 2$ кг/т.

Расчёт 11.

Оценим увеличение расхода топлива вследствие того, что углерод вдвигается в горн с угольной пылью холодным, тогда как топливо, поступающее в горн из шахты, имеет температуру 1200 °С. Теплота нагрева углерода на 1200 °С составит

$$Q = 2 \cdot 5 \cdot 1200 = 30000 \text{ Дж/г-ат.}$$

Как показано в расчётах 1 и 2, при неполном горении моль углерода дает $450/2 = 225$ кДж общего тепла Q , при полном – 630 кДж. Потери тепла от поступления углерода холодным составят $(30/225)100 \% = 13 \%$ и $(30/630)100 \% = 5 \%$.

В агрегате «Мидрекс» при полном горении из-за данного фактора расчетный расход топлива возрастет на 5 %.

Если в домне доля полного горения составляет 25 %, то замена кокса угольной пылью приведет к увеличению расхода топлива на $(13 \cdot 0,75 + 5 \cdot 0,25) = 11 \%$.

Часто считается, что пыль в домне замещает равное количество кокса.

Расчёт 12.

Рассмотрим процесс, в котором концентрат восстанавливается и прогревается до 1100 °С в рекуператоре в виде пылегазовой взвеси, затем полученный порошок железа прогревается от 1100 до 1500 °С за счет горения избыточной угольной пыли в кислороде.

Как показано в расчёте 3, полная теплота восстановления и нагревания продуктов реакции до 1500 °С равна 1150 кДж:



$$Q = \Delta H_{298} + Q_{\text{И}} - Q_{\text{П}} = \Delta H_{298} + 3R \cdot CN_{\text{И}} T_{\text{И}} - 3RCN_{\text{П}} T_{\text{П}};$$

$$Q = - 685000 - 3(25 \cdot 1500 + 15 \cdot 000) - 25 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1500 = - 1150000 \text{ Дж}.$$

Теплота плавления железа (15000 Дж/моль), плюс теплота нагревания на 400 °С, от 1100 до 1500 °С железа и газов СО составит 143 кДж:

$$Q = - 3(25 \cdot 400 + 15000) - 25 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 400 = - 143000 \text{ Дж} = 143 \text{ кДж}.$$

Для нагрева пылегазовой взвеси за счет горения потребуется 143/1150 = 0,125 или 12 % общего тепла процесса, 88 % тепла будет получено из рекуператора.

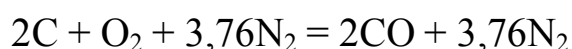
Расчёт 13.

Рассчитаем количество тепла, которое получит агрегат типа конвертера, который отходящие газы покидают с температурой расплавов, 1400 °С, если идет неполное горение углерода до СО в кислороде и в доменном дутье с температурой 1200 °С.

Для горения в кислороде ($2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$) получаем, как и выше,

$$Q = 218000 - 25 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1500 = 218000 - 140000 = 78000 \text{ Дж}.$$

Для горения в доменном дутье



получим

$$Q = 218000 + 25 \cdot 2(1 + 3,76)1200 - 25 \cdot 2(2 + 3,76)1400 = 100000 \text{ Дж}.$$

Таким образом, неполное горение углерода в доменном дутье дает больше тепла (100 кДж), тогда как горение в кислороде – лишь 78 кДж. Приход тепла с горячим доменным дутьем оказывается более важным фактором, чем возрастание потерь тепла с увеличенным объемом отходящих газов при горении в воздухе.

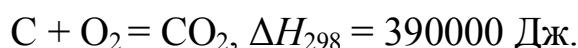
Расчёт 14.

Выполним расчеты расхода топлива на выплавку некоторых металлов в «конвертере» (см. рис. 4.1), то есть при полном сжигании углерода, без утилизации физического тепла отходящих газов и без подогрева дутья.

Расчет для выплавки железа при 1500 °С окажется повторением расчета 13 и даст расход углерода 330 кг/т.

Рассчитаем расход углерода на восстановление алюминия. Схема расчета та же, как и выше, для процессов черной металлургии. Температура получаемого металла и отходящих газов 2300 °С, реализуется полное горение в кислороде.

