

В. В. Павлов

**НЕСООБРАЗНОСТИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЦИКЛА.
ИХ УСТРАНЕНИЕ**

Екатеринбург – 2011

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»



В. В. Павлов

**НЕСООБРАЗНОСТИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЦИКЛА.
ИХ УСТРАНЕНИЕ**

Научное издание

Второе издание, исправленное и дополненное

Екатеринбург – 2011

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 металлургического цикла. Их устранение: научное издание / В. В. Павлов; Урал. гос. горный университет. Второе изд., исправл. и дополненное. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. 184 с.
ISBN 978-5-8019-0272-2

Рассмотрены несообразности доменного процесса и металлургического цикла – неполное сжигание топлива, необходимость кокса, переуглероживание металла. Отмечено, что эти несообразности поддерживаются доменной идеологией, которая сложилась в донаучную эпоху. Их можно устранить, если перейти от современной совместной продувки руды и топлива к их последовательной продувке.

Книга предназначена для научных сотрудников и аспирантов, а также для студентов специальности 130405 – «Обогащение полезных ископаемых», изучающих курс «Окискование и металлургия».

Глава 7 написана совместно с профессором УГГУ Апакашевым Р. А.
Рис. 10. Табл. 1. Библиогр. 45 назв. Приложение 1.

УДК 54

ISBN 978-5-8019-0272-2

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
Глава 1. ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КНИГИ	7
1.1. Причина несообразностей доменного процесса – древняя традиция смешивания руды и топлива	7
1.2. «Врожденные пороки» доменного процесса	8
1.3. Формирование основных принципов металлургии	12
1.4. Формирование доменной плавки	14
1.5. Принцип «доменный процесс незаменим!»	17
1.6. Доменная идеология	22
1.7. Психологические сложности	25
Глава 2. ПОРОКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЦИКЛА	29
2.1. «Порок № 1» – неполное сжигание топлива	29
2.2. Обилие дешевого тепла – важнейшее условие успеха металлургического агрегата	32
2.3. Замена кокса углем, доставляемым прямо в факелы	35
2.4. Несοοобразности печей обжига	39
2.5. Оценки теплового баланса	42
2.6. Обеспечение теплом ванны с расплавами. Отопление сталеплавильных агрегатов	44
2.7. Возможности полного сжигания топлива	47
2.8. Порок № 3 – переуглероживание металла	51
2.9. Принцип «двустадийный процесс наиболее эффективен»	55
2.10. Порок №4 – капризность, плохая управляемость процесса	56
Глава 3. СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛИ В ШАХТНОЙ ПЕЧИ. АГРЕГАТ «УГОЛЬНЫЙ «МИДРЕКС»	63
3.1. Агрегат «Угольный Мидрекс»	63
3.2. Возможности окислительной зоны дожигания газов. Баланс тепла отдельных зон. Футеровка	66
3.3. Управляемость процесса	69
3.4. Плавление спекающейся массы металлизированных окатышей	71
3.5. Газопроницаемость зоны плавления	73
3.6. Выносной горн-отстойник. О качестве получаемой стали	75
3.7. Почему не плавят сразу же окатыши в агрегатах типа «Мидрекс»	80
3.8. Способы введения топлива непосредственно в зону горения, в факелы	81
3.9. Технические сложности преодолимы	87
Глава 4. ИНЖЕКЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	89
4.1. Известные инъекционные процессы	89
4.2. Применение реакций порошков в факеле	90
4.3. Металлизация пылегазовой взвеси в рекуператоре. Получение порошка железа	92

4.4. Получение жидкого металла за счет металлизации в рекуператоре.....	96
4.5. Оптимизация прогрева пылегазовой взвеси.....	101
4.6. Технические сложности.....	102
Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПРОДУВКИ В СУЩЕСТВУЮЩИХ ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ.....	107
5.1. Вдувание концентрата.....	107
5.2. Возможные отрицательные последствия.....	112
5.3. Вдувание угольной пыли с порошком концентрата.....	115
5.4. Утилизация тепла отходящих газов реакцией металлизации пылегазовой взвеси.....	117
5.5. Вдувание пылегазовой взвеси, металлизированной в рекуператоре.....	119
5.6. Другие изменения процесса.....	121
Глава 6. ДРУГИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПРОДУВКИ. ДРУГИЕ ВАРИАНТЫ.....	123
6.1. Получение металла из руды в сталеплавильном агрегате. Тепловой баланс плавки.....	123
6.2. Процесс «Ромелт».....	125
6.3. Восстановление других металлов.....	129
6.4. Получение водорода.....	132
6.5. Газификация угля в рекуператоре.....	133
Глава 7. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРШКА КОНЦЕНТРАТА ПО СХЕМЕ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ – ПРЕССОВАНИЕ – СПЕКАНИЕ (совместно с Р. А. Анакашевым).....	135
7.1. Преимущества схемы металлизация – спекание.....	135
7.2. Экспериментальная часть.....	138
7.3. Неметаллические включения.....	139
Глава 8. ТОЧНОЕ ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ И ЭЛЕМЕНТЫ ДРЕВНЕГО РЕМЕСЛА В МЕТАЛЛУРГИИ. ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ СЛОЖНОСТИ ВОПРОСА.....	142
8.1. Элементы древнего ремесла в доменной плавке.....	142
8.2. Силы фундаментальные (простые) и нефундаментальные. История вопроса.....	143
8.3. Явления, не поддающиеся анализу методами точных наук.....	146
8.4. Революции в физике как ломки идеологии.....	149
8.5. Нефундаментальные явления сосредоточены в теории твердого тела.....	151
8.6. Квазикристаллические свойства жидкости и приемы улучшения металла.....	153
8.7. Термовременная обработка стали (ТВО).....	155
8.8. Различия в мышлении физхимика и доменщика.....	157
8.9. Особенности идеологических дискуссий.....	159
8.10. О формировании идеологии.....	160

8.11. Устойчивость традиционной идеологии.....	164
8.12. Закономерности ломки идеологии	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	168
ПРИЛОЖЕНИЕ. Расчеты теплового баланса, расхода топлива, теоретической температуры горения	170
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	182

ПРЕДИСЛОВИЕ

При подготовке данного второго издания книги материал ее существенно дополнен и переработан.

Мы стремились возможно полнее обсудить положения этой работы со специалистами теории металлургических процессов, доменного и сталеплавильного производства, рудоподготовки, обогащения полезных ископаемых и др. Для нас очень полезны были беседы с академиком Ватолиным Н. А., с профессорами Амдуром А. М., Апакашевым Р. А., Дмитриевым А. Н., Кобелевым В. А., Козиным В. З., Кравцом Б. Н., Окуневым А. И., Пузановым В. П. и другими. Автор благодарен также Благину Д. В. и Потапову А. М.

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 весьма оживленных, а также по материалам прочитанных лекций или докладов. В книге сохранены также элементы занимательного изложения, полезные в лекциях для студентов.

К тому же потребовалось обсудить ломку идеологии в данной области, 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 8.

Глава 7 написана совместно с профессором кафедры химии Уральского государственного горного университета Апакашевым Р. А.

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: Pavlovvalery.ru.

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1.1. Причина несообразностей доменного процесса – древняя традиция смешивания руды и топлива

...прошое, отдаленнейшее, глубочайшее, суровейшее прошое 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. Металлургический цикл [1-17] с его пороками сложился в донаучную эпоху в результате многовекового стихийного развития, под воздействием многих исторических случайностей. История 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 (примерно 95 %) получается доменным процессом, то есть продувкой смеси кусков кокса и рудной компоненты – окатышей или агломерата. Основную часть остальных 5-ти процентов черного металла получают процессом, идейно близким к доменному – путем продувки окатышей или кусков рудной компоненты природным газом в шахтных агрегатах типа «Мидрекс», «Хилл-3» и др. В принципе, известно много других способов получения черного металла, быстро появляются новые способы, однако, их суммарный вклад в производство незначителен. Нет способов, которые могли бы составить конкуренцию доменному процессу в получении основной массы металла. Подобная ситуация и в пирометаллургическом получении ряда цветных металлов, так как многие агрегаты цветной металлургии создавались по образцу домен.

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 порождены несообразностями доменного процесса, а именно, тем, что получение металла практически всегда мыслили, в основном, как продувку рудо-топливной смеси при избытке топлива. Это два основных принципа доменного процесса.

Металлургический цикл сформировался в современном виде во многом потому, что для металлургов с древности очень важными были всегда две задачи:

1. Обеспечить высокую скорость реакций между кусками руды и топлива.

2. Достигнуть и поддерживать достаточно высокую температуру в горне, в домнице, а позднее – в доменной печи.

Для ускорения процессов восстановления руды и топливо *смешивали*¹, чтобы реагирующие куски шихты оказались ближе друг к другу. Сейчас вполне понятно, что нужную скорость реакций можно обеспечить и без смешивания компонентов; в этом убеждают теперь уже не только лабораторные эксперименты, но и промышленные процессы, в частности, агрегаты типа «Мидрекс».

Для повышения температуры увеличивали долю топлива в смеси, давали увеличенный *избыток топлива*. Поэтому куски металла, полученные металлизацией руды, получались в угольной засыпке. Когда интенсификация процессов привела к плавлению системы, получилось предельное насыщение жидкого металла углеродом, получился чугун. Стал необходим дополнительный сталеплавильный передел.

Отметим, что для получения высокой температуры избыток топлива нецелесообразен; наивысшая температура получается при стехиометрическом соотношении реагентов, без избытка топлива, остающегося после всех реакций.

Таким образом, теперь вполне ясно, что оба рассматриваемых побуждения древних металлургов, которые привели к «несообразностям» цикла, оказываются неверными.

1.2. «Врожденные пороки» доменного процесса

Ну, это все философия...

А. М. Амдур

Перечислим «несообразности» или «врожденные пороки» доменного процесса [15, с. 247] (соответственно, и металлургического цикла), вызванные *смешиванием кусков* руды и топлива при избытке топлива. Пороки можно устранить, если перейти *от совместной продувки топ-*

¹ Здесь и далее выделены характерные обороты дискуссий и публикаций. Эти обороты можно считать ключевыми словами обсуждаемых вопросов.

лива и рудной компоненты к *последовательной* продувке, когда газы дутья проходят сначала зону топлива, а затем рудную зону. Отметим следующие пороки:

а) в доменной печи газообразные продукты горения вплоть до колошника контактируют с коксом, горение всюду идет при избытке топлива, как в газогенераторе, поэтому кокс удаётся сжечь в основном лишь до CO, но не до CO₂. Из-за этого печь получает от горения топлива в 2-3 раза меньше тепла. Если в верхней части печи будут одни окатыши, то подачей дополнительного дутья отходящие газы можно будет дожигать до CO₂ и получать всё возможное тепло.

б) 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. Эти два порока вместе делают тепло горения топлива в доменной печи примерно в 10 раз дороже (так как $(2-3) \times (2-6) \approx 10$) по сравнению с хорошей угольной топкой или паровым котлом, то есть по сравнению с такими агрегатами, где, во-первых, топливо сгорает практически полностью (до CO₂, H₂O), и, во-вторых, где используется сравнительно дешёвый уголь, но не кокс.

Тепло горения топлива в домне 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. Тепло горения топлива при этом было бы *ординарным*, оплачивалось почти в однократном, а не в десятикратном размере. Рудная компонента в домне, как и топливо, также должна применяться в *окусованном* виде, в виде обожженных окатышей или агломерата. Это делает и ее дороже, например, в два раза и более. При раздельной продувке можно и рудную компоненту использовать в исходном виде как порошок концентрата.

с) смешивание окатышей с избытком топлива приводит к тому, что после восстановления куски металла оказываются в топливной засыпке, и их плавление даёт насыщенный углеродом чугун, эвтектический расплав с содержанием углерода около 4,3 %. Поэтому для получения стали требуется выполнить ещё сталеплавильный передел. Этот передел нужен в основном для того, чтобы исправить сравнительно небольшой «перебор» доменного процесса, устранить некоторое переуглероживание, перевосстановление металла.

При последовательной продувке в зону рудной компоненты из топливной зоны поступает 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».

d) ещё одна несообразность совместной продувки – работа при неустойчивом движении материалов, в режиме капризного и часто почти неуправляемого процесса. Сход материалов в домне определяется силами трения в спекающихся массах металлизированных окатышей, а такое движение принципиально неустойчиво, оно переходит в чередование подвисаний и обрушений шихты и, соответственно, перегревов и переохлаждений горна. Возникает множество других расстройств хода печи.

При этом доменщик часто почти не может быстро повлиять на соотношение горения и восстановления-плавления, выделения и поглощения тепла в горне. При перегреве или похолодании горна рекомендуется изменять долю кокса в завалке, но этот кокс дойдет до горна лишь через 6-20 часов. Более устойчивое движение материалов и лучшая управляемость возможны при последовательной продувке.

Таким образом, одна из основных задач книги – показать, что причиной отмеченных пороков цикла является именно традиция *смешивания кусков руды и топлива*. Пороки можно устранить, если перейти к *раздельной (последовательной)* продувке компонентов, при которой топливо и руда загружаются отдельно, а газы дутья проходят сначала зону топлива, а затем зону рудной компоненты.

При последовательной продувке ничто не мешает сжигать топливо полностью, использовать вместо кокса кусковой уголь или угольную пыль, и сразу в шахтной печи получать сталь.

Теперь нам вполне ясно, что неверны оба побуждения древних металлургов, которые привели к смешиванию руды с избытком топлива и к современному металлургическому циклу: и для ускорения процесса, и для повышения температуры в печи необязательно смешивать руду с избытком топлива. Но преодолеть сложившиеся многовековые традиции, которые теперь закреплены всей структурой металлургии, очень сложно, даже если теперь понятно, что они сложились из неверных побуждений. Сейчас и футеровка доменной печи может работать только при избытке кокса, и профиль печи рассчитан на сход шихты с избытком кокса. Как говорят в таких случаях, мы в плену у древних заблуждений. На практике оказывается очень трудно хотя бы осознать возможность металлургии

без данных несообразностей, так как для этого требуется радикальная ломка многовековой идеологии.

В прошлом не раз начиналось осмысление металлургами преимуществ отдельной продувки. Тысячу лет существовал каталонский способ получения железа, при котором топливо и руда загружались раздельно. Существовали другие подобные региональные варианты процесса [7, 8]. Если бы мировой индустриальный металлургический цикл сложился, например, на основе каталонского способа, то сейчас мы имели бы, очевидно, совсем другую металлургию, примерно ту металлургию с отдельной 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, 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. 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 цикл на основе совместной, а не отдельной продувки.

Если мы рассматриваем лишь схему процесса и не обсуждаем пока технические сложности, то вполне ясно, что «пороки» нетрудно устранить. Так, шахтную печь со сталеплавильной футеровкой лещади можно заполнить одними лишь окатышами, а все топливо вводить в виде угольной пыли, вдуваемой в факелы дутья. Отходящие газы при необходимости можно дожигать подачей дополнительного дутья в верхней части печи и, тем самым, добиться полного горения топлива до CO_2 . В зависимости от величины избытка угольной пыли по сравнению с кислородом дутья мы получим, очевидно, чугун, сталь или железо в соответствии с материальным балансом плавки. Такой агрегат можно назвать «Угольный Мидрекс»; здесь сталь получится уже в шахтной печи, без кокса и при экономичном полном сжигании угля. Такая рядовая сталь будет стоить, например, в 2-3 раза дешевле по сравнению с аналогичным металлом, получаемым в настоящее время.

Возникающие при этом технические сложности отнюдь не являются чрезмерно большими или непреодолимыми. Предлагаемая схема получается в основном перегруппировкой отлаженных элементов современной плавки. Освоение таких процессов потребует, конечно, большой

работы, но вполне реально. Намного больше кардинально новых элементов осваивается при отладке радикально новых процессов, далеких от традиционного доменного. Таковы процессы типа «Ромелт», «Циклон» или кислородно-факельный процесс автогенной плавки черновой меди, процессы металлизации окатышей на поду кольцевой вращающейся печи и др.

Главные сложности при освоении предлагаемых процессов – не технические, а психологические или идеологические. Для введения таких процессов требуется ломка глубоко укоренившейся господствующей доменной идеологии. Обоснование этих положений – задача последующих глав книги.

1.3. Формирование основных принципов металлургии

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 ээка

Рассмотрим историю формирования основных принципов современной металлургии. Приведем соответствующие данные из истории металлургии.

Согласно данным археологических раскопок, железо, видимо, впервые было получено сыродутным процессом в державе древних хеттов, в центральной Малой Азии [5]. Появившееся новое железное оружие оказалось намного более эффективным. Сохранились послания, в которых могущественные фараоны Египта и владыки великой Ассирии просили царя хеттов дать им железа. В парижском музее Лувр хранятся крицы хеттского железа, найденные при раскопках ассирийской столицы Ниневии. Установленный хеттами основной принцип черной металлургии – принцип совместной продувки рудо-топливной смеси – оказался очень живучим и остается основным способом и сейчас.

В металлургии меди обсуждаемый принцип продувки рудо-топливной смеси был введен примерно 6 тысяч лет назад, еще пещерными людьми, где-то в конце каменного века истории человечества [4]. Предполагают, что эта металлургия, возможно, начиналась с обычного обжига кусков руды на костре [1, 2]. Костер можно организовать так, что где-то под слоем углей в нем будет горячая восстановительная зона, где возможно восстановление медной руды.

Отметим, что эпоху зарождения металлургии (примерно 6 тыс. лет назад) Библия считает временем сотворения мира. Действительно, лишь с переходом от каменного века к бронзовому возникают города, государства, появляются дома, дворцы, храмы, возникают начатки письменности. Появление металлов привело к *неолитической революции*, к началу цивилизации и было одним из важнейших событий истории человечества [4]. Для нас важно то, что обсуждаемый принцип совместной продувки руды и топлива существовал с самого зарождения металлургии 6 тыс. лет назад, «от сотворения мира».

Очевидно, медь была получена первой из-за того, что она легковосстановимая. Температура $T_{\text{в}}$ восстановления меди углеродом из руды Cu_2O очень низкая, всего 400 К или 130 °С, поэтому медь вполне может восстанавливаться в слое горячих углей. Для железа $T_{\text{в}} = 710$ °С. Металлы осваивались в основном в порядке нарастания $T_{\text{в}}$, в порядке нарастания сродства к кислороду, а не в порядке тугоплавкости, как часто считается. Легкоплавкий алюминий ($T_{\text{пл}} = 660$ °С) был получен очень поздно, лишь в 19-м веке, и лишь после разработки электрохимических методов, так как он трудновосстановимый, ($T_{\text{в}} = 2210$ °С).

Древний мир знал шесть металлов: медь, железо, олово, свинец, а также самородные благородные металлы – золото и серебро, из которых чеканили монеты. В Древнем Риме применяли свинцовые водопроводные трубы. Олово использовали для получения бронзы.

Открытие следующих металлов началось уже только после эпохи Возрождения. В химии Лавуазье (1790 г.) известны уже 18 металлов. Сейчас таблица Менделеева заполнена, пустых мест там больше нет, и мы знаем все 70 металлов таблицы. Очевидно, это – окончательный итог.

Древние агрегаты работали как на естественной тяге, так и при нагнетании воздуха мехами. В древнем Египте примерно 3 тыс. лет назад распространены были уже как ручные, так и ножные меха. Типичный металлургический агрегат (сыродутный горн-яма) на заре черной металлургии, видимо, часто представлял собою просто яму в земле, на дно которой через керамическую трубку подавалось дутье ручными или ножными мехами. Яму заполняли смесью руды и топлива и присыпали сверху землей, что защищало шихту от окисления внешним воздухом. После периода продувки яму вскрывали и извлекали крицу – спекшиеся куски металлизированного железа. В других случаях под дно ямы подводили воздушный канал с поверхности и, тем самым,

организовывали естественную тягу примерно так же, как организовывается тяга в домашних бытовых печах.

Со временем появилась футеровка, горн становился выше, горняму заменила горн-печь, потом домница, поставленная на пень-фундамент. В 11-15-м веках повышение температуры в печах привело к появлению чугуна и затем к формированию доменного процесса.

В средневековье дутье в горн-печь подают уже 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 построен завод на реке Исеть, положивший начало Екатеринбург. Сохранились полосы кричного железа, выкованные лично Петром I.

Мировой индустриальный металлургический цикл сформировался в эпоху индустриализации передовых стран, в 19-м веке. 19-й век и начало 20-го стали временем огромного количественного роста черной металлургии в связи с общей индустриализацией хозяйства передовых стран. 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 т в год.

Отметим, что основные труды классиков марксизма создавались именно в эпоху бурного роста металлургии, 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.

1.4. 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) не был внедрен или изобретен кем-либо; он появился самопроизвольно, а потом от него просто не смогли избавиться, хотя долго пытались это сделать. Исторически доменный процесс появился сам и был сначала неприятной неожиданностью для металлургов. Постепенная интенсифи-

кация продувки в старых сыродутных кричных горнах, в домницах, неизбежно вела 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. Чугун выбрасывали, называли свинским железом (по английски – «pig iron»); такой же смысловой оттенок имеет русский термин «чугунная чушка»).

Такой «доменный процесс» воспринимали как своего рода аварию, с появлением чугуна несколько столетий безуспешно боролись. Удалось приспособиться к такому процессу лишь в 14-м веке. Предоставили печам давать металл, «какой уж сам получится», и нашли ему применение в литье. В результате в 14-м веке было отлажено литье из чугуна ряда металлоизделий, в частности, пушечных ядер, а позднее и самих чугунных пушек. Чугун стали получать специально, и в 14-15-м веках сформировался, отлачился почти современный вид доменной плавки [7, 8].

Жидкий металл в домне с самого начала, с 14-го века, приходилось выплавлять по принципу «уж какой сам получится, там посмотрим, можно ли его куда-то применить». При таком подходе, естественно, получался металл, предельно насыщенный углеродом – чугун. К сожалению, этот принцип доменной плавки по традиции сохраняется и сейчас, а доведение металла до нужного состава перекадывается на дополнительный сталеплавильный процесс, хотя при современных знаниях можно и нужно уже в шахтной печи получать сталь, или, по крайней мере, полупродукт, близкий к стали.

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.

Так как реагенты смешаны, все реакции идут одновременно, то и сейчас при попытке повлиять на какую-то реакцию в домне возникает много непредвиденных следствий по всем другим реакциям. Так как в домне *все взаимосвязано*, то обычно считаются безнадежными попытки избирательного влияния на нужный процесс.

В результате сложилась своеобразная доменная идеология испуганного смирения перед доменным процессом, как перед явлением природы, почти непознаваемым и почти неуправляемым, которое мы не мо-

жем изменить, а можем лишь приспособиться к нему. Такая идеология напоминает средневековые религии; тогда обычно любая идеология получалась похожей на религию. Важнейшей задачей доменщиков стало поддержание, тщательное оберегание установившихся проверенных и сравнительно безопасных режимов процесса, недопущение значительных отклонений от этих режимов. Тем более недопустимыми представляются эксперименты с огромными современными домнами. Metallурги хорошо знают, что в ответ на предложение любых существенных изменений *доменщики взвоят и скажут, что это будет уже не доменный процесс.*

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 можно было почерпнуть лишь из редких пергаментов. В предыдущие «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]).

Вполне естественно, что при таком уровне знаний раннего средневековья сложилось отмеченное отношение к доменному процессу как к чему-то неизменному, почти непознаваемому и почти неуправляемому, данному свыше. Примерно так воспринимается явление природы, с которым мы не можем бороться и которое мы не можем изменить, а можем лишь приспособиться к нему. Тогда было ясно, что бессмысленно анализировать или критиковать доменный процесс, его не удастся изменить, от него не удастся избавиться, с ним надо сжиться, смириться.

В средневековье попытки трезвого анализа положений религии подлежали жестокому наказанию уже за то, что они оскорбляли чувства верующих. Критический анализ доменного процесса также был психологически недопустим, независимо от его содержания.

Эта идеология-религия, это испуганное смирение перед опасными капризами домны и сейчас является главным препятствием, не позволяющим внести очевидные назревшие улучшения в шахтную выплавку металлов. И сейчас критика доменного процесса нередко воспринимается как *бессмысленная*, или даже как некое святотатство, кощунство, как *грех*, подобно критике Священного Писания. Такие идеологии, как и религии, очень устойчивы и сохраняются многие столетия, даже в эпоху точного естествознания и научно-технического прогресса.

Усилия доменщиков сосредотачиваются на поддержании отлаженных режимов процесса, на тщательном оберегании этих режимов, на борьбе с опасными капризами печи, и предложения серьезно изменить процесс представляются уже просто нереальными, оторванными от действительности, неразумно опасными. Распространено убеждение, что из попыток изменить процесс *все равно ничего не получится*.

Поэтому доменный процесс качественно не изменился за многие столетия своего существования, а традиция смешивания кусков руды и топлива сохраняется все 6 тысяч лет существования металлургии. Отметим для сравнения, что сталеплавильный процесс, не обремененный древней идеологией, успел возникнуть и несколько раз качественно усовершенствоваться за два последних столетия. Пудлинговые печи 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 кричной и доменный; они были изобретены и сознательно внедрены уже в научную эпоху, за два последних столетия. Здесь нет средневековой идеологии, которая не приемлет анализ и критику, поэтому такие процессы сравнительно быстро изменяются. Но неизменной остается доменная плавка на металл, «какой уж сам получится», на чугун. Совершенствуется то, на что не распространяются запреты древней идеологии; неизменным и архаичным остается то, что запрещает изменять идеология. Вместе с этими неизменными принципами сохраняются и обсуждаемые несообразности металлургического цикла.

1.5. Принцип «доменный процесс незаменим!»

Когда резко изменялись условия производства, каждый раз торжествовал принцип «доменный процесс незаменим!». Металлурги каждый раз не решались отойти от традиционного вида 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. В результате к настоящему времени в цикл добавился целый ряд переделов.

В 11-15-м веках, когда возникал и формировался доменный процесс, металлурги не могли осознать тот факт, что если в чугуна понизить содержание углерода, то мы получим готовый конечный продукт, сталь, более прочную и более ценную, чем чугун. Когда не было книгопечатания и письменных знаний, когда не было химии, а была лишь алхимия, не могла возникнуть идея о превращении чугуна в сталь путем понижения концентрации углерода. Это представление стало вполне ясным лишь в 18-м веке (например, у Лавуазье), когда химия достигла значительного развития. Работали окислительные кричные горны, в которых чугунные отливки при длительной выдержке приближались по составу к стали и становились более прочными, менее хрупкими.

Получение жидкой стали из чугуна было отлажено лишь в конце 18-го и в 19-м веке, сначала в «тестообразном» состоянии в пудлинговых печах (Г. Корт, 1784 г.), а затем в бессемеровских конвертерах (1855 г.)

Можно было искать такое видоизменение доменного процесса, при котором металл не переуглероживался бы в домне, жидкая сталь получалась бы сразу в шахтной печи, одним переделом. В традиционном доменном процессе металлизированные куски руды получают и плавятся в коксовой засыпке, расплавы фильтруются через слой кокса, насыщаются углеродом, и, естественно, получается чугун. В упомянутом каталонском процессе [7, 8] топливо и руда засыпались в агрегат отдельно, металлизированные спекающиеся куски руды, а затем спекшаяся крица железа получалась не в угольной засыпке, а 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 в этот раз предпочли сохранить доменный процесс неизменным, по-прежнему получать в домне металл, *какой уж сам получится*, а для исправления переборов и промахов домны, для выплавки стали ввели новый дорогой сталеплавильный передел.

Когда потребовалось от кусковых руд перейти на концентраты, можно было отлаживать вдувание порошка концентрата в домну. Такое вдувание концентрата сделало бы ненужным его окускование, которое

достаточно дорого; цена окускования нередко составляет больше половины всей стоимости доменного рудного сырья и больше четверти стоимости чугуна. Агломерация или производство обожженных окатышей из концентрата обходятся, с учетом затрат на топливо, обычно дороже, чем сам доменный процесс, взятый без стоимости сырья.

Вдувание концентрата было тем более реально из-за того, что доля концентрата долгое время была невелика по сравнению с долей кусковых руд, и концентраты можно было использовать как малую добавку в сырье. Теперь становится понятно, что процессы инжекционной металлургии (вдувания порошков) вообще очень перспективны. Применение приемов инжекционной металлургии при предлагаемой последовательной продувке рассмотрено в главе 4.

Если порошок железорудного концентрата металлизовать, то его можно использовать дальше для прямого получения металлоизделий путем прессования-спекания, то есть методами порошковой металлургии. Получается металлургия твердого тела вообще без плавления материалов. По оценке Р. Тэлмеджа [18], такая металлургия была бы примерно в 5 раз экономичнее современной металлургии по энергозатратам. Рассмотрение этих возможностей – задача главы 7.

Однако металлурги и в этом случае предпочли оставить доменный процесс неизменным, хотя для этого 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 и для спекания концентрата искать способ, подобный доменной продувке. Но потоки доменного дутья унесли бы порошок концентрата с колошниковыми газами. Поэтому применили продувку сверху вниз, при которой дутье не уносит порошок концентрата, а лишь прижимает его к аглоленте, к «постели». Так как порошок имеет малую газопроницаемость, пришлось вести продувку в сравнительно тонком слое; так получился современный процесс агломерации.

Как отмечено выше, доменный процесс возник, явился сам, самопроизвольно. Попытки избавиться от него оказались неудачными, и с ним смирились, как с неким неизменным явлением природы. В домен-

ном процессе законсервированы и освящены, закреплены идеологией заблуждения многих веков. При внимательном рассмотрении в этом процессе видны особенности древнего ремесла, не преодоленные влияниями научного периода. Несообразности нашей металлургии в целом сложились с древности, под влиянием многих исторических случайностей.

Регулирование схода шихты заплечиками, неустойчивое движение материалов с чередой спеканий и обрушений стало результатом трех прошлых веков, убеждение в преимуществах двустадийного процесса – от 18 и 19-го веков. Совместная продувка существует на протяжении всей истории металлургии, а получение металла, «какой уж сам получится», закрепилось в 11-14-м веках. В донаучную эпоху эти принципы освящались, закреплялись доменной идеологией и воспринимались как естественные, неприкосновенные, почти как Священное Писание.

При этом рискованные эксперименты с огромной доменной печью недопустимы. Освоение нового процесса в металлургии требует большой работы и больших затрат, связано с риском неудач и даже аварий. Поэтому принцип *доменный процесс незаменим* удобен еще и тем, что освобождает от необходимости трудиться в этом направлении и рисковать.

По своему основному содержанию доменный процесс сводится к восстановлению окислов железа углеродом, к простой реакции, которая обеспечивается теплом за счет горения того же углерода топлива. В современных химических технологиях, которые возникли уже в научную эпоху, подобные реакции обычно тщательно оптимизированы. Здесь практически невозможны такие резкие противоречия с простыми требованиями термодинамики, такие большие потери химической энергии (в 2-3 раза) и такая неуправляемость процесса. В современных технологиях нелегко найти и такое неустойчивое движение материалов под действием столь неопределенных капризных сил, как трение в спекающихся массах. Одно из основных направлений в развитии современной техники – это как раз освобождение от сил трения, переход к таким условиям, где эти силы несущественны, а движение описывается точными уравнениями (подробнее эти вопросы обсуждаются ниже, в главе 8). При последовательной продувке сход шихты может быть более устойчивым, а сам процесс – более управляемым. Обоснование этих положений – задача разделов 2.10, 3.3 в последующих главах.

В деталях и в частности 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*. Физико-химические исследования сосредотачиваются на деталях и частностях процесса, но *не допускаются идеологией* к решению центральных вопросов, к выбору принципа процесса. Остается утешаться лишь тем, что масштабы металлургии огромны, и в ней нет такой мелочи, которая не могла бы дать экономию в миллион долларов¹.

Программное обеспечение автоматического регулирования 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 «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, вырваться из той колеи, в которую нас поставили еще древние пещерные люди 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.

¹ Мировая выплавка стали в 2010 г. составила 1300 млн т, а ее стоимость приближается к величине порядка 1000 млрд долларов. Еще больше общая стоимость подобных процессов в цветной металлургии.

1.6. Доменная идеология

Да, тут явно виноват, так
называемый, человеческий фактор.
С. А. Красиков

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. Потребовалось готовить топливо и рудную компоненту, кокс и окатыши в виде прочных, пористых кусков, устойчивых к истиранию, к термическим воздействиям и др. Потребовалось вводить, в частности, более высокотемпературные режимы обжига сырья при температурах, приближающихся к температуре самого доменного процесса. Приходится идти на значительное удорожание подготовительных процессов ради высоких показателей домны, на удорожание сырья. Кокс стоит в 2-6 раз дороже угля, обожженные окатыши также обычно дороже концентрата в два раза и более. Часто больше половины стоимости чугуна обусловлено тем, что для домны требуется готовить хорошо окускованное сырье.

В современной большой доменной печи высота столба шихты достигает, например, 30 метров. Куски шихты должны пройти путь от колошника до горна без разрушения и образования мелочи в условиях интенсивной продувки, при резких термических, химических и механических воздействиях, при пересыпании, истирании и др. Высокая прочность кусков шихты позволяет реализовать в шахте печи хороший теплообмен поднимающихся газов и опускающейся руды на противотоке. Газы охлаждаются на этом пути в шахте, например, от 1400 °С в горне до 200 °С под колошником, а окатыши и кокс за счет тепла газов нагреваются от 0 °С до 1200 °С. В горн и прилегающую высокотемпературную зону, которые служат «реактором» печи, шихта поступает, например, с температурой 1200 °С и приносит в горн иногда даже больше физического тепла, чем дает горение топлива (расчёты 1 и 2 приложения). Это – одно из важнейших преимуществ домны.

Очень эффективен был бы такой агрегат, который обеспечил бы утилизацию тепла отходящих газов без дорогостоящего окускования сырья. Цель главы 4 – показать, что такую задачу можно решить, если вести металлизацию концентрата в смеси с угольной пылью в виде пылегазовой взвеси в рекуператоре или в теплообменнике.

Высокие показатели доменного процесса достигаются также и за

счет того, что он берет себе работу со сравнительно низкотемпературными и неагрессивными расплавами; работа с более высокотемпературными и химически агрессивными железистыми шлаками перекладывается на последующий сталеплавильный передел. Жидкий металл в домне с самого начала, с 14-го века, выплавляли по принципу «уж какой сам получится, там посмотрим, что с ним делать». По этому же принципу и сейчас доведение металла до нужной концентрации углерода перекладывается на последующую переработку. Показатели домны повышаются также за счет глубокого и дорогого обогащения руды, а также за счет обогащения коксующегося угля.

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. Если же мы отладим отопление шахтной печи полным сжиганием угля, сделаем тепло горения в 10 раз дешевле, то удаление пустой породы ее переплавкой в домне станет намного дешевле, и можно понизить требования к обогащению и удешевить его.

Например, нетрудно было бы переплавить не 10 % шлака по отношению к металлу, а 30 %, то есть принять втрое менее глубокое обогащение. При полном сжигании топлива расчетный расход углерода вырос бы при этом с 204 до 212 кг на тонну металла, то есть не очень существенно, на 8 кг/тонну (расчет 9 приложения).

Если в средневековой металлургии цикл часто состоял практически из одного кричного передела, подобного доменному, то к настоящему времени в результате описанной эволюции 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, например, 4-8 операций нагрева – охлаждения.

В средневековом кричном процессе получали крицу в горне и затем ковали ее до изделия за один передел, за одну операцию «нагрев – охлаждение». При этом нагревали материалы до невысоких температур, порядка 800-900 °С. Современный цикл включает 4-8 операций «нагрев – охлаждение», 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 энергоресурсов и при множестве программ энергосбережения.

Стоимость самой доменной плавки (расходы по переделу в домне) может составлять, например, 5 % от себестоимости (или цены) стали, 10 % себестоимости чугуна или даже меньше. Так, в примере калькуляции себестоимости чугуна [8, с. 524], расходы по доменному переделу составляют 8,2 %, в примере на стр. 526 – 9,9 %. Порядка 90 % себестоимости чугуна составляет стоимость железорудного сырья и топлива (например, 53,5 % и 38,3 % соответственно [8, с. 524]. Эти 53,5 % и 38,3 % (в сумме 91,8 %) складываются в основном из цены подготовительных переделов: коксования угля, агломерации или производства окатышей, обогащения, иногда еще дополнительных процессов обжига руды и известняка и др. Стоимость сырья увеличивается из-за того, что не все руды и далеко не все угли пригодны для домны; приходится выбирать более дорогое 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; цена стали часто примерно вдвое больше цены чугуна.

Таким образом, чтобы не вводить изменения в доменный процесс, а так же чтобы обеспечить высокие показатели его, за несколько столетий были 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.

Физически и технологически доменный процесс является главным в цикле; именно в домне происходит сам акт превращения руды в металл, основное химическое превращение всего цикла, восстановление окислов железа до состояния металлического расплава. Но физически

центральное положение доменного процесса, а также доменная идеология-религия, наша чрезмерная преданность домнам часто мешают вполне осознать тот факт, что порожденные им вспомогательные подготовительные и доводочные процессы в сумме теперь уже намного дороже самой доменной плавки (например, в 20 раз).

Сейчас можно на новом научно-техническом уровне вернуться к вопросам выделения из доменного процесса ряда переделов. Можно ввести в доменный процесс соответствующие коррективы, которые было немислимо внести раньше, при средневековом испуганном смирении перед этой капризной плавкой, и убрать ряд «лишних» переделов, добавленных когда-то ради сохранения доменного процесса в неизменном виде, а также понизить требования к другим переделам.

Сейчас мы знаем достаточно для того, чтобы в основном предвидеть те следствия, к которым приведут изменения, и наша боязнь таких изменений является следствием лишь идеологических предрассудков, следствием нашей «зацикленности» или «зашоренности» на доменной идеологии, на боязни нарушить давние традиции, давние «табу», а также на боязни вмешаться в этот пугающе-капризный процесс. Если сохранение несообразностей цикла простительно средневековым металлургам, то непростительно нам.

1.7. Психологические сложности

Что же, металлурги все дураки, что ли?!

Реплика студента

Отметим, что анализ влияний доменной идеологии – это сложное и часто неблагоприятное занятие. Такие разделы книги часто воспринимаются как досадные посторонние вставки в научно-технический текст. Тем не менее, эта работа здесь необходима, влияние идеологии часто оказывается решающим. 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 несообразности оставаться сейчас неосознанными при современном уровне знаний? Если устранение несообразностей так просто, то почему этого никто не сделал? Эти вопросы формулируются иногда даже в такой форме: «что же, металлурги все дураки, что ли?» и т. д.

Оставаясь в рамках идеологии, мы можем отважиться лишь на то, чтобы механизировать обслуживание доменного процесса, интенсифицировать, оптимизировать, автоматизировать процесс древних металлургов, совершенствовать этот процесс в частностях, но не решаемся выдвинуть свой принцип, свой процесс получения металла, отличный от древней продувки рудо-топливной смеси. Технический прогресс быстро и неизменно изменяет оснащение процесса, то есть то, что существует вокруг процесса, но не затрагивает самого его принципа.

Если же мы освобождаемся от давления идеологии, выходим за ее рамки, быстро находят эффективные решения старых проблем.

Вследствие упомянутой почти «религиозной» преданности доменному процессу, вследствие чрезмерной веры в него, мы не вполне сознаем его несообразности. 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. В соответствующих публикациях внимание сосредотачивается на том, что теплотехнические показатели домны лучше, чем у других металлургических агрегатов.

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 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 выигрышные для домен факты, хотя они могут и не оказывать сильного влияния на общую конечную экономичность производства металла.

Как говорят в подобных случаях психологи, давление устоявшейся идеологии не позволяет вполне ясно осознать факты, противоречащие этой идеологии. 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.

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 находят простые решения старых проблем.

Характерные обороты или ключевые слова дискуссии 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*. Металлурги привыкли к тому, что если предложить любые существенные изменения, то *доменички взвоят ... и т. д.*

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 существующего. Психологически труднее внести хотя бы небольшие изменения в принцип существующего процесса, хотя бы несколько иначе перегруппировать его отлаженные элементы, так как в этом случае требуется затронуть его идеологию.

Характерно, что сравнительно быстро прогрессируют процессы получения металла, идейно далекие от доменного. Совершенствуются такие процессы, как «Корекс», «Ромелт», автогенная плавка меди, получение порошка железа методом «Циклон», «Фаст драйв» и другие способы металлизации на поду кольцевой печи, во вращающейся печи, даже плазменные технологии получения металла.

В перечисленных новых производствах почти не удается использовать выигранные, отлаженные столетиями элементы доменного процесса, его богатейший опыт, не удается сохранить отмеченные преимущества домны и приходится 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.

Но если освободиться от давления идеологии, то можно устранить несообразности основного процесса за счет сравнительно простой и сравнительно небольшой перегруппировки известных и хорошо отлаженных элементов, сохраняя преимущества домны.

Отметим, что сравнительно быстро прогрессирует также производство уникальных сталей и сплавов, у которых резко повышено определенное свойство (или свойства). Потребность в таких сплавах возникает при развитии новых областей техники; производятся они часто в небольших объемах. Что касается производства основной массы металла, то нередко считается, что здесь за многие десятилетия и столетия все отлажено, окончательно устоялось, и ничего серьезно нельзя изменить. Часто считается также, что разработка уникальной стали более престижна, чем анализ выплавки рядовой стали, который пренебрежительно называют *работой по ширпотребу*.

Глава 2

ПОРОКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЦИКЛА

2.1. Порок № 1 – неполное сжигание топлива

Экономическая смерть ждет предприятия,
которые разбазаривают энергоресурсы!
И прокуратура ими займется!

Губернатор Э. Россель

Рассмотрим подробнее упомянутые пороки металлургического цикла. Первым пороком можно считать тот факт, что в домне, в восстановительной атмосфере, топливо удается сжечь в основном лишь по первой стадии горения, до СО, как в газогенераторе, так как газы до конца своего пути, до колошника, контактируют с кусками топлива. Углерод, будучи всюду в избытке, окисляется преимущественно до СО, а не до СО₂. Но теплота горения углерода по первой стадии, до СО ($\Delta H_{298} = 110$ кДж/моль) в 3,56 раза меньше теплоты полного горения до СО₂ ($\Delta H_{298} = 395$ кДж/моль, данные термодинамических таблиц). На первой стадии горения углерода выделяется лишь 28 % тепла (110/395).

Еще меньше доля первой стадии для углеводородной части топлива. Чистый водород здесь практически вообще не горит. Если углерод выделяет на первой стадии горения (при избытке С) 28 % тепла, водород вообще не горит, то углеводороды занимают в этом отношении обычно промежуточное положение между углеродом и водородом и дают на первой стадии от нуля до 28 % общего тепловыделения. Для природного газа, то есть метана СН₄, теплота горения на первой стадии (или «конвертирования», окисления до СО и Н₂) составляет всего 4 % теплоты полного горения. Горение метана на первой стадии идет трудно, медленно, и в агрегатах «Мидрекс» этот процесс удается провести лишь с помощью дорогого узла с катализаторами реакции. Остальные 96 % тепла в принципе можно получить при дожигании газов, на второй стадии горения, если удастся дожигать газы в окислительной зоне. Поэтому вдувание в доменную печь природного газа, который состоит в основном из СН₄, приводит обычно к охлаждению горна и разогреву шахты печи, где происходит некоторое частичное горение по второй стадии.