Реакция горения



Полная теплота реакции за вычетом тепла уходящих газов составит

$$Q = 390000 - 25 \cdot 3 \cdot 2300 = 390000 - 172000 = 218000 \text{ Дж.}$$

Для реакции восстановления алюминия



полная теплота составит

$$Q = -2160000 - 25[(3 \cdot 3) + 4]2300 = 2160000 - 750000 = 2910000 \text{ Дж.}$$

Для обеспечения теплом реакции восстановления потребуется провести реакцию горения с коэффициентом $2910/218 = 13,4$. Для получения 4 г-ат алюминия потребуется 13,4 г-ат углерода на горение, и 3 г-ат углерода на восстановление, всего $13,4 + 3 = 16,4$ г-ат. Расчетный расход углерода на выплавку алюминия составит

$$16,4 \cdot 12 / 4 \cdot 27 = 1,84 \text{ или } 1840 \text{ кг/т.}$$

Для выплавки титана при 2000 °С полная теплота реакции восстановления



составит 650000 Дж, а реакции горения – 240000 Дж.

Для обеспечения теплом реакции восстановления потребуется провести реакцию горения с коэффициентом $650/240 = 2,7$. Для получения грамм-атома титана потребуется 2,7 г-ат углерода на горение, и 1 г-ат углерода на восстановление, всего $2,7 + 1 = 3,7$ г-ат. Расчетный расход углерода на выплавку титана составит

$$3,7 \cdot 12 / 48 = 0,93 \text{ или } 930 \text{ кг/т.}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *История металлургии* / Труды института истории естествознания и техники. Т. 20. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 402 с.
2. *Венецкий С.* От костра до плазмы. М.: Знание, 1986. 208 с.
3. *Всемирная история*: в 24 т. Минск: Литература, 1997 / т. 1: Каменный век. 512 с.
4. *Всемирная история*: в 24 т. Минск: Литература, 1997 / т. 2: Бронзовый век. 528 с.
5. *Всемирная история*: в 24 т. Минск: Литература, 1997 / т. 3: Век железа. 512 с.
6. *Андронов В. Н.* Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. 142 с.
7. *Доменный процесс* / Издание американского общества металлургов. М.: Металлургиздат, 1967. 719 с.
8. *Основы теории и технологии доменной плавки* / А. Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л. И. Леонтьев, О. П. Онорин. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2005. 545 с.
9. *Ростовцев С. Т.* Теория металлургических процессов. М.: Металлургия, 1962. 411 с.
10. *Washburn T. S., Larsen B. M., March J. S.* Basic open Heart Steelmaking / New York: The American Institute of Mining and Metallurgical Engineering, 1944. 718 p.
11. *Пат. 200611471 Российская Федерация, МПК C21B13/14.* Способ и устройство для получения расплавленного железа / Вирамонтес-Браун Риккардо, Вильяреаль Тревилльо Хуан-Антонио, заявл. 10.11.07.
12. *Анатомия кризисов* / под ред. акад. В. Н. Котлякова. М.: Наука, 1999. 238 с.
13. *Tammann G.* Kristallisieren und Schmelzen. Leipzig, 1903.
14. *Гаврилин И. В.* Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. Владимир: Изд-во ВГУ, 2000. 258 с.
15. *Алесковский В. Б.* Химия надмолекулярных соединений. СПб: Изд-во СПбГУ, 2000. 254 с.
16. *Жидкая сталь* / Б. А. Баум [и др.]. М.: Металлургия, 1984. 208 с.
17. *Есин О. А., Гельд П. В.* Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1, 2. М.: Металлургия, 1966. 702 с.
18. *Talmage C. R.* The Future of Solid State Metallurgy // Applied Powder metallurgy International, 1983.– Vol. 15. № 2.
19. *Павлов В. В.* О «кризисе» кинетической теории жидкости и затвердевания. Екатеринбург: Издание УГГГА. 392 с. Электронный вариант книги // Материалы сайта: Pavlovvalery.ru
20. *Гегузин Я. Е.* Физика спекания. М.: Наука, 1967. 360 с.
21. *Гуденау Г.* Последние достижения в области применения пылеугольного топлива для доменной плавки // Сталь, 1996. № 2. С. 9-11.
22. *Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламов В. А.* Физико-технические свойства горных пород и углей Донецкого бассейна: справочник. М.: Недра, 1994. 449 с.
23. *Липович В. Г.* Химия и переработка угля. М.: Химия, 1988. 336 с.
24. *Русачев Д. Д.* Химия твердого топлива. М.: Химия, 1976. 255 с.
25. *Использование тощих сортовых углей в металлургии* / А. М. Амдур, С. А. Загайнов, Л. Ю. Гилева, В. П. Соколов // Известия высш. учеб. завед., Горный журнал. № 4. 2003. С. 98-103.
26. *Амдур А. М., Брук Л. Б.* Использование каменных углей в металлургических процессах // Материалы V международной научно-практической конференции «Энерге-

тическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». Кемерово, 2003. С. 45-48.

27. Павлов В. В., Ватолин Н. А. Металлизация и спекание рядовых железорудных концентратов // *Фундаментальные проблемы металлургии: вестник УГТУ-УПИ*, № 5 (20). Екатеринбург, 2003. С. 58-60.

28. Островский О. И., Григорян В. А., Вишкарёв А. Ф. Свойства металлических расплавов. М.: Металлургия, 1988. 304 с.

29. Баум Б. А. Металлические жидкости. М.: Наука, 1979. 116 с.

30. Вертман А. А., Самарин А. М. Свойства расплавов железа. М.: Наука, 1969. 280 с.

31. *Бескоксовая переработка титаномагнетитовых руд* / В. А. Ровнушкин [и др.]. М.: Металлургия, 1988. 247 с.

32. Пат. 2186042 Российская Федерация. Способ получения извести / Амдур А. М., заявл. 27.07.02.

33. *Теория металлизации железорудного сырья* / Ю. С. Юсфин, В. В. Даньшин, Н. Ф. Пашков, В. А. Питателев. М.: Металлургия, 1982. 256 с.

34. Кудрявцев В. С., Пчелкин С. А. Использование некоксуемых углей в черной металлургии. М.: Металлургия, 1981. 168 с.

35. *Современные процессы бескоксового производства чугуна* / А. Б. Усачев, В. А. Роменец, В. Е. Лехерзак, А. В. Баласанов. // *Металлург*, 5, 2002, с. 37-40.

36. Делонский С. В. Теоретические основы и технология плавки металлов из неокискованного сырья. С.Пб.: Наука, 2007. 322 с.

37. *Справочник химика*, т. 1. Л.: Изд-во «Химия», 1971, 1072 с.

38. Лейтес И. С. Второй закон и его 12 заповедей. М.: Изд-во МГУ, 2002. 174 с.

39. Льюи М. История физики. М.: Мир, 1970. 465 с.

40. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, т. 1-2. М.: Мир, 1977. 440 с.

41. Уббелоде А. Р. Плавление и кристаллическая структура. М.: ИЛ, 1969. 296 с.

42. Всемирная история, в 24 т. Минск: Литература, 1997 / т. 12: 612 с.

43. Павлов В. В. Несообразности металлургического цикла, их устранение. Издание УГТУ, 2008, 128 с. (первое издание)

44. Павлов В. В. Несообразности металлургического цикла, их устранение. Издание УГТУ, 2011, 184 с. (второе издание) Электронный вариант книги // Материалы сайта: Pavlovvalery.ru

45. Юсфин Ю. С. и др. Теория металлизации железорудного сырья. М.: Металлургия, 1982, 256 с.

46. Мечов В. В., Быков В. П., Тарасов А. В. и др. Автогенные процессы в цветной металлургии. М.: металлургия, 1992 г., 413 с.

47. Павлов В. В., Попель С. И. Влияние поверхностной активности компонентов, растворенных в железе, на последовательность их окисления. ИАН СССР, Металлургия и топливо, 5, 42, 1963 г.