Хотя в доменной печи реализуется некоторая доля полного сжигания, колошниковые газы содержат небольшие количества СО₂ и Н₂О, но получаемое тепло обычно оказывается все же меньше половины возможного. Если, например, колошниковые газы содержат 30 % СО и 10 %

CO₂, то получаемое тепло горения углерода в 2,2 раза меньше возможного. Если такое соотношение CO и CO₂, H₂ и H₂O получается при горении метана, то получаемое тепло почти в 4 раза меньше тепла полного горения. По данным [8, с. 242] о соотношении CO и CO₂ в колошниковых газах доля получаемого полного тепла горения α , которое дает печи горение углерода, получается от 36 до 57 % (расчет α наш).

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

Следует отметить, что в последнее время соотношение прямого и косвенного восстановления много обсуждается, и доля полного горения (доля CO₂) на лучших печах несколько повысилась. В ряде случаев печь получает несколько больше 50 % того тепла горения углерода, которое она могла бы получить при полном сжигании ($\alpha > 50\%$), по крайней мере, для углеродной компоненты топлива. Видимо, мы как-то продвигаемся в осознании данной несообразности процесса.

Если мы перейдем к отдельной продувке топлива и окатышей, то на второй части пути печные газы будут двигаться уже в слое одних лишь железорудных окатышей, не контактируют с кусками топлива, и, следовательно, эти газы можно дожечь практически полностью подачей дополнительного дутья. Мы получим в 2-3 раза большую теплоту сгорания топлива. Некоторые руды, особенно гематитовые, сами способны при достаточно высокой температуре окислять отходящие газы практически полностью до CO₂, если они не смешаны с кусками топлива. При контактировании газов с загруженными окатышами, которые содержат высшие окислы железа Fe₂O₃ и Fe₃O₄, при температурах 500-700 °C и выше, газы практически нацело будут окислены до CO₂.

Расчетный расход углерода на получение тонны металла получается равным 600 кг/т при горении до CO, и 200 кг/т при полном горении до CO₂ (расчёты 1 и 2 приложения). Правда, к этим значениям нужно прибавить еще расход топлива на отопление рекуператора (75 кг/т условного топлива). Если на заводе избыток доменного и коксового газа, то задача отопления рекуператоров решается просто.

В доменной печи горение топлива и восстановление окислов железа протекают совместно, хотя для металлизации нужна восстановительная атмосфера (избыток топлива), а для полного сжигания топлива требуется сильно-окислительная атмосфера, избыток кислорода дутья. При

последовательной продувке разделены зоны горения топлива и восстановления окислов, зоны окислительной и восстановительной атмосферы, и легче создать оптимальные условия для каждого процесса.

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. Велось обширные исследования по металлизации газом концентрата в порошке, в частности, в установках типа кипящего слоя [15]. Но уже во время энергетического кризиса 70-х годов цены на газ резко выросли, и эти надежды сильно померкли. Радикальным решением проблемы будет, очевидно, бескоксая металлургия на угле.

Отметим, что данная «несообразность номер один» современного получения металла (невозможность полного сжигания топлива и соответствующие потери «химического» тепла) часто остается не вполне осознанной, как это ни удивительно. Часто неправильно считают, что этот вопрос несущественен, так как полученные колошниковые газы можно дожигать в другом агрегате; но при этом упускается из виду тот факт, что теряется тепло, оплачиваемое *десятикратно*, а приобретает *ординарное* тепло. В других случаях потери химического тепла, видимо, осознаются, но воспринимаются как неизбежные, поэтому их обсуждение считается бесполезным.

Как уже отмечено, оценки потерь химического тепла в домне обычно не доводятся до конкретных числовых значений. Нам не встречалась в литературе четкая констатация того факта, что тепло горения в печи в 2-3 раза меньше тепла полного горения, и это тепло примерно в 10 раз дороже, чем в паровом котле или в хорошей угольной топке. Хотя о преимуществах косвенного восстановления и о соответствующей экономии кокса написано много, давление идеологии и здесь не позволяет вполне осознать величину потерь. В соответствующих публикациях внимание часто сосредотачивается не на оценке потерь в домне, а на

подчеркивании преимуществ домен перед 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.

Часто мы не осознаем в полной мере значение этого фактора – усвоения тепла дожигания газов. В агрегате типа домны расчетный расход топлива изменяется втрое: от 200 до 600 кг/т в зависимости от полноты этого дожигания. Примерно в три раза изменяется и производительность печи при той же газопроницаемости.

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).

2.2. Обилие дешевого тепла – важнейшее условие успеха металлургического агрегата

Мы всё ищем правильный ответ,
но не находим нужного вопроса.

В. Высоцкий

Для нового металлургического агрегата часто решающим условием успеха являются теплотехнические преимущества, хороший тепловой баланс, обилие недорогого тепла в агрегате. Металлургические агрегаты часто работают около предельно достижимой температуры, и основные усилия тратятся на поддержание такой температуры, на обеспечение процесса теплом. Это несколько принижает значение физико-химического анализа отдельных металлургических реакций, который изучают в курсе теории металлургических процессов. Если обеспечен нужный 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.

Главные теплотехнические преимущества домен следующие:

1) Поступление большого количества тепла с горячим дутьем, например, при 1200 °С.

2) Утилизация тепла отходящих газов за счет их теплообмена с шихтой на противотоке. Газы покидают горн, например, с температурой 1500 °С, но к колошнику охлаждаются до 200 °С и уносят из печи немного тепла.

При этом ради утилизации тепла газов приходится готовить дорогое, хорошо окускованное 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. Второй недостаток – отмеченное неполное сжигание топлива и большие потери химического тепла.

Краткая формула хорошего агрегата для получения металла – это устранение двух отмеченных недостатков домны при сохранении двух названных преимуществ.

Сейчас много усилий тратится на бескоксовое получение чугуна. Можно называть это получением металла на неокускованном топливе. Использование неокускованной рудной компоненты почему-то не привлекает такого внимания, хотя экономически оно не менее или даже более важно.

Известны процессы, в которых поступаются отмеченными преимуществами домны, то есть используют холодное дутье (кислород) и не утилизируют тепло отходящих газов. Газы уходят с температурой металлургической ванны, например, 1500 °С. Выигрыш состоит в том, что используется неокускованное сырье почти с любыми физическими свойствами.

Так, жидкий металл можно получить из угля и руды в агрегате, подобном кислородному конвертеру, например, в процессе типа «Ромелт» [36]. При этом сырье просто засыпают на поверхность жидкой ванны с расплавами, например, в виде кусков руды и угля. Можно вдувать в расплавы порошки, можно работать с сырьем почти при любых его физических свойствах.

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

Возможны другие подобные процессы. В таких случаях отходящие газы покидают ванну с температурой этой ванны, например, 1500 °С, и уносят много тепла. Расчет расхода топлива в процессе можно провести по той же схеме, как и для домы (расчёты 1 и 2 приложения), но температура дутья будет не 1200, а 0 °С, температура отходящих газов – не 200, а 1500 °С. Эти изменения выражают утрату двух упомянутых преимуществ домы: горячего дутья и утилизации тепла газов.

При неполном горении до СО расчетный расход топлива и кислорода в таких процессах получается соответственно 2700 кг/т и 2240 нм³/т. (расчёт 3 приложения). Такой неприемлемо большой расчетный расход топлива и кислорода означает, что при неполном горении процесс практически неосуществим, тем более что есть еще неучтенные статьи расхода тепла. Здесь видно также, что преимущества домы действительно велики; в случае домы получался расход 600 кг/т, здесь – 2700 кг/т.

При полном горении углерода топлива до СО₂ расчетный расход топлива в процессе типа «Ромелт» получается 330 кг/т при 350 нм³ кислорода; для домы получалось 200 кг/т.

При полном горении расход топлива становится приемлемым, но практически такое горение не удается обеспечить, хотя для данных процессов это жизненно важно.

Даже после всех усилий по дожиганию отходящих газов и после определенных успехов в этом направлении расход топлива остается все же высоким, например, 780-1000 кг/т при 680-750 нм³/т кислорода [36]. Это соответствует по расчету примерно 30 % усвоения тепла дожигания (горения СО до СО₂). В доменной печи этот показатель часто около 25 %, а соотношение %СО₂/%СО = 1:3.

В зависимости от степени дожигания газов эффективность отопления агрегатов типа конвертера и расчетный расход топлива меняются многократно (с 350 до 2700 кг/т), а практически – почти на порядок величины. Если для домы часто остается не вполне осознанным значение дожигания газов, то при прогреве жидкой ванны большое значение этого фактора остается неосознанным еще чаще.

Такова дилемма: или мы выбираем дорогое хорошо окускованное сырье и переплавляем 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 неокускованное сырье (например, угольную пыль и концентрат), но одновременно обеспечивал бы и утилизацию тепла газов. Мы считаем, что «идеальным» в этом плане агрегатом может быть рекупера-

тор или теплообменник, в котором металлизуется пылегазовая взвесь концентрата и угольной пыли. Задача раздела 4.3 – обосновать это положение.

Если мы изобретаем новый процесс не «на пустом месте, с нуля» (как «Ромелт»), а получаем его перегруппировкой отлаженных элементов доменной плавки, то получаем возможность сохранить важнейшие преимущества домен перед другими существующими агрегатами – поступление тепла с дутьем и утилизацию тепла отходящих газов. 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 доменных печей твердо верить в то, что *доменный процесс незаменим, переживет тысячелетия* и снисходительно-иронически относиться к попыткам создания альтернативных способов получения металла. При устранении отмеченных несообразностей получился бы действительно эффективный процесс.

2.3. Замена кокса углем, доставляемым прямо в факелы

Все говорят о безкоксовой металлургии,
никто не говорит о металлургии
без окатышей и агломерата.

Из дискуссии

Многие требования к физическим свойствам доменного топлива отпадают, если топливо сжигать отдельно, в своей зоне. При отдельной продувке процесс можно организовать так, что от топлива потребуется лишь способность гореть до СО в факеле¹ дутья или в топливном слое. Топливо должно быть лишь пригодным к газогенераторному процессу, в котором и используется обычно кусковой уголь или угольная пыль.

¹ Для потоков доменного дутья в горне печи, которые исходят от фурм, и в которых горит кокс, мы применяем удобный краткий термин «факелы дутья». Многие исследователи применяют термин «факелы» лишь к таким устройствам, как топливные горелки, устройства дожигания лишних газов и др.

Отметим также, что в наших вопросах термины «окатыши» и «агломерат» употребляются практически как синонимы. Мы здесь не касаемся относительных преимуществ агломерата и окатышей.

Преимущества кокса по сравнению с углем становятся несущественными при высокотемпературном газогенераторном процессе. При последовательной продувке топливная зона работает как газогенератор, а зона рудной компоненты – как агрегат «Мидрекс» или скорее как агрегат «Корекс», в котором железорудные окатыши восстанавливаются не природным, а генераторным газом.

В одном и том же факеле, в топке или печи процесс может идти как на полное горение до CO_2 , так и на неполное горение до CO , то есть на газогенерацию. Если слой топлива не слишком толстый, продувание его интенсивное, то реализуется полное горение до CO_2 при избытке воздуха. При медленном продувании толстого слоя топлива, малой скорости дутья, а также в факеле при обилии пыли, газы долго контактируют с твердым топливом. В этом случае успеют пройти не только первичные процессы горения ($\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$), но и последующие процессы газификации ($\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$), и агрегат будет работать как газогенератор.

В доменной печи в потоке газа, исходящем от среза фурмы, на расстоянии примерно 1,5 м убывает содержание кислорода и нарастает содержание CO_2 , идет первичное полное горение кокса [8] при избытке кислорода. Если бы процесс оборвать в точке 1,5 м или несколько раньше, данный факел работал бы как топка. На следующем интервале примерно от 1,5 до 2,0 м убывает содержание CO_2 и нарастает концентрация CO ; если бы процесс оборвать в точке 2,0 м, мы получили бы газогенератор. Дальше начинаются процессы восстановления окислов железа, и последующая зона работает в основном уже как агрегат «Мидрекс», как восстановитель на газогенераторном газе¹.

Отличие домны от агрегата «Мидрекс» заключается в том, что углекислота CO_2 , появляющаяся при восстановлении окислов, тут же снова вступает в реакцию газогенерации ($\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$) с избыточным коксом.

Основной вопрос состоит в следующем: как, минуя шахту печи, доставить все топливо непосредственно в зону горения? Если мы отлаживаем такую доставку топлива прямо в газовые потоки факелов, которые исходят от фурм, то тем самым реализуется последовательная продувка топлива и рудной компоненты, становится возможным не только

¹ Для обычных домашних и бытовых печей характерен сравнительно большой поток воздуха при ограниченном количестве топлива. Получается полное горение со значительным избытком воздуха. Но если «скрыть» бытовую печь с недогоревшим топливом, резко ограничить приток воздуха, то и в ней пойдет газогенераторный процесс с выделением угарного газа CO , и около такой печи можно «угореть».

использование почти любого топлива, но и дожигание отходящих газов и полное использование в печи их химической энергии. В настоящее время, насколько нам известно, эта возможность часто остается неосознанной. Доменный процесс обычно воспринимается как незаменимый, и, соответственно, незаменимой воспринимается и загрузка кускового топлива сверху, в смеси с рудной компонентой. В этом случае практически незаменим и кокс.

Ниже рассмотрен ряд способов доставки кускового угля непосредственно в газовые потоки факелов. Еще одна возможность состоит в том, чтобы все топливо вдуть в печь через фурмы в виде угольной пыли. Такое вдувание пыли широко практикуется, но введение большей части топлива или всего топлива в виде пыли неприемлемо в современных печах; без разрыхляющего действия кокса получится чрезмерное спекание и зависание шихты. Избыток пыли в домне часто приводит также к засорению и сгущению шлака.

Заменяя кокс другими видами топлива, уже сейчас удается снизить его расход в домне в некоторых рекордных случаях до 300, иногда до 250 кг/т. Доменщики часто считают, что больше уже просто не о чем и мечтать.

Конечно, часть «химического тепла», не полученного в доменной печи, можно получить при дожигании доменного газа в каком-то другом агрегате, например, в рекуператоре, и использовать в следующем цикле на нагрев дутья. Однако образующийся недостаток тепла в самой печи приходится компенсировать неполным сжиганием дополнительного дорогого кокса, что в 10 раз дороже. Недостаток тепла приходится *оплачивать в десятикратном размере*.

Обычно в каждом процессе более важным и более дорогим оказывается высокотемпературное тепло, выделяемое при высоких температурах. Низкотемпературное тепло, которое идет на предварительный подогрев дутья и материалов, можно получить многими способами, высокотемпературное тепло в домне получается лишь за счет горения топлива, и лишь за счет неполного горения углерода, но не водорода. Нагрев материалов на каждые 100 °С обходится при высоких температурах дороже, а выше определенной температуры такой нагрев вообще невозможен. При любом расходе топлива не удастся превысить определенную предельную температуру, добавить материалам дополнительное тепло. Можно сказать, что здесь, при предельных температурах, цена дополнительного тепла стремится к бесконечности.

В домне её «реактор», то есть горн, получает дешевое рекуператорное тепло с дутьем при температуре около 1200 °С. Дешевое тепло

получается и с нагретой газами шихтой, которая подходит к горну также с температурой порядка 1200 °С. Нагрев материалов от 1200 до конечных значений 1400-1500 °С, их плавление и обеспечение теплом реакций восстановления идет в основном за счет дорогого высокотемпературного тепла горения топлива. Скорость реакций и всего процесса определяется в основном интенсивностью выделения высокотемпературного тепла горения топлива в горне. Поэтому получение большего тепла горения топлива более важно, чем экономия низкотемпературного тепла. Поэтому все говорят об экономии кокса, и почти никто не говорит об экономии топлива рекуператора (доменного газа и др.), или об экономии рекуператорного тепла.

Когда составляется общий тепловой баланс плавки, все слагаемые общего тепла выступают как равноценные; теряется различие *ординарного* низкотемпературного тепла и высокотемпературного, оплачиваемого в *десятикратном* размере. Это затрудняет осознание особой ценности высокотемпературного тепла горения топлива.

Хотя рекуператорное тепло, вносимое в печь с горячим дутьем, часто превышает тепло горения кокса (расчёт 1 приложения), но в калькуляциях себестоимости чугуна расходы на отопление рекуператоров часто даже не упоминаются, а всесторонне, тщательно и детально рассматриваются возможности экономии кокса. Наши расчеты расхода топлива на получение металла (см. приложение) также выполнены без учета отопления рекуператоров. Такое отопление соответствует расходу примерно 75 кг углерода или условного топлива на тонну металла.

Когда впервые ввели подогрев доменного дутья, то большое удивление доменщиков вызывал тот факт, что экономия топлива в печи оказалась намного больше, чем расход топлива на нагрев дутья [7, 8]. Этот факт много и детально обсуждался, анализировался, было разработано несколько вариантов его объяснения.

В рекуператоре, где цель горения – лишь нагрев кирпичной кладки, ничто не мешает сжигать топливо полностью, как в угольной топке. Задача отопления рекуператоров решается просто, если на заводе избыток доменного газа. В рекуператоре можно сжигать также не *металлургическое* топливо, а более дешевое, так называемое *энергетическое* топливо с повышенным содержанием золы, серы и других примесей, вредных для металла.

2.4. Несообразности печей обжига

Но разве могут такие очевидные вещи оставаться неосознанными?!

А. М. Потапов

Обсуждаемые несообразности еще яснее видны в случае более простых печей, например, у шахтных печей для обжига руды, сидерита, известняка и др. Такие печи созданы по образцу домны и унаследовали ее пороки. Печь загружается, например, смесью кусков известняка и кокса и отапливается, как и домна, неполным сжиганием кокса. Как и домны, эти печи можно отапливать в 10 раз дешевле полным сжиганием угля, в частности, сжиганием угольной пыли в факелах дутья. В таких печах, в отличие от домны, всюду допустима окислительная атмосфера, поэтому угольную пыль можно уже прямо в факелах сжигать с избытком воздуха, то есть до CO_2 . Не требуется подавать дополнительное дутье на дожигание газов. Правда, убирая кокс из шахты печи, мы немного уменьшим теплоемкость потока опускающихся твердых материалов, а значит и утилизацию физического тепла отходящих газов. Однако соответствующие потери невелики.

В схеме процесса факелы с угольной пылью при недостатке воздуха эквивалентны газогенератору, а при избытке воздуха – угольной топке¹. Если обогревать такую печь, вдувая в нее горячие продукты горения из угольной топки, то и это отопление будет примерно в 10 раз дешевле современного. Можно обогревать такую печь, вдувая в нее горячий воздух из рекуператора, как доменное дутье; даже такое экзотическое отопление будет значительно дешевле современного².

¹ Пока внутри России природный газ сравнительно дешев, целесообразным оказывается и переход на отопление обсуждаемых печей обжига газом, так как газ можно сжигать полностью до CO_2 и H_2O . Но в перспективе и в печах обжига отопление газом должно уступать место отоплению углем, подобно тому, как это происходит в теплоэнергетике. Как известно, принята широкая программа Правительства РФ по замене газа углем на теплоэлектростанциях, предусмотрены крупные капиталовложения – десятки миллиардов долларов.

² Если вместо кокса использовать уголь и полученные в печи газы, содержащие CO , дожигать в каком-то другом агрегате, то как будто бы устраняются все потери. Но практически такой газ, подобный доменному, является неудобным низкокалорийным топливом, и в холодном состоянии он пригоден лишь для получения малоценного низкотемпературного «ординарного» тепла.

В обжиговых печах последних конструкций часто предусматривается уже использование отходящих газов в каких-то других агрегатах. Раньше эти газы обычно просто дожигали в факелах.

В доменной печи обсуждаемые пороки несколько завуалированы многообразием и определенной сложностью процессов; в печах обжига они видны уже вполне явно. Например, при обжиге карбоната требуется лишь прогреть шихту до температуры разложения порядка 900 °С. Здесь необходимость кокса нельзя обосновать его прочностью, пористостью, реакционной способностью, противодействием спеканию, разрыхлением шихты и другими аргументами, которые обычно приводят доменщики в пользу кокса; все эти качества в данном процессе несущественны.

Лишь в последнее время трудно, медленно и с большими колебаниями начинается работа по частичной замене кокса углем в таких процессах обжига [25, 26], и в некоторых печах обжига планируется полная замена кокса углем [32]. Другими словами, робко и непоследовательно начинается работа по устранению порока № 2, но даже в простых печах обжига остается нетронутым порок № 1 – неполное сжигание твердого топлива.¹

Если при обжиге карбонатов (сидерита, известняка и др.) горение идет лишь до СО, и выделяемая карбонатом углекислота СО₂ при избытке углерода еще проходит газификацию ($C + CO_2 = 2CO$), то получается еще дополнительное поглощение углерода и тепла (175 кДж/моль) на газификацию. Поэтому в таких процессах «порок № 1» (неполное сжигание топлива) приводит к еще большим потерям, чем в домне. При горении до СО₂ расчетный расход углерода топлива на тонну извести составляет 130 кг/т, а при неполном горении до СО – 1180 кг/т, почти в 10 раз больше (задача 8 приложения). Если кокс в 3 раза дороже угля, то стоимость отопления такой печи будет уже примерно в 30 раз дороже «ординарного» отопления ($10 \cdot 3 = 30$).

В обычном варианте обжиговой печи обсуждаемый порок выглядит уже прямо-таки *вопиющей несообразностью*. Она настолько очевидна, что бросается в глаза, но, тем не менее, столетиями остается неисправленной, а обычно и неосознанной, в основном по идеологическим и психологическим причинам, из-за давления идеологии. Как отмечено выше, психологи в подобных случаях говорят, что мы проявляем идеологическую *поразительную слепоту* по отношению к таким несообразностям.

¹ Были случаи, когда дефицит кокса или коксующегося угля на Урале приходилось 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.

Если с такими фактами встречаются исследователи «со стороны», физхимики или химики, не пропитанные металлургической идеологией, то они часто говорят, что такого просто не может быть. Современные химические технологии созданы недавно и не обременены идеологией средневековья и древности. В современных химических технологиях такие огромные потери просто невозможны; обычно там выполняется тщательная минимизация затрат энергии, например, с точностью до процента [40]. Химики говорят, что если очевидные, казалось бы, улучшения не делаются, то, значит какие-то Большие Специалисты знают, что этого нельзя делать по тем или иным причинам. Вероятно, кто-то обсуждаемые изменения глубоко проанализировал или даже опробовал, и убедился, что они непригодны; если бы улучшения были так просты, их бы давно сделали и др.

Но в действительности мы просто не решаемся нарушить доменную идеологию-религию, традиции совместной продувки компонентов, которые установились в древности, и очень укоренились за прошедшие столетия и тысячелетия. Когда, наконец, осмелились начать замену кокса коксоподобным углем (сначала на несколько процентов), то выяснилось, что ничего страшного при этом не происходит.

Люди давно изобрели способ видеть, но не осознавать *вопиющие несообразности* в разных областях, или даже вообще не замечать их. Этот способ – идеология. Психологи и философы многократно отмечали и подробно разбирали случаи общей «поражительной слепоты» по отношению к фактам, которые противоречат какой-то господствующей идеологии, будь то социальная, религиозная, философская или научно-техническая идеология [12, 19]. В подобных случаях «документ против идеологии бессилён».

В частности, много обсуждалась упомянутая *поражительная 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.

2.5. Оценки теплового баланса

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

Из дискуссии

Обилие дешевого тепла, хороший тепловой баланс обычно является решающим условием успеха и для других обсуждаемых или планируемых процессов получения металла. Многие предлагавшиеся процессы были с самого начала обречены на неудачу из-за недостатка тепла.

Расчетный расход углерода на получение тонны чугуна в домне составляет 200 кг/т при полном горении топлива до CO_2 и 600 кг/т при горении до CO (расчёты 1 и 2 приложения). Для агрегатов без подогрева дутья и утилизации тепла газов расчетный расход топлива составляет 330 кг/т при полном и 2700 кг/т при неполном горении. В последнем случае процесс практически неосуществим.

Как 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 нагревании жидкого металла, где расход топлива может изменяться из-за этих факторов почти на порядок величины.

Поэтому процесс Рюмина (получение стали из руды в агрегате типа мартеновской печи) практически был обречен на неудачу с самого начала. Уже простой короткий расчет (в одно действие) типа тех, что выполняются в приложении, может выявить неэффективность или даже невозможность ряда таких предлагаемых процессов.

При этом интенсивность продувки обычно определяется газопроницаемостью агрегата и остается примерно постоянной, поэтому увеличение удельного расхода топлива одновременно означает еще и уменьшение производительности агрегата.

В изобретениях, при проектировании других агрегатов часто внимание сосредотачивается на удобствах, на тех особенностях конструкции, которые позволяют удобно выполнять те или иные операции. Однако для конечной экономической эффективности агрегата основными и

решающими остаются те же показатели теплотехнической эффективности. И для печей Ванюкова, для агрегатов типа «Ромелт» или «Циклон», «Корекс», для топливных горелок в электропечи и других важнейшими остаются те же обсуждаемые вопросы:

1. Полнота сжигания топлива, то есть соотношение ($\%CO_2/\%CO$) и ($\%H_2O/\%H_2$) в отходящих газах.

2. Утилизация в агрегате физического тепла отходящих газов, обычно на основе противотока газов и шихты. Мерию утилизации служит температура T_0 отходящих газов. Именно для организации такого противотока и выполняется окускование сырья. Возможны случаи, когда целесообразно поступиться утилизацией физического тепла газов, чтобы не вести дорогое окускование.

3. Температура дутья T_d , поступление в печь дешевого рекуператорного тепла.

4. Температура выпускаемого металла T_M , и шлака $T_{ш}$, то есть величина потерь тепла печью с этими продуктами процесса.

В нашей упрощенной расчетной схеме тепловой баланс агрегата (см. приложение), его теплотехническая эффективность, оценивается именно этими четырьмя показателями: ($\%CO_2/\%CO$), T_0 , T_d , T_M .

Если нужно 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 тепловые балансы предназначены для детального скрупулезного анализа существующих агрегатов, когда важно оценить по возможности все, даже малые слагаемые теплового баланса. Имеющиеся балансы 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 – оценка расчетного расхода топлива в планируемом новом процессе, то удобно брать основные статьи баланса тепла, известные точно, а именно теплоты основных реакций и теплоты нагрева-охлаждения реагентов.

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). При этом допущении расчетный расход углерода в каждой

схеме процесса, а также теоретическая температура горения определяются легко и быстро, «в одно действие» (см. приложение).

Если, например, воздух поступает в печь с температурой 1200 °С, газообразные продукты отходят при 200 °С, полученный металл выдвигается с температурой 1400 °С, то расчетный расход углерода получается равным 200 кг на тонну железа при горении до CO₂ и 600 кг/т при горении до CO. При обычном горении топлива в домне на ¼ до CO₂ и на ¾ до CO получается расход 500 кг/т. Это близко к реальным показателям хороших печей.

Можно добавить в данный расчет, 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.

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.

Так, теоретическая температура горения углерода ΔT в холодном воздухе получается 740 °С при горении до CO и 1480 °С при горении до CO₂ (расчёт в приложении).

Аналогичная величина для основной реакции восстановления FeO + C = Fe + CO получается равной:

$$\Delta T = Q/n \cdot 3R = -40\,000/3 \cdot 3 \cdot 2 = -2200 \text{ °С.}$$

Отсюда следует, в частности, что если смесь недовосстановленных окислов с углеродом поместить в какое-то хранилище при 1000 °С, то она может там металлизироваться на 10 % за счет собственного тепла, остывая на 220 °С, от 1000 до 780 °С.

2.6. Обеспечение теплом ванны с расплавами.

Отопление сталеплавильных агрегатов

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

Из дискуссий

Практически та же проблема борьбы с неполным горением топлива (с «несообразностью № 1») возникает и при решении задачи обеспече-

ния теплом жидкой ванны с металлургическими расплавами, при анализе отопления сталеплавильных агрегатов.

Сейчас практически нет эффективных способов отопления сталеплавильных металлургических агрегатов, нет хороших способов прогрева жидкой металлургической ванны за счет горения топлива. Если бы сталеплавильный агрегат можно было отапливать хотя бы столь же эффективно, как дому, 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 всыпать или вдуть неокискованными и экономить на этом примерно половину стоимости чугуна.

Ванну 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, SiO₂, 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, например, 6 % металла улетает из печи в виде тонкой пыли. 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.

Если мы не умеем эффективно прогревать конвертерную ванну за счет горения топлива, если такое прогревание ванны все равно приходится вести за счет горения железа, то представляется более приемлемым то предшествующее перевосстановление, переуглероживание металла, которое традиционно происходит в домне. В этих условиях получает некоторое оправдание двустадийный процесс получения металла с переделом чугуна в сталь.

Если же мы отладим прогревание ванны горением топлива, то станут неразумными и перевосстановление металла в шахтной печи, и го-

рение его в конвертере. Разумнее уже в шахтной печи сразу получить сталь. Правда, сейчас не ясно, насколько трудно будет отладить в шахтной печи такое плавление металлизированной массы, чтобы получить точно заданный состав металла. Здесь принято получать металл, *какой уж сам получится*. Если в шахтной печи будет сложно «попасть в анализ», то можно получать полупродукт, по составу близкий к стали, а затем выполнять небольшую коррекцию содержания углерода и температуры в конвертере или в собственном выносном горне-отстойнике печи, или даже в ковше.

Возможности получения качественной стали, возможности рафинирования металла определяются тем набором операций, которые можно провести с расплавом в данном агрегате. Важно 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 кипение и дегазацию металла в определенном режиме, 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 свойств.

Отладка эффективных методов рафинирования стали представляется даже более важной, чем задача эффективного получения рядового металла¹. 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.

¹ Так, эффективность ракетных двигателей сильно зависит от того, насколько жаростойкие сплавы разработаны для них. Максимальная скорость военного самолета-истребителя 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. Для исследователей разработка уникальных сталей часто представляется также значительно престижнее, чем анализ старых методов выплавки рядовой стали или *ширпотреба*.

Так как процессы выплавки рядового металла отрабатываются давно, то значительные улучшения здесь часто считаются практически невозможными, и исследователи сосредотачиваются на выплавке той или иной уникальной стали, даже если она производится в небольших количествах.

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

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.

2.7. Возможности полного сжигания топлива

Если реагируют углерод и кислород, растворенные в металле, то горение углерода идет в форме кипения ванны. Горение будет практически на 100 % неполное, пузырьки кипения содержат лишь CO, но не CO₂. Такое же неполное горение будет и в том случае, когда газы дутья, омывающие расплавы, доходят до равновесия с углеродистым металлом. Горение углерода по первой стадии даст лишь 110 кДж тепла, или 28 % от 390 кДж тепла полного горения, которое было бы получено при окислении до CO₂. Такой же результат (28 %) получится и при горении угольной пыли, если ее вдуть с кислородным факелом. При этом теоретическая температура неполного горения ($2C + O_2 = 2CO$) составляет 2200 °С. Если газы уходят с такой же температурой, как и температура жидкого металла, например, 1500 °С, то они унесут $1500/2200 = 0,68$ или 68 % от данного тепла неполного горения. Ванна получит лишь остальные 32 процента ($100 - 68 = 32$ %). Но и все тепло неполного горения составляет лишь 28 % полного, поэтому в итоге ванна получит только

$$0,32 \cdot 0,28 = 0,09$$

или 9 % тепла полного горения. Как и выше (раздел 2.1) отопление получится примерно на порядок величины хуже оптимального, так как здесь горение неполное, как и в домне, но, кроме того, здесь нет еще и отмеченных выше преимуществ домны – прихода тепла с дутьем и утилизации тепла отходящих газов. Как отмечено выше, расчетный расход топлива на получение металла при таком отоплении оказывается неприемлемо большим – 2700 кг/т (расчет 5 приложения).

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.

В присутствии топлива или углеродистого железа дожигание газов возможно лишь в сильно неравновесном состоянии, при избытке кислорода. Требуется решать сложную (часто неразрешимую) задачу, организовывать такие условия обтекания газами обогреваемых жидких фаз, чтобы тепло реакции горения газов дошло до этих фаз, а продукты этой реакции (CO_2) в основном не достигли бы их поверхностей и не восстановились бы обратно топливом или металлом. Приходится добиваться такого обтекания фаз газами, когда теплопередача велика, а массопередача мала.

В мартеновской печи такая задача решается тем, что переходят к отражательной теплопередаче излучением, обеспечивают высокую светимость факела при неплотном контакте горизонтального факела со шлаком. Удастся прогреть ванну и при сравнительно небольшом ее окислении, хотя горение топлива в факеле достаточно полное. Однако скорость теплопередачи излучением мала, поэтому тепловая мощность агрегата невелика, и процесс оказывается медленным.

При высокой температуре металлургического агрегата, около 1200-1500 °С, равновесное соотношение ($\% \text{CO}_2 / \% \text{CO}$) составляет доли процента на границе с углеродом или с углеродистым металлом и 20-25 % на границе с железом, окисляемым до FeO (по реакции $\text{Fe} + \text{CO}_2 = \text{FeO} + \text{CO}$). Если обеспечивается плотный контакт с факелом, и реакция доходит до равновесия, то практически невозможно значительное дожигание CO в присутствии твердого топлива, возможно лишь на 20-25 % в контакте с безуглеродистым железом. Примерно такая доля полного горения около ($1/4$), реализуется в доменной печи; в колошниковых газах соотношение ($\% \text{CO}_2 / \% \text{CO}$) часто близко 1:3. В ряде случаев такое горение реализуется и в конвертере.

В агрегате «Ромелт», где специально организуют подачу кислорода сверху на дожигание газов, усваивается, видимо, около 30 % тепла полного дожигания.

Если газы топливного факела контактируют лишь со шлаком, то равновесное соотношение ($\%CO_2/\%CO$) в газах составляет около 90:10 при окислении в шлаке FeO до Fe_3O_4 . Поэтому достаточно полное (на 90 %) горение топлива возможно и при контакте факела с железистым шлаком, если только соотношение концентраций FeO/Fe_2O_3 не слишком велико, если концентрации закиси железа не превышает намного концентрацию окиси. Если же мы восстановим шлак почти до 100 % закиси FeO и начнем уже восстановление металла, то вернемся к примеру, рассмотренному выше, к равновесию Fe/FeO и доля полного горения составит 20-25 %.

Основная задача – достижение полного горения топлива – решается просто, если обогреваемые вещества не окисляются, не реагируют химически с газами факела, с CO_2 и O_2 . Неполное горение получается из-за того, что углерод или железо разогреваемых веществ восстанавливают обратно продукты горения, например, CO_2 до CO ($C+CO_2=2CO$).

Так, если топливный факел разогревает безжелезистый шлак, который химически инертен к газообразным продуктам горения, то их обратного восстановления не будет, топливо может сжигаться полностью. Так же можно нагревать шлак с высшими окислами железа, если создать окислительную зону в ванне. Аналогично загруженные, еще не восстановленные окатыши в шахтной печи можно прогревать полным дожиганием газов, например, в агрегате «Угольный Мидрекс», если в шахте нет топлива, если продувка не совместная, а последовательная, и в верхней части шахты организуется окислительная зона.

Если топливный факел «не пробивает шлак», контактирует лишь со шлаком, но не с жидким металлом, то, как правило, можно обеспечить достаточно полное горение. Возможно эффективное отопление в агрегате с такой циркуляцией расплавов, при которой топливный факел греет почти безжелезистый или окисленный шлак в одной зоне агрегата, а этот нагретый шлак затем перетекает в другую зону ванны, где и передает тепло металлу.

Плотный контакт факела с расплавами, высокую скорость теплопередачи можно обеспечить при вертикальном 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.

При кислородном дутье образуется небольшая зона очень высоких температур с интенсивным испарением материалов. Для отопления ванны лучше использовать 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.

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, CO_2 и CO в дутье, а при необходимости переходить даже и к восстановительному дутью с преобладанием CO .

При «доменном» дутье ванна агрегата будет прогреваться большим объемом газов с меньшей температурой; зона тепловыделения будет большего размера и не столь горячая. 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. Получится достаточно эффективное отопление ванны с расплавами. При таком отоплении возможен сталеплавильный агрегат, в котором можно выполнять длительные операции глубокого рафинирования стали.

При таком отоплении ванны в ней можно также эффективно получать металл из рудных материалов, которые просто засыпаются на поверхность ванны, и угольной пыли. Расчетный расход углерода составляет 330 кг/т при кислородном дутье и 310 кг/т при доменном дутье (расчет 5 приложения).

Если в шахтной печи получается полупродукт, близкий к стали, то в горне-отстойнике печи с таким доменным дутьем удобно выполнить небольшую коррекцию содержания углерода и температуры металла. Если отходящие газы из отстойника идут в шахтную печь на утилизацию, то его тепловой баланс будет уже очень хорошим. Можно экономично выполнять длительные операции глубокого рафинирования стали.

Отметим, что тепловой баланс обычного кислородного конвертера также стал бы намного лучше, если бы удалось подсоединить его к дом-

не и вводить в домну отходящие газы конвертера. Конвертер работал бы с тепловым балансом домны, что обычно в несколько раз эффективнее.

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 важным вопросом остается полнота сжигания топлива, дожигание отходящих газов и степень усвоения металлом тепла такого дожигания.

Так, в нагревательной печи факел движется над слоем заготовок металла; в факеле обеспечивается достаточно полное горение, но идет значительное окисление заготовок, и много металла уходит затем в окалину. Если поверх слоя заготовок (или даже на под рядом с металлом) насыпать слой кускового угля, примерно равный по толщине слою образующейся окалины, то удастся, очевидно, резко уменьшить угар металла. К тому же часть дорогого природного газа или мазута, сжигаемых в факеле, будет заменена более дешевым топливом – углем.

Если обеспечивается горение лишь по первой стадии (до CO), то угольная пыль намного эффективнее природного или коксового газа; доля тепловыделения первой стадии у метана CH_4 (4 %) в 7 раз меньше по сравнению с углеродом (28 %). К тому же, в отличие от природного газа, угольная пыль дает факел с высокой светимостью и с интенсивной теплопередачей излучением.

Если вместо угольной пыли сжигать в таком кислородном факеле природный газ метан (как в топливных горелках электропечи), то при неполном горении вместо нагрева мы получим уже интенсивное охлаждение ванны. Аналогично в домне вдувание природного газа приводит к охлаждению горна.

2.8. Порок № 3 - переуглероживание металла

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

Порок № 3 доменной плавки состоит в том, что печь выдает не готовую сталь, а чугун. Это тоже следствие смешивания руды с избытком топлива. В современной домне, как и в древних горнах или в домницах, при восстановлении получают металлизированные куски рудной компоненты в топливной засыпке; плавление такой смеси кусков железа и то-

плавки начинается в точках контакта кусков. Первичным продуктом плавления является самый легкоплавкий эвтектический расплав системы железо – углерод с температурой плавления около 1140 °С и с содержанием углерода примерно 4,3 %, то есть чугуна.

Во время формирования доменного процесса металл выплавляли по упомянутому принципу: «уж какой сам получится, потом посмотрим, можно ли его куда-то применить». Это было разумно при знаниях 14-15-х веков, но неразумно, что этот подход по традиции сохраняется и сейчас. Сейчас мы знаем, что вполне можно получить массу металлизированных окатышей с составом, близким к стали, и тогда плавление такой массы в шахтной печи сразу даст сталь (или полупродукт, близкий к стали и не требующий глубокой переработки).

При отдельной загрузке и последовательной продувке окатыши могут практически не контактировать с топливом, а восстанавливаться газами, поступающими из топливной зоны. В этом случае первичный металл будет малоуглеродистым. Его плавление при контролируемом поступлении углерода даст сталь, как и плавление в электропечах аналогичной массы, получаемой в агрегатах «Мидрекс». Если плавление металлизированных окатышей в основном корпусе печи даст значительные колебания содержания углерода и температуры первичного металла, то усреднение расплава, а также приближение его к химическому равновесию может выполняться в выносном горне-отстойнике. Если в горн-отстойник вынесены одна или две фурмы доменного дутья, то здесь же при необходимости можно выполнить небольшую корректировку температуры и состава металла для более точного «попадания в анализ». Коррекция состава возможна даже в ковше, как это делается в процессах электропечь – ковш.

Интересно, что в металлургии меди уже стихийно произошло, в сущности, такое же преобразование, которое здесь предлагается для металлургии стали. Классический способ получения черновой меди включал шахтную плавку кусковых сульфатов меди CuS в смеси с коксом; полученный расплав штейна (расплава CuS с примесями) 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.

Затем было замечено, что из некоторых руд можно получить медь методом инъекционной металлургии или методом «автогенной плавки», вдувая порошок медного концентрата в факел кислородного или воздушно-кислородного дутья. Горение серы из сульфатов CuS медной руды дает много тепла, поэтому в случае меди в факеле получался уже не

метализованный порошок, как в способе «Циклон», а сразу капельки чернового металла. Факел дутья с этими капельками меди можно вдуть в ванну с расплавами. По такому принципу кислородно-факельной плавки работает, в частности, печь в г. Алмалык.

Затем был осознан тот факт, что тот же процесс можно провести и с кусковой рудой в шахтной печи, причем шахтная автогенная плавка по тепловому балансу эффективнее инжекционной плавки. Как обычно, шахтная печь обеспечивает утилизацию тепла отходящих газов; из агрегата автогенной кислородно-факельной плавки эти газы уходят горячими (например, 1300 °С) и уносят много тепла. Можно в шахтную печь загрузить одни куски сульфата меди (Cu_2S , CuS) без кокса, и их продувкой сразу получить жидкий металл за счет тепла горения серы. В некоторых случаях возникал недостаток тепла, который покрывался увеличением доли кислорода в дутье или повышением температуры воздушного дутья.

Конечный итоговый результат ряда таких блужданий технологии состоял в том, что из шахты печи, в которой плавил медную руду (CuS), был убран кокс, и это позволило обжигом руды сразу получать не штейн для конвертирования, а готовую жидкую черновую медь.

Шахтные печи для плавки медной руды (пиритов) в штейн создавались по образцу домен и унаследовали их несообразности. Можно отапливать такие печи факелами с угольной пылью, полным сжиганием угля, но их отапливают неполным сжиганием кокса, что в 10 раз дороже. Далее, присутствие кокса в шахте печи не дает гореть сере пиритов, так как углерод кокса поглощает кислород дутья и мешает окислению серы. Поэтому здесь мы встречаем еще один пример явной и *вопиющей несообразности*, которые можно не замечать лишь под влиянием упомянутой идеологической *поразительной слепоты*. Когда убрали из шахты кокс, там пошло выгорание серы из пиритов (Cu_2S) и получился сразу готовый металл.

Отметим, что для получения более чистого металла была бы целесообразна продувка на двух уровнях, организация в печи с окатышами окислительной и восстановительной зон, как это предлагается в агрегате «Угольный Мидрекс» (рис. 2.1). Вверху, в окислительной зоне можно глубоко выжигать серу, окисляя в окатышах руды сульфат Cu_2S до Cu_2O . Внизу, в восстановительной зоне, можно глубоко удалить кислород, восстанавливая окислы за счет вдуваемой угольной пыли.

Когда сейчас такие процессы совмещены, тот и другой процесс не достигают нужной глубины, и для глубокого выжигания серы приходит-

ся терпеть конечный металл с большим содержанием окислов Cu_2O в десятки процентов.

Подобную эволюцию прошла и выплавка ряда других цветных металлов из сульфатных руд (свинца, цинка и др.). Здесь также классический способ включает плавление руды в шахтной печи типа домны (с теми же несообразностями), а затем конвертирование расплава для выжигания серы. Сейчас из шахты печи и здесь убирают в ряде случаев кокс, что позволяет получать готовый металл. Продувка на двух уровнях и здесь позволила бы получить более чистый металл.

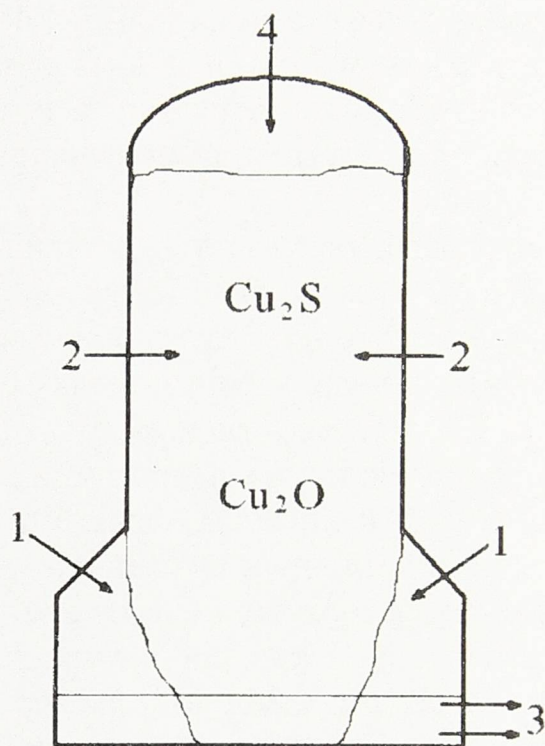


Рис. 2.1. Схема агрегата для плавки медной руды на черновую медь:
1 – основное дутьё; 2 – дополнительное дутьё для выжигания серы,
дожигания отходящих газов; 3 – лётки; 4 – загрузка руды

В отличие от металлургии меди, в металлургии стали не удастся обойтись без топлива, но если это топливо сжигать вне шахты, например, в газогенераторе или лишь в объеме факелов, то тоже можно получить сразу готовый металл.

Этот «порок № 3» металлургического цикла, в отличие от «порока № 1», обсуждается сравнительно широко и 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 чугуны» (1899 г.).

В литературе можно найти также много различных разрозненных высказываний по тем или иным обсуждаемым порокам цикла и их полный обзор также был бы весьма трудоемким. В частности, вопросы более полного использования химической энергии топлива, принцип Грюнера и др. затрагивались во время известной дискуссии 70-х годов в журнале «Сталь» с участием виднейших специалистов доменного производства – М. А. Павлова и других.

2.9. Принцип «двустадийный процесс наиболее эффективен»

Один из важных принципов современной идеологии в металлургии состоит в том, что *двуступенчатый процесс производства стали наиболее эффективен* и останется таковым в обозримом будущем [7, 8].

Как отмечено выше, уверенность в том, что двустадийный процесс необходим, сформировалась в 19-м веке, когда древний кустарный кричный процесс полностью и убедительно проиграл конкуренцию процессу домна – конвертер. Ряд особенностей кричного процесса сделали его непригодным для массового индустриального производства металла, которое выросло за 19-й век примерно в 100 раз.

Но неразумно на основании этого факта 19-го века считать, что и сейчас двустадийный процесс принципиально эффективнее одностадийного.

Этот принцип нередко оказывается даже более незыблемым, чем принцип «доменный процесс незаменим». Даже если изобретаются способы прямого получения железа, то и здесь часто предлагается двустадийный 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 часто остается твердым. Давление доменной идеологии-религии столь сильно, и наша уверенность в необходимости двустадийного процесса столь велика, что мы не решаемся отказаться от двустадийности даже тогда, когда уже на первой ста-

дии получают металлизированные окатыши, по составу близкие к стали. Мы не решаемся тут же их расплавить, но вводим новый передел.

Представление о незаменимости двустадийного процесса также возникло на почве доменной идеологии. Считается, что доменный процесс невозможно изменить, с ним, как с явлением природы, можно только смириться. Приходится получать металл таким, каким дает его сам доменный процесс, то есть в виде переуглероженного чугуна, и только дальше уже можно подумать о его применении или улучшении, о понижении концентрации углерода, о переработке этого чугуна в сталь.

Так, в процессе «Корекс» получают металлизированные окатыши, по составу близкие к стали, но плавление их переносят в другой агрегат, причем плавят их не на сталь, а на чугун, на слое топлива (угля). Полученный металл практически нужного состава переуглероживается при плавлении, чтобы затем понижать содержание углерода в дорогом сталеплавильном процессе.

Правда, расплавление металлизированных материалов на чугун несколько проще. Можно не думать о составе конечного металла, оставить эту заботу сталеварам. При плавке на чугун легко восстанавливаются также остаточные окислы железа металлизированных окатышей, легче достигается низкое содержание окислов железа в шлаке. Температура плавки на чугун несколько ниже, шлаки менее агрессивны. Технически просто выполнить и конвертерный передел за счет горения железа и легирующих, но это весьма невыгодно.

При современных знаниях и технике, конечно, можно оставить эти небольшие удобства и вместо плавки на чугун отладить несколько более сложную плавку на сталь в шахтной печи, чтобы не выполнять целый дорогой сталеплавильный передел, который часто обходится намного дороже самой доменной плавки.

2.10. Порок № 4 - капризность, плохая управляемость процесса

Домна своими пугающими капризами держит доменщиков в страхе, и они не решатся что-то существенно изменить.

Из дискуссии

Домна склонна к непредсказуемым и опасным расстройством режима плавки; доменный процесс является довольно капризным и плохо

управляемым. Говорят, что у двух доменщиков всегда три мнения, потому что третье мнение имеет домна.

Сход шихты в домне определяется силами веса и трения спекающихся кусков друг с другом, а также силами 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 приклеивание груза к столу на стадиях неподвижности.

Когда начинается спекание, пересыпание окатышей в данном объеме прекращается, масса окатышей «схватывается», какое-то время остается 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.

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.

В старых кричных горнах столб шихты свободно опирался на под, на днище печи. Когда перешли к плавке чугуна, а затем к угольной футеровке днища, проседание рудной шихты до пода стало недопустимо.

Если бы действовали только силы веса, то тяжелый (например, 30-метровый) столб шихты современной домны просел бы до днища печи. Но это привело бы к интенсивному растворению угольной футеровки в металле, ненасыщенном углеродом. Из-за тех небольших, временных и частичных местных проседаний шихты, которые случаются сейчас, растворение футеровки уже достигает тысячи тонн и больше.

Кроме того, если бы шихта просела до днища, было бы трудно или невозможно спустить шлак, содержащий множество твердых кусков, а со шлаком сошло бы много недогоревшего кокса и шихты.

Когда от кричного процесса переходили к плавке на чугуны, выход был найден в том, что в профиле печи ввели заплечики, сужение корпуса книзу. С тех пор в домне столб шихты как бы отчасти подвешивается на заплечиках, его проседание затрудняется трением в массе спекающейся шихты, которая должна опускаться в сужающемся корпусе.

С точки зрения теории устойчивости движения, заплечики – это фактор, увеличивающий трение в спекающейся массе шихты. Соответственно увеличивается неустойчивость движения. В среднем этот прием решает задачу, зависания усиливаются, и в среднем нет чрезмерного проседания шихты в расплавы. Но усиливаются и скачки от зависаний шихты к обрушениям.

Обычное возражение доменщиков против увеличения доли угольной пыли также состоит в том, что долю кокса в шихте все равно нельзя уменьшать; если шихта недостаточно разрыхляется коксом, то увеличивается опасность ее чрезмерного спекания и слишком прочного зависания.

Так как топливо и окатыши в домне перемешаны, горение и восстановление совмещены, то извне трудно повлиять на соотношение процессов, выделяющих и поглощающих тепло. Не удастся регулировать соотношение горения кокса, с одной стороны, и восстановления и плавления шихты, с другой.

Если происходит большое обрушение шихты, то на нижние горизонты иногда сразу поступает большая масса недовосстановленных окатышей. Резко ускоряется восстановление и плавление с поглощением тепла, может наступить опасное похолодание горна, осложненное вспениванием и др.

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.

Если, например, выявляется опасная нехватка тепла, то доменщикам рекомендуют уменьшить долю окатышей в завалке на колошнике [7, 8], увеличить долю кокса. Но это добавочное топливо дойдет до горна в лучшем случае лишь через 6 часов, а в некоторых печах – лишь через сутки. За это время похолодание может или привести к аварии, либо смениться перегревом из-за очередного «каприза» домны. Быстрые меры борьбы с похолоданием, меры воздействия на домну «снизу», через дутье, сейчас часто оказываются недостаточными, слабыми. Например,

рекомендуемое повышение температуры дутья, уменьшение его влажности и др., оказывается практически невозможно выполнить. В целом в современной доменной печи нет или недостаточно возможностей быстро и радикально преодолеть опасное похолодание, вообще недостаточно возможностей быстро (то есть «снизу») регулировать температурный режим плавки, бороться с «капризами» домны. Часто остается лишь скрупулезно выдерживать определенный режим плавки, который давно уже хорошо зарекомендовал себя, и многолетний опыт позволяет надеяться на то, что раньше подобные аномалии обычно рано или поздно прекращались сами.

Возможности эффективно и быстро регулировать температуру в горне появятся, если вдувать в домну много концентрата, заменяющего часть окатышей. Интенсивность процессов восстановления и плавления в горне, которые поглощают тепло, пропорциональна суммарному количеству поступающих сверху в горн окатышей и вдуваемого концентрата. Добавка или уменьшение вдуваемого концентрата эквивалентна изменению доли окатышей в шихте, но действует не через 6-20 часов, как при загрузке сверху, а практически сразу.

В этом случае добавка концентрата в дутье быстро снизит перегрев горна, а уменьшение его количества приведет при необходимости к повышению температуры. Этот прием дал бы доменщикам столь нужную возможность быстро и эффективно бороться с перегревами и переохлаждениями печи «снизу», быстро и в широких пределах регулировать при необходимости тепловой режим плавки.

Кроме подвисаний и обрушений шихты, перегревов и переохлаждений, есть множество других расстройств хода печи, есть наборы рекомендаций по нарушениям, статистика успешных и малоуспешных применений этих рекомендаций в прошлом и др. Говорят, что хороший доменщик должен чувствовать домну не только приборами, но и «печенкой», упоминаются и другие части тела. Расстройство процесса может разрастись и привести к опасным последствиям, большим потерям, а в пределе – даже к масштабным катастрофическим авариям в огромном агрегате. Поэтому доменщики обычно считают главной своей задачей возможно более строгое выдерживание, оберегание раз отлаженных проверенных режимов плавки, и очень настороженно встречают предложения хотя бы немного изменить режим, не говоря уже о радикальных изменениях процесса, и, тем более, всего цикла. Если наша задача – обеспечить хороший ровный ход капризного доменного процесса, то консервативная доменная идеология вполне оправдана и полезна, здесь вполне целесообразно считать, что не только доменный процесс незаме-

ним, но незаменимы и отлаженные проверенные режимы плавки. Такая идеология полезна доменщикам еще и в том смысле, что она помогает сохранить их монополию на все решения по доменным печам, «отфутболивать» любые слишком настойчивые предложения по изменению процесса с помощью одного универсального аргумента: «это будет уже не доменный процесс!».

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 расстройства режима печи можно просто переждать, так как в прошлом они рано или поздно проходили сами собой.

Если все же изменения режима плавки необходимы, то их стремятся выполнять очень медленно, а затем многократно и долго убеждаться в том, что проведенные изменения не ведут к опасным расстройствам хода. 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 достаточно 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 месяца.

Для сравнения отметим, что сталеплавильный агрегат, даже самый большой, переходят на новый режим работы, например, за 10 минут, но не за полмесяца. Кислородный конвертер можно заполнить жидким металлом и вывести на стационарный режим продувки, например, за 10 минут, а не за месяц.

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 большая часть сырья будет вдвигаться с дутьем в виде порошка концентрата и угольной пыли, то ее режим также можно будет регулировать быстро и эффективно, *как топливную горелку*. Переход на новый режим продувки можно будет выполнить за несколько минут, а не за неделю.

Говорят, что доменный процесс защищен именно своей капризностью и плохой управляемостью; он предстает как пугающе-сложный, пугающе-капризный процесс с непредсказуемыми опасными расстройствами. Разные химические реакции в домне жестко связаны, так как все реагенты смешаны. Если мы пытаемся повлиять на ход одной реакции,

возникают многочисленные трудно предсказуемые следствия по многим другим реакциям. Так как *в домне все взаимосвязано*, то управлять этим комплексом процессов трудно.

Доменная печь работает в невыгодном режиме полу-спекания массы металлизированных окатышей. 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.

В принципе возможен и выгоден процесс с минимальным спеканием, когда сверху загружается почти один кокс, 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; завесаний 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 в виде вдуваемой угольной пыли. В этом случае ниже зоны «температуры Мидрекса» ($T > 750\text{ }^{\circ}\text{C}$) получится уже прочное спекание металлизующихся окатышей, и дальше шихта может опускаться уже в основном как единая спеченная масса, без пересыпаний и обрушений. В высокотемпературной печи можно предоставить такой спеченной массе опускаться как единое целое, без разрушений и пересыпаний, до твердого пода, до зоны оплавления. Сход массы будет определяться регулируемым оплавлением ее внизу, как в агрегате «Мидрекс» – регулируемой выгрузкой. 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.

При переходе на режим без спекания или на режим плавки с полным спеканием целесообразно соответственно откорректировать профиль домны. Корректировку профиля обычно выполняют при капитальном ремонте печи.

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 создать про-

цессы, более свободные от тех случайностей и опасностей, преодолением которых занимаются доменщики.

Такие опасные и часто непредсказуемые капризы домены укрепляют давно укоренившийся взгляд доменной идеологии о том, что доменный процесс надо воспринимать как явление природы, которое мы не в силах изменить, а можем лишь как-то приспособиться к нему. Мы можем лишь смягчить капризы домены, если будем тщательно оберегать установившиеся, сравнительно безопасные, режимы процесса и будем жестко отклонять предложения по всем радикальным изменениям.

Глава 3

СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛИ В ШАХТНОЙ ПЕЧИ. АГРЕГАТ «УГОЛЬНЫЙ МИДРЕКС»

3.1. Агрегат «Угольный Мидрекс»

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

Рассмотрим схему агрегата (рис. 3.1), в которой устраняются перечисленные выше несообразности 1-4 современного цикла за счет сравнительно небольших корректив к доменному процессу, за счет перегруппировки известных отлаженных элементов процесса. При этом сохраняются отмеченные преимущества доменной печи: большое поступление тепла с дутьем; хорошая утилизация физического тепла отходящих газов в шахте печи; высокая производительность, характерная для шахтных печей; возможность высокой единичной мощности агрегата.

Газогенераторами служат факелы 1, в которых угольная пыль горит в доменном дутье. Пыль дается с избытком над стехиометрическим соотношением с кислородом дутья, поэтому горение идет лишь по первой стадии до CO и H_2 .

В доменных печах в ряде случаев практикуется вдувание угольной пыли, но обычно лишь в качестве небольшой добавки к коксу, часто в пределах нескольких процентов топлива. В данной схеме все топливо – угольная пыль. Ниже рассмотрены также другие способы введения угля в зону горения, в факелы.

Весь остальной объем печи вне и выше факелов работает как агрегат «Мидрекс» или «Корекс» на газогенераторных газах, которые получаются в факелах на угольной пыли. Весь агрегат по схеме (см. рис. 3.1) можно назвать «Угольный Мидрекс». Отходящие газы дожигаются дополнительным дутьем через фурмы 2. При температуре дутья $1200\text{ }^\circ\text{C}$ теоретическая температура T_{Γ} горения в факелах угольной пыли – порядка $2200\text{ }^\circ\text{C}$, что более чем достаточно для расплавления массы металлизированных окатышей. Расчет T_{Γ} приведен в приложении (расчёт 4 приложения).

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 рас-

плавах, будет выходить из печи в виде примеси, засоряющей шлак, а в случае неполного дожигания – также и в виде пыли колошниковых газов. Понижая избыток угольной пыли, мы последовательно получим высокоуглеродистую сталь (например, 2 % C), затем малоуглеродистую (например, 0,3 % C), затем железо почти без углерода, и дальше – расплав отчасти окисленного железа с повышенным содержанием кислорода и с примесью окислов FeO в виде неметаллических включений металла.

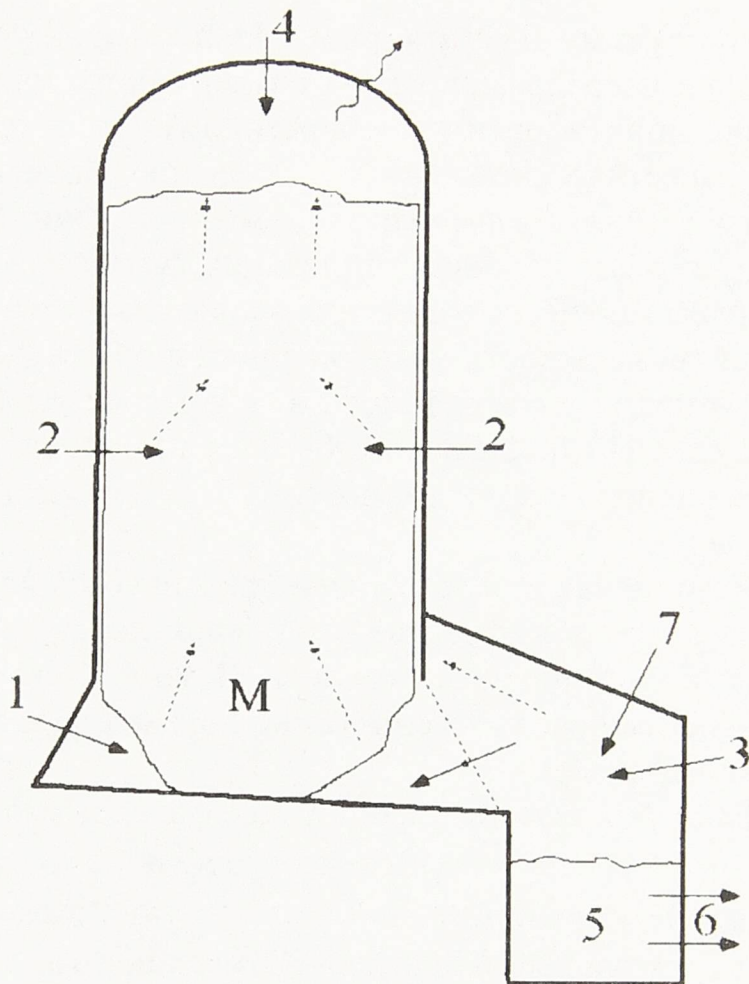


Рис. 3.1. Схема агрегата «Угольный Мидрекс» для получения жидкой стали в шахтной печи:

- 1 – фурмы дутья с угольной пылью; 2 – дополнительное дутье для дожигания отходящих газов; 3 – фурма корректирующего дутья в горне-отстойнике; 4 – загрузка окатышей; 5 – выносной горн-отстойник; 6 – летки; 7 – течка

Отметим, что если вести в факелах полное горение угольной пыли до CO_2 с избытком воздуха (как в факелах парового котла), то в печи всюду будет окислительная атмосфера с газообразной углекислотой CO_2

в газах и с некоторым содержанием избыточного кислорода O_2 . Процессы восстановления вообще не пойдут, и печь станет агрегатом для обжига или плавления железной руды.

Примерно так работают печи по плавке медных руд в штейн; руда лишь плавится за счет горения кокса почти без изменения химического состава. Теоретически агрегат «Угольный Мидрекс» может производить рудный расплав (практически этот расплав является весьма агрессивным химически, а в смеси с угольной пылью может давать интенсивное вспенивание). При менее горячих факелах, если не доходить до плавления, то подобным образом можно, в принципе, вести окислительный обжиг магнетитовых руд (Fe_3O_4), которые в ряде случаев окисляют до гематита (Fe_2O_3) для повышения их восстановимости. По этой же схеме может работать, например, печь для обжига сидерита или известняка, вагранка и др. Для нашей темы важно то, что в этой схеме можно быстро переключаться с восстановительного процесса на нейтральный, а при необходимости даже и на окислительный.

Отметим также два пункта, по которым тепловой баланс обсуждаемого агрегата будет несколько хуже по сравнению с доменной печью.

Во-первых, в данной схеме топливо, угольная пыль, поступает в горн холодной, тогда как в доменной печи кокс по пути в горн прогревается в шахте отходящими газами, например, до $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Однако оценки показывают, что этот фактор приведет лишь к небольшому увеличению расчетного расхода топлива порядка 5 % (расчет 11 приложения) и не ухудшит существенно тепловой баланс и экономичность агрегата, тем более, что топливом служит сравнительно дешевая угольная пыль. Обобщение опыта вдувания угольной пыли в доменные печи нередко приводит к выводу, что она заменяет равное количество кокса [8].

Во-вторых, может показаться, что в доменной печи на теплообмен шихты и отходящих газов работает вся шахта печи, а в предлагаемой схеме – в основном лишь часть этой шахты, расположенная над уровнем дожигания отходящих газов. Здесь зона теплообмена будет меньше, сам теплообмен будет несколько хуже, утилизация тепла отходящих газов в печи менее полной.

Но современная теория теплообмена в домне показала, что ниже уровня $700\text{ }^\circ\text{C}$ в домне располагается «зона холостого теплообмена», в пределах которой температура шихты и газов практически не изменяется, а тепло газов тратится на обеспечение реакций восстановления. Практически на обычный теплообмен в домне работает лишь верхняя часть шахты выше уровня $700\text{ }^\circ\text{C}$.

3.2. Возможности окислительной зоны дожигания газов. Баланс тепла отдельных зон. Футеровка

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

Д. В. Благин

Для удаления (выжигания) серы и фосфора, а также для некоторых других металлургических реакций желательна сильно-окислительная атмосфера, значительное содержание CO_2 и даже кислорода в газах. Присутствие кислорода необходимо и для других реакций, например, для окислительного обжига железной руды, который проводят ради повышения восстановимости, превращая магнетит Fe_3O_4 в гематит Fe_2O_3 .

В доменной печи всюду избыток топлива, и всюду восстановительная атмосфера; окиси углерода CO в газах везде больше, чем двуокиси CO_2 , кислорода практически нет и, соответственно, нет возможностей для развития окислительных процессов. В сталеплавильном агрегате металл уже перевосстановлен, и создание окислительной среды в нем невозможно. В целом в современном цикле недостаточно условий для развития окислительных процессов, что, в частности, увеличивает трудности с серой и фосфором.

В предлагаемом агрегате устраняется такой недостаток современного цикла; в зоне дожигания газов и выше создается сильно окислительная атмосфера. При некотором избытке воздуха после дожигания останется избыточный кислород O_2 , практически не будет CO , но лишь CO_2 . В этой окислительной зоне печи можно реализовать ряд таких полезных процессов окисления, которые невозможны в домне и дефицитны в современном цикле в целом.

Здесь будут выжигаться из рудной компоненты сера и фосфор, что невозможно в восстановительной атмосфере домны. В этой зоне может идти также обжиг сидеритовых руд и обжиг известняка. 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. 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. Подобные процессы будет разумнее совместить с основной плавкой. Можно вести также окислительный обжиг окатышей.

Заманчиво было бы выполнить в этой зоне также и обжиг окатышей, который сейчас проводится отдельным процессом на конвейерных

обжиговых машинах, подобных агломерационным. Если сделать окислительную зону «Угольного Мидрекса» несколько меньше, то сократится тот путь, который до обжига должны пройти необоженные окатыши, и снизятся требования к их прочности. Прочность необоженных окатышей можно повысить некоторым увеличением добавки вяжущих веществ при их формовании. Лотош В. Е. и другие предлагали даже за счет увеличенной добавки вяжущих обеспечивать без обжига всю необходимую прочность окатышей.

Загруженный кокс прогревается в верхних горизонтах доменной печи, где из него выделяются летучие углеводороды и их производные. Они загрязняют «нефтепродуктами» воду при мокрой пылеочистке колошниковых газов, что 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.

Тепло дожигания газов трудно использовать иначе, чем на нагрев окатышей. Поэтому за счет этого тепла в зоне дожигания следует нагреть окатыши до максимально допустимой температуры, до предплавления, примерно до температуры обжига окатышей, например, 1200-1300 °С. Если бы тепла дожигания не хватило для такого нагрева, то следовало бы здесь добавить некоторое количество угольной пыли. Однако такой случай представляется маловероятным.

Если в домне стремятся к возможно более раннему плавлению шлака, то здесь, наоборот, целесообразен более высокий прогрев без плавления.

Ниже зоны дожигания опускающиеся горячие окатыши 1200-1300 °С, переходя в зону восстановления, встретятся с поднимающимися восстановительными газами. Газы поступают в восстановительную зону снизу, из зоны плавления, с температурой зоны плавления порядка 1500 °С. Очевидно, здесь пойдут процессы косвенного восстановления более интенсивные, чем в домне или агрегате «Мидрекс», так как здесь значительно выше температура, и сюда поступают окатыши, прошедшие окислительный обжиг, содержащие высшие окислы железа. Восстановимость таких окатышей и их термодинамическое сродство к СО повышены. Уже здесь, еще до дожигания газов, будет достигнуто более высокое, чем в домне, содержание CO_2 .

Ниже, в зоне плавления, идет горение угольной пыли в доменном дутье. При неполном горении до СО расчетная температура горения будет около 2000 °С, и тепло газов, очевидно, достаточно для плавления.

Сюда поступают также более горячие окатыши, чем в доменную зону плавления.

Если возникнут затруднения с плавлением, можно повысить температуру горения, например, до 2200 °С, если угольную пыль и дутье дать в таком соотношении, чтобы горение шло на четверть до CO_2 , на три четверти до CO (расчёт в приложении). Если в зоне восстановления образуется избыток тепла, то потоки угольной пыли можно направить так, чтобы часть ее улетела в зону восстановления и пошла там на прямое восстановление, поглощающее тепло.

В данной схеме процесса есть значительные возможности регулировать распределение тепла по зонам печи.

Важный новый элемент обсуждаемой схемы состоит в том, что здесь потребуется отладить сталеплавильную футеровку 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 тысяча тонн угольных блоков на днище печи. В сталеплавильных агрегатах не допускается столь большой износ футеровки, измеряемый сотнями и тысячами тонн.

Футеровка сталеплавильных агрегатов 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. Если довести толщину футеровки до доменных значений, то и в агрегате «Угольный Мидрекс» работа может продолжаться даже при растворении сотен или тысячи тонн футеровки.

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 весьма непривычно для домны.

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 подоб-

ную футеровку применить и на каких-то участках «Угольного Мидрекса».

Расходы на футеровку в агрегатах (см. рис. 3.1) 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 чугуны. 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.

3.3. Управляемость процесса

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

Из дискуссии

Агрегаты «Мидрекс» и факелы дутья с угольной пылью – известные и хорошо отлаженные элементы процесса. Обширный опыт сжигания тонкой пыли в факелах накоплен также в паровых котлах электростанций.

Вдувание дополнительного дутья на средних или повышенных горизонтах доменной печи для дожигания отходящих газов также 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.

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.

При данной схеме процесса можно быстро и в широких пределах регулировать температуру горения, нагрев горна и ванны с расплавами. Можно быстро менять соотношение процессов горения, выделяющих тепло, с одной стороны, и процессов восстановления-плавления, поглощающих тепло. Возможности регулирования еще увеличиваются, если с угольной пылью вдувается также и порошок концентрата.

Вопреки распространенному мнению, факелы дутья выделяют в горне больше тепла, если к дутью добавлять меньше топлива, угольной пыли. Если выявится большой недостаток тепла в горне, то на какое-то время можно вообще не подавать угольную пыль; дутье без топлива даст большое количество тепла Q в горне за счет горения железа ($Q = 290$ кДж на грамм-атом кислорода). Если горение пыли вести с небольшим избытком воздуха, то происходит полное горение топлива до CO_2 и выделяется 200 кДж на грамм-атом кислорода. При этих режимах дутья можно быстро разогревать горн (как в конвертере) и ускорять плавление при замедлении восстановления или даже при временной смене восстановления на окисление. Наоборот, при большом избытке угольной пыли увеличится доля восстановления окислов избыточным твердым углеродом (или «прямое восстановление», $C + FeO = Fe + CO$) с поглощением тепла ($Q = -180$ кДж на грамм-атом избыточного углерода). В таком режиме ускорится восстановление при снижении температуры и замедлении плавления.

Факел с угольной пылью можно регулировать примерно как ацетиленовую горелку, которая при недостатке кислорода используется для накопления жидкого металла и для сварки, а при избытке кислорода выполняет резку металла за счет его горения. В схеме (см. рис. 3.1) можно быстро изменять и температуру горения в факелах, особенно если с угольной пылью вдувается еще и порошок концентрата.

Подобных возможностей нет в обычном доменном процессе. Невозможно быстро и намного изменять температуру горения в доменных факелах, избыток или недостаток топлива в зоне горения, так как в горне домны всегда большой избыток топлива. Предлагаемый агрегат «Угольный Мидрекс», как и обычный «Мидрекс», был бы значительно более управляемым по сравнению с домной.

В домне ограничено также применение угольной пыли и кускового угля, так как шлак «загустевает» от попадающей в него пыли и засоряется угольной мелочью, так что затрудняется его выпуск. В обсуждаемом агрегате таких ограничений нет; и пыль, и угольная мелочь будут растворяться в металле и шлаке, которые не насыщены углеродом.

В целом предлагаемый процесс «Угольный Мидрекс», как и обычный «Мидрекс», является (по своей схеме) значительно более предсказуемым и управляемым, менее подвержен случайностям по сравнению с домной. Здесь больше возможностей регулирования температуры, соотношения восстановления и плавления, схода материалов. Шихта опускается до пода единой спекающейся массой, без разрушений и пересыпаний. Сход шихты определяется ее регулируемым оплавлением снизу, но не силами трения в спекающихся массах, что ведет к принципиально неустойчивому движению в домне. Меньше влияния случайных факторов, чем в доменном процессе.

3.4. Плавление спекающейся массы металлизированных окатышей

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

Наиболее радикально – новый элемент предлагаемого процесса, не встречающийся в существующих печах – это необычный режим плавления. Масса металлизированных окатышей здесь будет прочно спекаться и опускаться до пода печи как единое целое; необходимо организовать ее плавление на поду. Оптимизация такого нового плавления может потребовать значительной работы.

В массе М металлизированных окатышей уже при «температурах Мидрекс» (то есть около 750 °С) начинается некоторое спекание. Чтобы в агрегатах «Мидрекс» спекание не стало слишком прочным, на поверхностные слои окатышей часто напыляют неспекающиеся порошковые материалы. Образующиеся спеки дробятся валками механизмов выгрузки. В предлагаемом процессе масса М окатышей прогревается не до 750 °С, а вплоть до температур плавления, примерно до 1300-1400 °С. Спекание массы М в этом агрегате может быть значительно более прочным.

В доменных печах сейчас такое спекание считается недопустимым. Предел уменьшения доли кокса в шихте часто определяют именно тем, что без разрыхляющего действия кокса наступит слишком интенсивное спекание металлизированной шихты. Такая спеченная масса М в домне может прочно необратимо зависнуть на заплечиках корпуса домны, в пределе могут полностью прекратиться ее обрушения и сход.

Корпус предлагаемого агрегата «Угольный Мидрекс», в отличие от домны, можно сделать с постоянным сечением по высоте, без заплечиков, или даже несколько расширяющимся книзу. Спекающейся массе М

предоставляется возможность свободно опускаться как целое, без разрушений, до твердого пода, до плавления. Примерно так же в обычных агрегатах «Мидрекс» спекающаяся масса металлизированных окатышей без разрушений опускается вниз до аппарата выгрузки.

При спекании произойдет 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.

На рис 3.2 представлена схема плавления факелами, направленными несколько вниз, так что они прогревают накапливающиеся в ванне расплавы, и значительная часть плавления металлизированной массы М идет на границе с расплавами.

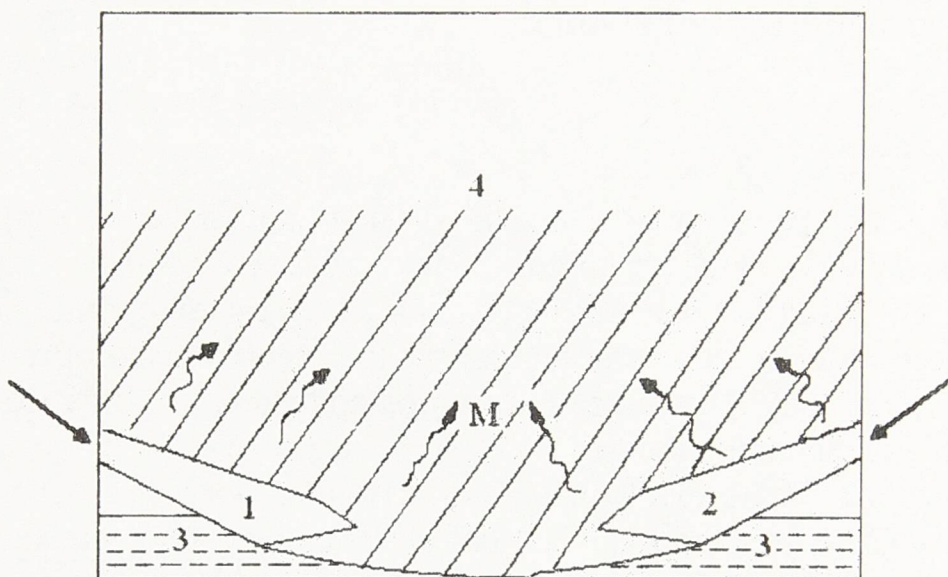


Рис. 3.2. Схема плавления наклонными факелами:
1, 2 – факелы дутья; 3 – расплав; 4 – зона восстановления;
М – спекающаяся масса металлизированных окатышей

В предыдущем варианте (см. рис. 3.1) масса М плавится на почти «сухом» и слегка наклонном поду печи, по которому получающиеся расплавы сразу стекают в горн-отстойник.

Стекающий по поду металл (и шлак) будет перегреваться факелами дутья тем интенсивнее, чем ниже располагаются эти факелы и интенсивнее омывают слой стекающих расплавов.

В электропечах и в конвертерах хорошо отлажено плавление металлизированных окатышей и брикетов из окатышей. Если какие-то куски металлизированной массы М плотно спекутся, то плавление их будет близко к плавлению крупного металлического лома в мартеновской пе-

чи, в конвертере, к плавлению лома на поду печи топливным факелом, или к плавлению чугунных чушек массой по 45 кг в вагранке.

3.5. Газопроницаемость зоны плавления

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

Из дискуссий

Обычное возражение против предлагаемой схемы состоит в том, что здесь будет понижена газопроницаемость массы M в зоне ее плавления, где вместе с твердыми окатышами уже появляются расплавы. Газопроницаемость вне зоны плавления будет, очевидно, примерно такой же, как и в агрегате «Мидрекс».

При этом понижение газопроницаемости возможно лишь на последней стадии плавления массы M , когда доля расплавов велика. При малой доле расплавов они 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 M окатышей в целом. Понижение газопроницаемости начинается тогда, когда уже целые окатыши и их комплексы превращаются в большие капли или натеки расплавов.

В зоне плавления домны газопроницаемость также понижена. При накоплении расплавов, при увеличении их доли в шихте они сливаются в увеличенные массы, натеки и стекают вниз этими увеличенными массами. Понижение газопроницаемости сильно зависит от вязкости шлака, от его количества, легкоплавкости.

Всюду есть области, в которых большая часть промежутков между кусками твердой шихты заполнена расплавами, и есть области шихты, где этих расплавов почти нет, так что катастрофического понижения газопроницаемости не наступает. Горячие газы дутья, которые движутся под большим давлением и плавят твердые материалы, могут находить все новые и новые пути в массе шихты.

Понятно, что невозможно катастрофическое понижение газопроницаемости всего агрегата типа «Угольный Мидрекс». Давление дутья у фурм (3-4 атм и больше) таково, что оно способно поднять весь столб шихтовых материалов. Даже если бы образовалась очень плотная и почти непроницаемая масса M , она не способна, конечно, «перекрыть» продувку. Факелы, исходящие от фурм, очень горячие; пока они не отдали

тепло на плавление шихты, их температура имеет величину порядка 2000 °С, (а при необходимости и 2200 °С). Присутствие в газовых потоках угольной пыли или кусочков кокса придает им высокую светимость, высокую интенсивность теплопередачи излучением. Попадая на поверхность металла, эта пыль или кусочки кокса понижают температуру плавления. Общая тепловая мощность доменных факелов на тонну металла весьма велика по сравнению с мощностью конвертера или электропечи при плавке металла. Поэтому такие факелы быстро проделали бы «туннели, каналы, свищи» даже в почти непроницаемой для газов массе металлизированного сырья, и процесс не остановился бы.

В предлагаемой схеме нет разрыхляющего кокса, нет «коксовых карманов», облегчающих движение газов, поэтому газопроницаемость зоны плавления может быть ниже, чем в домне. Но поступление газа в массу М можно облегчить, если увеличивать поверхность такого входа газов, поверхность зоны плавления. В домне эта поверхность примерно равна горизонтальному сечению печи, по которому плавящаяся шихта соприкасается с коксовой насадкой. В агрегате «Угольный Мидрекс» можно массу М оплавливать в форме свисающего вниз конуса с увеличенной поверхностью.

Можно примириться с тем, что здесь возможно образование зон, малопроницаемых или почти непроницаемых для газов, а продувка в области плавления будет неравномерно распределяться по площади сечения печи. Газовые потоки распределятся более равномерно по сечению уже выше зоны плавления. В доменной печи газовые потоки распределяются в зоне фурм также весьма неравномерно. Например, часто образуется «загроможденный центр» горна, который почти не продувается. В предлагаемом агрегате можно добиваться более равномерного распределения газовых потоков теми же приемами, как и в домне.

Конечным итогом неравномерностей продувки будет как бы исключение из работающего объема печи, из области восстановления, малопроницаемых зон. Как бы уменьшится эффективный объем печи, понизится ее производительность. В агрегате «Угольный Мидрекс» можно заранее предусмотреть несколько увеличенную общую высоту столба шихты, чтобы зона восстановления твердых окатышей по-прежнему оставалась достаточно большой.

При этом температура зоны восстановления в данной схеме намного выше, чем в обычном агрегате «Мидрекс» (1200–1500 °С вместо 750 °С) вследствие дожигания газов. Скорость реакций может быть больше, поэтому можно применять более крупные окатыши, или даже брикеты, и за счет этого повышать газопроницаемость шихты.

Концентрация восстановителей CO и H₂ в газах будет примерно такая же, как в домне. Так как расход топлива и дутья на тонну металла в этой схеме меньше в 2-3 раза, то за счет того же дутья и при той же газопроницаемости можно получить в 2-3 раза больше металла, чем в домне при прочих равных условиях.

Таким образом, понижение газопроницаемости в зоне плавления может исключить из процессов восстановления некоторую часть объема печи и несколько понизить ее производительность (как и в домне). Но есть другие большие резервы повышения производительности.

Кроме того, сама по себе производительность печи не является очень важным фактором ее общей экономичности; амортизация печи в стоимости чугуна составляет лишь 1,5 %, тогда как сырье, то есть рудная компонента и топливо, вместе составляют 90 % себестоимости чугуна. Для общих экономических показателей экономия на сырье значительно важнее повышения производительности. Погоня за газопроницаемостью, интенсивностью продувки и производительностью домен вообще представляется несколько чрезмерной. Видимо, здесь действуют соображения престижа; очень престижно, например, создать агрегат, перерабатывающий 500 вагонов сырья в сутки, или установить рекорд производительности.

3.6. Выносной горн-отстойник. О качестве получаемой стали

Идея проста до глупости
А. Толстой

В варианте (см. рис. 3.1) 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. Переток металла из основного корпуса в выносной горн можно организовать по способу «сифона», который применяется в таких процессах, как «Ромелт» и др. Из «сифона» жидкий металл вытекает вниз, а шлак вверх, так что есть возможность отделить «доменный» шлак от металла по пути в отстойник. Можно отделять шлак при стекании расплавов в отстойник примерно так же, как отделяют его на желобе при выпуске металла из домны. Можно также выпускать шлак обычным способом из основного корпуса или же из отстойника.

В отстойник можно вынести одну или две доменные фурмы и организовать в нем «сталеплавильный» процесс при прогреве ванны доменными факелами. Если такие факелы не пробивают шлак, в них возможно полное горение угольной пыли. В этом случае мы получаем возможность экономично вести длительные и разнообразные операции рафинирования стали в отстойнике с очень хорошим тепловым балансом агрегата «Угольный Мидрекс». Отопление отстойника будет на порядок величины эффективнее по сравнению с кислородным конвертером (см. раздел 2.6).

Если мы не готовы отлаживать экономичное доменное отопление отстойника, то можно поставить там обычную конвертерную фурму кислородного дутья, которая обеспечит, при необходимости, некоторую небольшую коррекцию температуры и состава металла и более точное попадание в анализ. Тепловой баланс самого отстойника будет плохим, таким же, как у кислородного конвертера, но при утилизации газов в основном корпусе баланс системы в целом будет по-прежнему хорошим.

Если отказаться от отстойника и заменить его обычным конвертером, то неэкономичный «конвертерный передел» с горением металла сохранится, но будет в сильно уменьшенном виде.

В современных процессах доменная печь – конвертер дутье конвертера составляет обычно 5-10 % доменного дутья в расчете на тонну металла. В конвертере выжигается до 4 % углерода, растворенного в металле. Если в предлагаемом агрегате удастся уже в основном корпусе получить почти нужное содержание углерода с точностью до 0,1%, то для коррекции состава в отстойнике потребуется объем дутья порядка 0,1-0,3 % от дутья основного корпуса.

Сейчас в сталеварении распространен процесс электропечь – ковш, в котором задача электропечи состоит лишь в том, чтобы расплавить металл, перегреть его, например, на 100-200 °С 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 и в выносном горне-отстойнике агрегата (см. рис. 3.1) можно 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. Возможно и более глубокое рафинирование стали.

Обилие дешевого тепла позволяет также при необходимости повысить температуру процесса в основном корпусе и, соответственно, 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.

Передел чугуна в сталь часто обходится дороже, чем сам доменный передел, из-за того, что тепло в сталеплавильных агрегатах дорого, велики угар и испарение металла в зоне кислородного факела или электрической дуги.

Рассмотрим случай, когда в кислородном конвертере отлажен столь мягкий обдув ванны, что расплавы прогреваются за счет неполного горения углерода до СО. Металл в целом не горит, его окисление кислородом компенсируется восстановлением углеродом, так что количество металла и его окислов в шлаке постоянно.

Расчетный расход углерода для нагрева металла на 200 °С получается равным 16 кг на тонну металла. Но если конвертер подсоединен к основному корпусу агрегата «Угольный Мидрекс», то для системы в целом расход топлива получается почти на порядок величины меньше – 2 кг/т. В конвертере по-прежнему потребуется сжечь 16 кг углерода, но будет сэкономлено 14 кг углерода в основном корпусе, где дожигаются и охлаждаются газы из конвертера. В целом дополнительный расход углерода получается всего $16-14=2$ кг на тонну (расчёт 10 приложения).

Здесь снова видно, что отопление современного кислородного конвертера стало бы в несколько раз эффективнее, если бы удалось соединить его с доменной печью так, чтобы отходящие газы переходили из конвертера в печь. В доменной печи хорошо утилизируется физическое тепло газов. Мы получили бы конвертерный передел со сравнительно хорошим тепловым балансом домны.

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.

Если же планировать введение в выносной горн каких-то механизмов для тех или иных манипуляций, то в обычном режиме продувки это возможно через герметически закрывающийся люк. В доменную печь вводят некоторые устройства через фурмы. Работать через открытый

люк или окно в горне-отстойнике можно тогда, когда сбрасывается давление продувки.

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.

При высокой управляемости процесса остановку и запуск продувки можно выполнять значительно быстрее и с меньшими издержками, чем это делается в современных домнах, например, при смене фурм. В принципе можно вести продувку с небольшой интенсивностью и при нормальном давлении у фурм и при открытом горне – отстойнике. Необходимый перепад давления газов можно обеспечить не за счет повышенного давления у фурм, внизу, а за счет пониженного давления сверху, у колошника, примерно так, как это делают при агломерации с помощью эксгаустера.

Предложенная схема отопления ванны доменными факелами, перспективна не только для горна – отстойника, она перспективна и для создания отдельного сталеплавильного агрегата, который предназначается для переработки чугуна и лома. «Доменные» факелы с угольной пылью, вертикальные или наклонные, могут обеспечить эффективное отопление такого агрегата. Можно отрегулировать эти факелы так, чтобы они, с одной стороны, «не пробивали» слой шлака, не контактировали с жидким металлом, что обеспечит полное горение углерода до CO_2 . С другой стороны, достаточно плотный контакт факелов со шлаком обеспечит интенсивную теплопередачу от газов к расплавам и высокую тепловую мощность. Такая высокая мощность характерна для доменных факелов, в отличие от горизонтальных мартеновских факелов с медленной теплопередачей излучением.

Такой сталеплавильный агрегат может иметь собственные рекуператоры, компонованные примерно так же, как мартеновские рекуператоры. Один из них греет дутье до доменных температур, второй принимает тепло отходящих газов, затем направление продувки и роль рекуператоров меняются.

При такой схеме обеспечивается полное горение топлива и утилизация тепла отходящих газов, то есть хороший тепловой баланс, при котором эффективность отопления за счет горения топлива на порядок выше, чем при неполном горении в конвертере. Нет очень горячих зон, как около заглубленного факела кислорода в обычном конвертере, и, соответственно, нет интенсивного испарения и горения металла.

В этом случае возможны разнообразные длительные операции рафинирования стали с большой массой металла и, соответственно, глубокое улучшение качества металла.

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 около 5 %, чтобы получить экономию «в разы» большую на остальных стадиях, составляющих 95 % стоимости цикла.

Если мы не готовы к предлагаемой радикальной ломке идеологии или не хотим отлаживать сразу все новые элементы «Угольного Мидрекса», то возможны сокращенные варианты предлагаемого процесса. Перечисленные выше новые элементы процесса можно отлаживать последовательно и вводить по одному.

Можно пытаться обойтись без горна-отстойника, получить нужный состав и температуру стали уже в основном корпусе агрегата «Угольный Мидрекс», или усреднять состав и температуру жидкого металла в миксере, в ковше.

Если мы не хотим отлаживать новый режим плавления спеченной массы M металлизированных окатышей, то можно вернуться к двустадийному процессу: выгружать горячие металлизированные окатыши прессуя их в брикеты, как в процессе «Хилл-3», затем пересыпать эти брикеты в отстойник, где вести их плавление доменным дутьем.

Можно, наконец, оставить лишь одну металлизацию, сохранить лишь верхнюю часть агрегата. Важное отличие такого процесса от из-

вестных пылеугольных технологий будет состоять в дожигании отходящих газов в верхней части шахтной печи, утилизации их химической энергии, то есть в устранении «порока № 1» домны. Это намного улучшает тепловой баланс агрегата.

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

Здесь у металлургов как по анекдоту: человек увидел жирафа и сказал – не может быть!!

Из дискуссии

Расплавление в электропечи окатышей, полученных в агрегате «Мидрекс», практически сразу дает рядовую сталь. Но, в соответствии с традиционной идеологией двуступенчатого производства стали, полученные окатыши не плавят сразу же в шахтной печи. Кроме давления традиции действует и то, что плавить такие окатыши сразу же в агрегате типа «Мидрекс» действительно неудобно.

Пришлось бы отказаться от легкого корпуса агрегата «Мидрекс», рассчитанного на 750 °С, и перейти к тяжелой футеровке типа доменной, которая способна выдерживать действие расплавов, способна образовывать гарнисаж.

Далее, горение природного газа на первой стадии, в восстановительной атмосфере, идет лишь до СО и Н₂ и дает очень мало тепла, всего 4 % полной теплоты горения; вдувание природного газа в домну приводит к охлаждению горна. Практически горение природного газа может дать значительное количество тепла лишь в такой окислительной атмосфере, в которой будет гореть уже и железо. Природным газом нельзя расплавить металл, не окисляя его.

Отметим также, что факелом природного газа нельзя нагреть заготовки в нагревательной печи, не окисляя их. Факелы угольной пыли имеют в этом отношении преимущество перед факелами природного газа.

Плавить окатыши, восстановленные процессом «Мидрекс», было бы удобнее, если ниже, в зоне плавления, сжигать угольную пыль. Доля тепловыделения на первой стадии горения до СО (то есть в восстановительной атмосфере) у пыли составляет 28 % вместо 4 % у природного газа; в этом плане угольная пыль (углерод) в 7 раз эффективнее газа.

Но если в зоне плавления сжигать угольную пыль, то в этом случае уже и восстановление окатышей сверху целесообразно было бы вести

тоже за счет генераторного газа, получаемого от горения пыли внизу. Целесообразно было бы уже полностью перейти от обычного «Мидрекса» к предлагаемому агрегату «Угольный Мидрекс», уже не только на стадии плавления, но и на стадии металлизации.

Кроме того, здесь пришлось бы отлаживать также качественно новый процесс плавления плотно спеченной металлизированной массы М, который обсуждался выше. 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, и пока процесс не опробован, можно высказывать многочисленные опасения. Ситуация упростится, если выполнить опробование данного плавления хотя бы в лабораторных условиях или на полупромышленной установке.

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

Только не смешивай руду
и топливо, вся премудрость.

Из дискуссии

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 другие способы такой доставки топлива к факелам.

Течки над фурмами.

Над фурмой можно разместить трубу диаметром, например, 20-30 см, через которую материалы могут всыпаться или «течь» в газовые потоки факелов.

Конечно, в течку 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, одно на несколько фурм или даже одно на все фурмы. Конструкция должна обезопасить трубу 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.

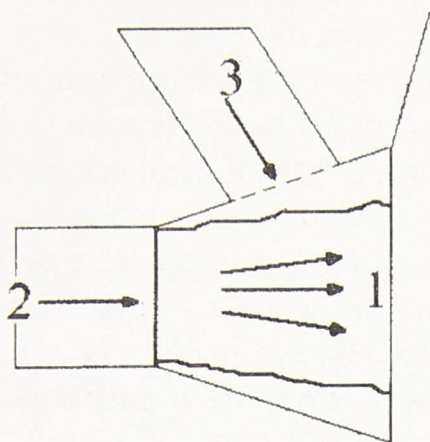


Рис. 3.3. Схема течки для подачи сыпучих:

- 1 – факел дутья; 2 – фурма;
- 3 – течка с потоком сыпучих

Всыпание угольной пыли через течку проще, чем впрыскивание ее под высоким давлением в виде суспензии через трубу, вводимую в фурму. Всыпаемая пыль попадет сначала не в свежее дутье с высокой концентрацией кислорода, а в газовые потоки, циркулирующие вокруг факела, поэтому меньше опасность создания опасных очагов высокой температуры. Если для вдувания в дому через современные устройства пригодна только очень тонкая пыль, не крупнее 30 мкм, то через течку можно всыпать и кусковой уголь (или кокс) угольную «крупку» и др. (рис. 3.3).

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 в доменных печах.

Распространено определенное предубеждение, что в футеровке доменной печи недопустимы какие-то отверстия, течки и др. Между тем подобная течка не представляет, очевидно, каких-то принципиальных опасностей.

Введение топлива через кольцевое пространство и образование топливной оболочки 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. В варианте, приведённом на рис. 3.4, кусковое топливо вводится через кольцевое пространство Т вокруг основного «рудного» корпуса «Мидрекс» с окатышами.

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.

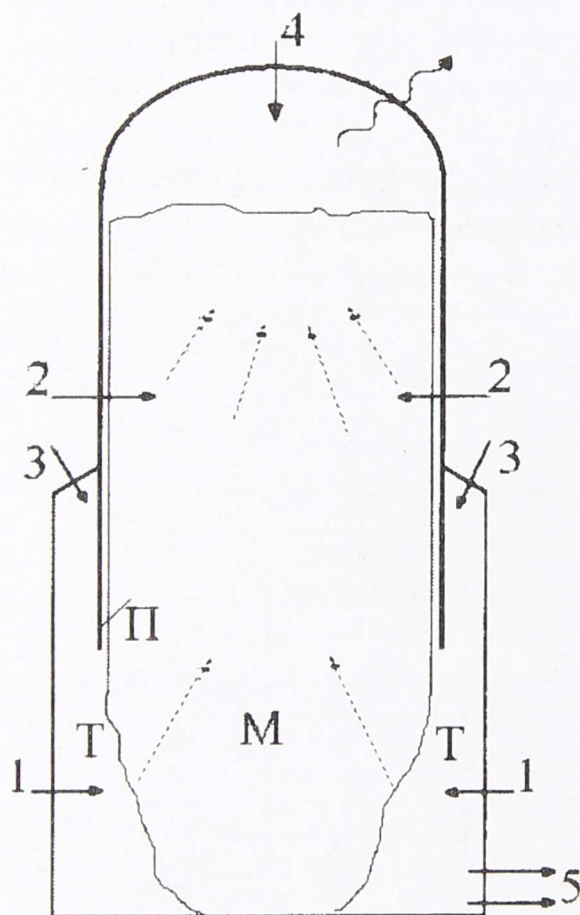


Рис. 3.4. Схема введения топлива Т через кольцевое пространство вокруг основного корпуса:

- 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 (см. рис. 3.4) 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.

Агрегат с топливным и рудным корпусами, аналог каталонского горна.

Рассмотрим схему (рис. 3.5), 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. Если газовые потоки не очень интенсивные и мало влияют на перемещение шихты, то равновесие столба топлива и столба окатышей в схеме (см. рис. 3.5) будет соответствовать закону сообщающихся сосудов.

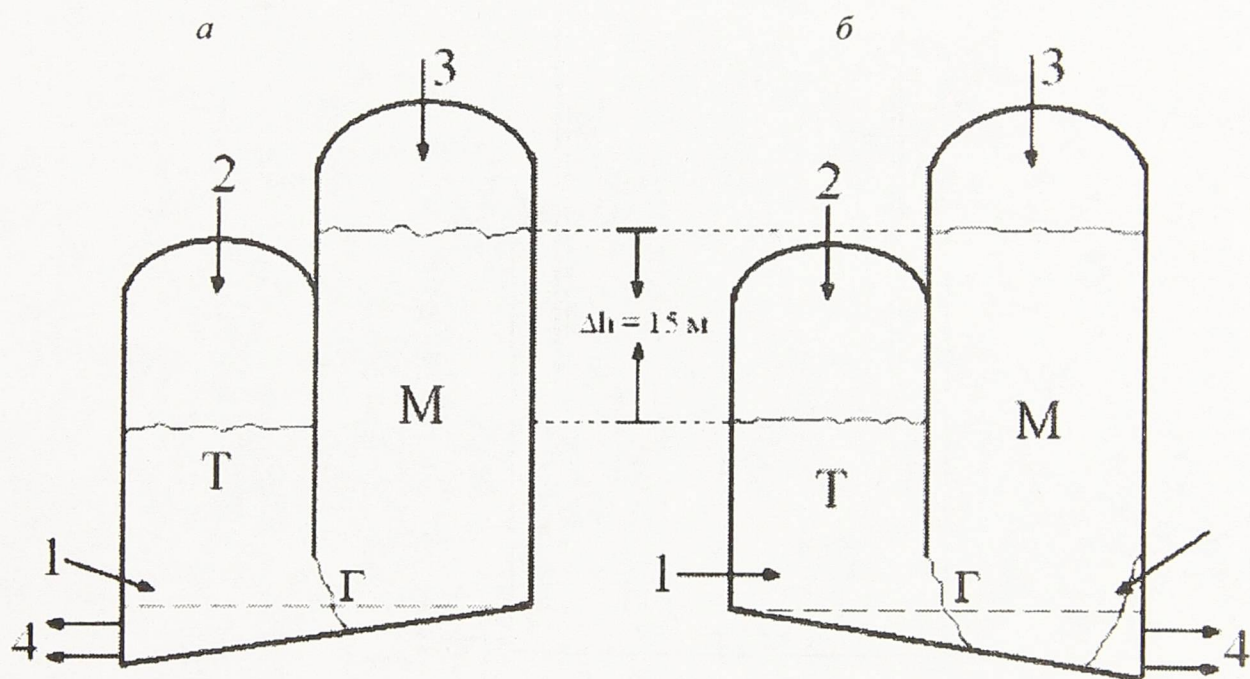


Рис. 3.5. Схема загрузки топлива и руды в разные отсеки:
 а – плавка на чугун; б – плавка на сталь:
 1 – дутье; 2 – загрузка топлива; 3 – загрузка окатышей; 4 – летки

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 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. 3.5).

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. 3.4) 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.

Газогенератор в отдельном отсеке.

Топливо можно сжигать в отдельных отсеках, в газогенераторах Г (рис. 3.6). 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 углеводородов.

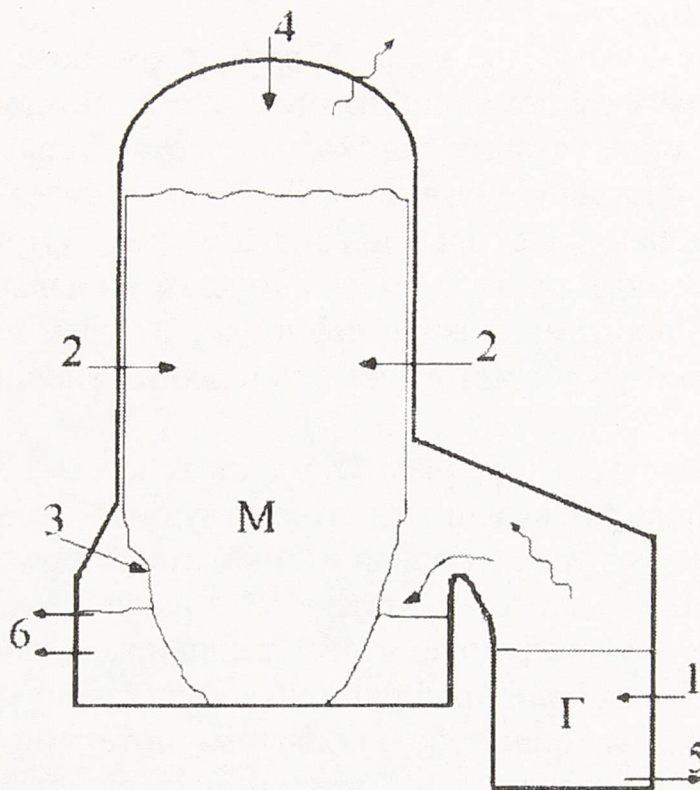


Рис. 3.6. Схема агрегата «Угольный Мидрекс» с газогенератором:

- 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 Видберга. Но по трубопроводу практически невозможно подавать газ с температурой выше 1300 °С, тогда как теоретическая температура горе-

ния 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.

3.9. Технические сложности преодолимы

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

Из дискуссии

В целом из рассмотрения технических трудностей процесса можно сделать вывод, что для его отладки по данной схеме потребуются, 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 1-4. 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.

Видимо, 1 млн дол. достаточно для создания малого агрегата по схеме (см. рис. 3.1), если отлаживать плавку на полупродукт, в частности, на чугун. Чтобы отладить агрегат для полной плавки на сталь, потребуются несколько большие затраты. После этого переход к большим агрегатам был бы лишь вопросом изменения размеров печи. 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.

Можно сказать, что мы терпим металлургию с явными несообразностями по недоразумению, по психологическим и идеологическим причинам. Если преодолеть эти психологические сложности, то вполне

возможно отладить получение стали в шахтной печи без использования кокса, на угле, и при экономичном расходовании угля благодаря его полному сжиганию, при расходе немногим более 200 кг углерода на тонну металла. Такая рядовая сталь будет в 2-3 раза дешевле, чем сейчас.

4.1. Известные инъекционные процессы

- Вы не знаете, кто-нибудь вдувал в домну концентрат?
- Да может, кто-то и вдувал, чего только не вдували...

Из дискуссии

Известно много металлургических процессов, в которых порошковые материалы реагируют в факеле, в интенсивном потоке газа, или вдуваются таким потоком в ванну с расплавами. Иногда говорят даже о существовании целой инъекционной металлургии.

Применяется заправка футеровки торкретированием, когда порошок огнеупорного материала вдувается в факел горения топлива, разогревается там, при столкновении разогретых частиц огнеупора с горячей футеровкой они налипают на нее и наращивают слой огнеупорной массы.

В упомянутой 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.

Известен способ «Циклон» металлизации порошка железорудного концентрата в факеле, где топливом служит угольная пыль, тепло неполного горения углерода до CO обеспечивает нагрев материалов до «Мидрекс-температур» (750°C) и выше; при высоких температурах идет интенсивная металлизация окислов железа. Полученные твердые частицы металлизированного концентрата (частицы порошка железа) выделяются из газов аппаратом «Циклон» за счет центробежных сил при быстрой циркуляции газового потока.

Если уменьшить долю концентрата в факеле, увеличить долю топлива (угольной пыли) и кислорода, то в принципе можно повысить температуру факела примерно до 1500°C . Если концентрата вообще нет, то теоретическая температура горения углерода в кислороде до CO равна 2200°C . При небольшой доле концентрата в факеле получится металл уже не в виде крупинки твердого железа, а в виде капелек расплава. Можно получать жидкий металл 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, твердые или жидкие. Подобный процесс выделения капельного металла из факела хорошо отлажен в упомянутой автогенной плавке меди. В одном из вариантов этой плавки, в кислородно-факельной плавке, факел с капельками жидкой меди вдувается в ванну с расплавами. Так работают, в частности, печи завода в г. Алмалык.

Недостаток теплового баланса таких процессов в черной металлургии состоит в том, что горение углерода здесь идет лишь по первой стадии, до СО. Полное горение топлива до CO_2 и H_2O здесь, как и в домне, невозможно совместить с металлизацией. Для обеспечения высокой скорости металлизации нужно большое преобладание СО в газах, почти 100 % СО, то есть почти 100 %-ное неполное горение. Если дутье – холодный воздух, то такой металлургический процесс практически вообще неосуществим, так как неполное горение углерода даёт лишь температуру 740 °С.

Тепловой баланс такого процесса в нашей схеме расчета будет таким же, как и для агрегатов типа «Ромелт» (расчёт 6 приложения). Здесь также тепловой баланс хуже, чем у домны, из-за того, что дутье поступает холодным, а не с температурой 1200 °С, а продукты горения уходят с температурой не 200 °С, а при 1500 °С, и уносят много тепла. Так же, как и выше (раздел 2.6) ванна получит лишь 9 % тепла полного горения, а расход топлива будет неприемлемо большим – 2700 кг/т углерода и 2240 м^3 /т кислорода (расчёт 5 приложения). Так как есть еще неучтенные статьи расхода тепла, то процесс практически неосуществим.

4.2. Применение реакций порошков в факеле

Металлурги привыкли мыслить кусками шихты.
А возможности реакций порошков в факелах
еще только осознаются.

Из дискуссии

Обсуждаемое получение жидкого металла в факеле (из смеси концентрата с угольной пылью) становится эффективным, если использовать горячее доменное дутье (1200 °С) и обеспечить утилизацию физического тепла отходящих газов. Эффективность тем более повышается, если обеспечить утилизацию не только физического, но еще и химического тепла газов, то есть их полное дожигание, как в «Угольном Мидрексе».

Утилизация физического тепла обеспечивается, если обсуждаемый факел работает не в «пустом» агрегате, как при автогенной кислородно-факельной плавке меди, но в горне шахтной печи, например, в горне домны или агрегата «Угольный Мидрекс». Физическое тепло газов будет утилизироваться в шахте, над горном, пойдет на прогрев опускающейся кусковой шихты. Если есть еще и дожигание газов, как в агрегате «Угольный Мидрекс», то будет утилизировано также и химическое тепло газов, получаемых в факеле. Агрегат получит не 9 %, а почти 100 % всей химической энергии топлива, и расчетный расход топлива на такое получение металла уменьшится в этом варианте почти на порядок величины.

Восстановление металла в таком факеле будет более экономично, чем его получение из кусковой шихты, загружаемой сверху, так как концентрат намного дешевле, чем обожженные окатыши, а угольная пыль намного дешевле кокса. Несколько упрощая, можно сказать, что на этой части железорудного сырья и топлива мы экономим передел окискования, то есть окомкования и обжига окатышей, коксования угля. Разность стоимости пылевидного сырья для факела и окискованной шихты может составлять больше половины всей себестоимости чугуна в доменной плавке. Та часть металла, которая получается из концентрата и угольной пыли в факеле, может быть вдвое дешевле, чем из кускового сырья.

Факел с такой пылегазовой смесью в массиве шихты может работать примерно так же, как и в пустом пространстве. В шихте реакции горения угольной пыли, восстановления частиц концентрата и др. пойдут почти с такой же скоростью, как и в свободном факеле. Поверхность пылинок намного больше поверхности кусков шихты, увлекаемых факелом, и интенсивность реакций на пылинках будет намного больше. Почти 100 % общей скорости реакций факела сосредоточатся на пылинках. Есть данные, что вдуваемая в домну угольная пыль практически полностью сгорает в потоке дутья уже на расстоянии 300 мм от среза фурмы. Если скорость потока составляет 50 м/с, то горение завершается за 0,006 с. На расстоянии около 1,5 м полностью исчезает и кислород, на расстоянии около 2 м исчезает двуокись CO_2 . Дальше идет уже зона восстановительной атмосферы, где будут восстанавливаться частички концентрата и превращаться в капельки металла.

В зоне фурм стекают вниз расплавы, образовавшиеся выше, и при плавлении железа образуются новые расплавы. В капли таких расплавов или в их натеки на твердых кусках будут налипать капельки жидкого металла, образовавшиеся в факеле из крупинки концентрата. Эти ка-

пельки могут налипать также и на твердые куски шихты. Если в плавке меди факел выделяет жидкий металл в ванну с расплавами, то в горне домны или «Угольного Мидрекса» факел будет выделять жидкий металл на куски шихты с натеками расплавов. При этом общая поверхность кусков шихты на пути факела много больше, чем поверхность ванны, поэтому условия выделения капелек в массиве шихты лучше.

Таким образом, целесообразно дополнить агрегат «Угольный Мидрекс» вдуванием концентрата вместе с вдуванием угольной пыли. На той части металла, которая получается в факеле из концентрата и угольной пыли, экономятся, грубо говоря, переделы окускования и коксования, общая стоимость которых составляет около половины стоимости металла.

Можно, очевидно, половину всего металла получать из концентрата, вдуваемого снизу, то есть вдувать концентрата по массе столько же, сколько окатышей загружается сверху. Если масса концентрата сильно превысит массу окатышей, то может чрезмерно вырасти температура отходящих газов на колошнике.

4.3. Металлизация пылегазовой взвеси в рекуператоре. Получение порошка железа

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

Из дискуссии

Железорудный концентрат в смеси с угольной пылью может переноситься и реагировать не только в интенсивных потоках факелов, но и в обычных газовых потоках рекуператора или домны. В этом состоянии можно эффективно вести металлизацию за счет дешевого рекуператорного тепла.

В факелах, исходящих из доменных фурм, из кислородных фурм, в топливных факелах начальная скорость газов обычно имеет величину порядка 100 м/с и больше. Иногда используются сверхзвуковые скорости потоков, больше 330 м/с. 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 10 м/с. Примерно так же потоки ко-

лошниковых газов уносят из домы колошниковую пыль, которая отделяется затем различными методами пылеочистки.

Скорость V свободного падения в воздухе малых частиц радиуса R в газе можно достаточно точно оценить по формуле Стокса¹:

$$V = \frac{2/9(DgR^2)}{\eta},$$

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].

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.

Угольная пыль, применяемая в доменном процессе, обычно имеет крупность минус 20-30 мкм. Скорость падения самых крупных частиц такой пыли в воздухе составляет примерно 10 см/с. При крупности минус 20 мкм такую же скорость падения будут иметь и наибольшие частички концентрата.

Если в комнате высотой 3 м равномерно распылить такие порошки, то даже при совершенно неподвижном воздухе самые крупные частицы (20-30 мкм) пройдут путь от потолка до пола и осядут лишь через $300/10=30$ с. Но практически в комнате всегда есть конвективные потоки

¹ Скорость падения частиц концентрата в воздухе можно сопоставлять с общеизвестным падением снежинок. Скорость снежинок обычно больше, например 1-2 м/с, так как снежинки крупнее. И частицы концентрата, и снежинки легко уносятся уже «умеренным» ветром, скорость которого составляет около 3-5 м/с. Потоки газа в рекуператоре, а также в домне, в агрегате «Мидрекс» обычно турбулентные и значительно более интенсивные. Они тем более способны переносить частицы концентрата и аналогичные частицы угольной пыли во взвешенном состоянии. Примерно так же мелкая снежная пыль уносится сильным порывистым ветром в метель.

Газовые потоки фурм и факелов, имеющие скорость порядка 100 м/с, способны переносить куски руды, кокса, окатыши, любые куски шихты. Отметим для сравнения, что парашютисты с нераскрытым парашютом падают со скоростью порядка 50 м/с, и большой вертикальный поток воздуха при такой скорости способен поднять даже такую «частицу», как парашютист. Видимо, окатыши падают в воздухе со скоростью порядка $V_0=20$ м/с, и поток газа со скоростью больше V_0 способен переносить «взвесь окатышей в газе».

Если скорость потока газа в целом немного меньше V_0 , то окатыши будут концентрироваться внизу, но не смогут образовать плотную засыпку, так как в промежутках между частицами скорость газа будет больше V_0 . Получится так называемый кипящий слой с интенсивным движением и перемешиванием окатышей внутри слоя.

воздуха со скоростью больше 10 см/с, поэтому процесс оседания такой пыли будет весьма длительным. Пыль будет долго носиться в воздухе. Подобным образом носится в комнате и обычная бытовая пыль; движение ее частиц можно наблюдать при специальном освещении. Бытовая пыль по размеру частиц соответствует мелким фракциям концентрата.

Подобный «запыленный газ» можно прокачивать через рекуператоры или теплообменники без значительного оседания пыли.

Если через рекуператор пропустить такую пылегазовую смесь концентрата с угольной пылью, то концентрат металлизуется, смесь прореагирует примерно за то же время, за которое реагируют газы, проходя дому или агрегат «Мидрекс», например, за 10 с и меньше.

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 . К тому же рекуператоры можно отапливать почти любым, в том числе дешевым топливом, например, доменным газом или 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.

Металлурги обычно мыслят получение металла как продувку смеси кусков руды и топлива. Возможности инжекционных технологий в факелах еще только осознаются и осваиваются. Что касается возможностей реакций в состоянии пылегазовой взвеси (в обычных сравнительно медленных газовых потоках), то они, очевидно, в основном еще не осознаны.

Возможен следующий процесс. В рекуператор вводится пылегазовая взвесь концентрата и угольной пыли, взвешенная в потоке окиси углерода CO , и прогревается. Когда такая пылегазовая смесь достигнет зоны «мидрексовых температур» около 750°C , будет достигнута высокая скорость реакции. При дальнейшем нагреве из пылевидного концентрата за несколько секунд получится твердый порошок железа, как и в агрегате «Циклон», а также сгорит соответствующее количество угольной пыли и выделится порция газообразных продуктов металлизации, в основном CO , по реакции $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$.

Полученный металлизированный порошок железа (с остатками угольной пыли) можно выделять из пылегазовой взвеси аппаратом «Циклон» как в горячем состоянии, так и после охлаждения пылегазовой взвеси. Для аппаратов «Циклон» характерна полнота очистки газа от обычной пыли порядка 95 % или отделение из взвеси 95 % газа. В на-

шем случае пыль крупнее и с большим удельным весом, поэтому можно рассчитывать на более полное отделение порошка железа. Перспективно выделение порошка железа из газового потока электромагнитом. При этом железо будет еще и очищаться от остаточных немагнитных частиц угольной пыли.

Если порошки отделены, то остающийся газ СО может поступать на отопление другого рекуператора. Выделяется небольшой «переходящий остаток» газов СО, в который всыпается новая порция концентрата и угольной пыли, и эта смесь направляется на следующий цикл.

После сжигания и охлаждения выводимые из агрегата газы, прежде чем окончательно его покинуть, проходят еще окончательную и более тщательную очистку от остатков пылевидного железа, его окислов и угля (FeO, Fe и C), например, пропусканием через рукавные матерчатые фильтры или методами мокрой, а также электростатической пылеочистки. В этой части применимы технологии, применяемые для пылеочистки колошниковых газов после домны, а также технологии очистки воздуха от бытовой пыли.

По стехиометрическому соотношению реакции расчетный расход углерода составит 285 кг на тонну металла. При дожигании полученного газа СО можно получить больше тепла, чем требуется для обогрева рекуператора. Агрегат даст некоторый избыток горючего газа.

Отметим, что в данном случае получаемый газ не разбавлен азотом воздуха и СО₂, как доменный газ, и является высококалорийным топливом, пригодным для получения ценного высокотемпературного тепла. Теоретическая температура горения СО даже выше, чем у природного газа СН₄. Можно отапливать рекуператор менее ценным топливом, например, доменным газом, а полученный при металлизации газ СО использовать где-то как более ценное высококалорийное топливо.

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.

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 топливные факелы горелок, которые устанавливаются на больших электропечах. Подобные порошки загружают в завалку также в пакетах, мешках. Горячий порошок железа может идти также на горячее прессование брикетов; так прессуют горячие окатыши в процессе «Хилл-3».

4.4. Получение жидкого металла за счет металлизации в рекуператоре

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

Из дискуссии

Металлизация за счет дешевого рекуператорного тепла выгодна и при получении жидкого металла. Возможен следующий процесс.

Пылегазовая смесь вводится в рекуператор, металлизуется и греется там до высоких температур, например, до температур доменного дутья 1100 °С. Затем такая металлизированная пылегазовая взвесь вдувается в ванну жидкого металла.

Чтобы обеспечить достаточно полное попадание крупинок 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. При нужном направлении и скорости газовых потоков (факелов) практически все частицы металла, как жидкие, так и твердые, попадают в расплавы ванны. Такой факел может быть организован также как топливный факел прогрева ванны или как факел кислородного дутья в конвертере при заглубленной фурме.

Наиболее надежное поглощение расплавами всех крупинок или капелек металла можно обеспечить при вдувании металлизированной пылегазовой взвеси с температурой 1100 °С не сверху, а через фурмы бокового дутья в объем металла. В качестве аналога здесь можно взять дутье в печи Ванюкова или в процессе «Ромелт». Но, видимо, можно обойтись и более простыми отмеченными методами вдувания смеси сверху.

Оставшиеся от пылегазовой смеси газы (в основном СО) идут в рекуператор, где дожигаются и отдают тепло, после чего их основная часть выводится из агрегата. В «переходящий остаток» газов впрыскива-

ется новая порция смеси концентрата с угольной пылью; далее эта смесь идет на новый цикл, разогревается и металлизуется в рекуператоре, вдувается в жидкую ванну, плавится и т. д.

Основная часть тепла процесса (88 %), которая идет на восстановление металла и прогрев его до 1100 °С, получается металлом в рекуператоре, обеспечивается за счет дешевого рекуператорного тепла. Но для расплавления металла и нагрева его от 1100 °С до конечной температуры выпуска металла (1500 °С) необходимо еще 12 % полного тепла процесса (расчёт 12 приложения). Рассмотрим возможные методы получения этих 12 % высокотемпературного тепла.

1. При «металлургических» температурах (1100-1500 °С) в равновесии с углеродом газовая смесь CO-CO₂ содержит лишь доли процента CO₂. В равновесии с железом, которое металлизуется по реакции $FeO + C = Fe + CO$, смесь содержит 20-25 % CO₂. Во время металлизации за счет этой разности концентраций углекислота CO₂ диффундирует в пылегазовой взвеси от крупинки железа к пылинкам угля.

Когда металлизация заканчивается, прекращается, крупинки железа становятся инертными по отношению к газу и во всей смеси устанавливается равновесие с остаточным углеродом, то есть газовая смесь становится почти чистой CO. Добавкой кислорода или доменного дутья в смеси можно сжечь до 25 % окиси углерода CO (а также остаточный углерод), не вызывая окисления железа. Можно получить примерно такую же степень полного горения, которая реализуется сейчас в домнах.

Расчет 7 приложения приводит к выводу, что тепла такого частичного дожигания газов достаточно для расплавления металла и нагрева всей смеси на 760 °С. Для нужного нам нагрева смеси на 400 °С, от 1100 до 1500 °С, достаточно дожигание 15 % газа. Кислорода потребуется 40 нм³/т. В таких количествах кислород нередко добавляют к доменному дутью.

Водорода в смеси H₂-H₂O при равновесии с металлизующимся железом содержится 40-50 %, примерно в два раза больше, чем CO. Если металлизацию вели углем с повышенным содержанием углеводов, то частичное дожигание газовой смеси может дать больше тепла. Водород ускоряет также реакции металлизации, так что в этих процессах целесообразно использование так называемых «геологически молодых» углей с повышенным содержанием углеводов.

Таким образом, частичного дожигания газов металлизации достаточно для плавления полученного металлизированного порошка и прогрева его до температуры ванны, до 1500 °С. Из металлизированной пылегазовой взвеси, которая прошла рекуператор, можно сформировать факел

горения, добавляя кислород или горячий воздух. Такой факел, вертикальный или наклонный, будет вносить капельки жидкого металла в расплавы ванны. Достаточно полное попадание капелек в расплавы можно обеспечить такими же методами, как и при кислородно-факельной автогенной плавке меди, которая сейчас уже хорошо отлажена.

Оставшиеся газы после этого могут направляться в рекуператор, где они проходят окончательное дожигание и отдают физическое тепло.

2. Может оказаться, что металлизированную пылегазовую взвесь удобнее вдвухать в расплавы отдельно, без горения, в концентрированном виде и отдельным факелом, специально отрегулированным на эту функцию. Другой факел, прогревающий ванну, можно сформировать из одних лишь газов (CO , H_2), которые выделяются из пылегазовой взвеси аппаратами «Циклон» на разных стадиях металлизации. Факел горения формируется при добавке к такому потоку газов кислорода или доменного дутья, и, при необходимости, еще и угольной пыли.

Здесь мы снова встречаемся все с той же проблемой неполного горения топлива, которую уже пришлось много раз обсуждать, начиная с «несообразности № 1» доменной печи. Существующие способы обогрева (или отопления) ванны с расплавами часто неэффективны из-за невозможности полного горения. Если факел горения плотно контактирует с углеродистым металлом и доходит до равновесия с ним, то возможно горение углерода по первой стадии, до CO . В этом случае выделяется 28 % возможного тепла, причем большая часть этого тепла уносится горячими отходящими газами. Ванна получает лишь 9 % полного тепла горения.

Такое отопление ванны с расплавами очень неэффективно. Для обеспечения всего тепла процесса получения металла в таких условиях требуется сжечь 2700 кг/т углерода (см. раздел 2.6 и расчёт 5 приложения). Поэтому для расплавления и нагрева металла от 1100 до 1500 °С, то есть для обеспечения 12 % тепла, потребуется еще $2700 \cdot 0,12 = 325$ кг/т. На обеспечение этих 12 % высокотемпературного тепла потребуется больше топлива, чем на предыдущие 88 %.

Выход состоит в том, чтобы организовать более мягкий обдув ванны, не пробивающий полностью шлак, чтобы газы факела почти не реагировали с жидким металлом. Безжелезистый шлак химически нейтрален к газам горения, и в контакте с ним возможно практически 100 %-ное полное горение углерода и газов до CO_2 . Почти полное (например, на 80-90 %) горение возможно и в контакте факела с железистым шлаком, если он достаточно окисленный, отношение $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (или двух-

валентного железа к трехвалентному) не слишком велико. В этих условиях можно добиться достаточно полного дожигания газов. Расход топлива на этой стадии можно сократить почти на порядок величины. Лучше также при возможности перейти от кислородного дутья к доменному (1200 °С) и организовать «доменное» прогревание ванны с расплавами.

В агрегатах типа «Ромелт» удастся добиться примерно 30 % полного горения до CO_2 и сократить расход топлива на получение металла примерно до 1000 кг/т. В доменной печи доля полного горения составляет обычно около 25 %.

3. Еще одна возможность – плавление металлизированного концентрата на кирпичных кладках рекуператора, за счет дешевого рекуператорного тепла.

Сейчас нередко температура доменного дутья доходит до 1300 °С, а иногда и до 1400 °С, причем в этом случае кладку рекуператора приходится прогревать уже примерно до 1500-1600 °С. Примерно при таких температурах работают также своды мартеновских (отражательных) печей или футеровка электропечей.

При таком прогреве кладки на ее кирпичях могут плавиться крупинки металлизированного концентрата, образовывать натеки расплавов, которые стекают в ванну. При этом на последнем высокотемпературном участке рекуператора пылегазовая взвесь должна двигаться сверху вниз (рис. 4.1), чтобы движение газов не препятствовало движению расплавов, а способствовало ему.

Температура плавления чугуна 1140 °С, углеродистой стали при 2 %С – около 1300 °С. Реальная задача расплавления таких металлов на горячей кладке, если ее прогреть до 1400-1600 °С.

Схема агрегата может быть подобной схеме мартеновской печи (см. рис. 4.1). Пылегазовая смесь поступает, например, из правого рекуператора, отдает ванне капельки жидкого металла (с растворенными остатками углерода) и шлака. Оставшийся газ CO уходит в левый нагреваемый рекуператор. Затем направление продувки меняется и охлаждаться будет уже левый рекуператор, а нагреваться дожиганием газа CO – правый. В промежутке между двумя рекуператорами в смесь дается небольшое количество дутья для ее нагрева, примерно на 100-200 °С. Здесь уже нет жидкого металла и углерода, и ничто не мешает вести полное горение. Факел такого горения можно организовать так, чтобы он дополнительно прогревал расплавы ванны.

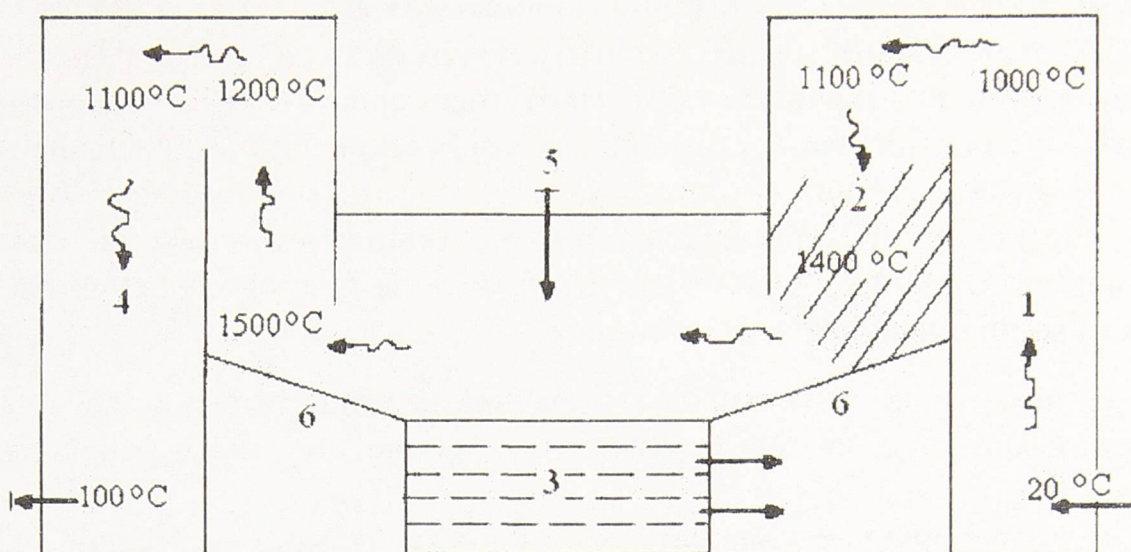


Рис. 4.1. Схема агрегата с плавлением металлизированного концентрата на огнеупорах рекуператора:
 1, 4 – левый и правый рекуператоры; 2 – зона плавления; 3 – горн; 5 – дутьё;
 6 – наклонный под; цифры – температура газов

Высокотемпературный участок кладки рекуператора будет со временем разрушаться расплавами. Сюда можно добавлять сверху кирпичи огнеупоров. Со временем кладка сменится беспорядочной насыпкой кирпичей огнеупора, однако для плавления металла такая насыпка также подходит. Можно с самого начала выполнять здесь не кладку, а беспорядочную насыпку кирпичей огнеупора или боя огнеупорного кирпича. По мере прогорания такая насыпка пополняется сверху. Кирпичи намного крупнее окатышей, поэтому газопроницаемость такой насыпки будет 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 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 рекуператоре (см. рис. 4.1) на огнеупоры такой насыпки действуют температуры не выше 1500-1600 °С, как и на огнеупоры современных рекуператоров или на огнеупоры

сталеплавильного агрегата, поэтому стойкость насыпки может быть вполне достаточной.

В этой схеме, как и в «Угольном Мидрексе», нет необходимости до предела переуглероживать металл. Подбирая соответствующую величину избытка угольной пыли, можно получать содержание углерода в металле, которое соответствует стали.

Накапливающийся в ванне жидкий металл может стекать в выносной горн-отстойник, где его состав и температура усредняются и корректируются, доводятся до показателей рядовой (или даже рафинированной) стали.

В этом варианте уже весь процесс полностью (или почти полностью) обеспечивается дешевым рекуператорным теплом. Металлургическое топливо требуется лишь как восстановитель.

4.5. Оптимизация прогрева пылегазовой взвеси

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

Из дискуссии

В настоящее время роль рекуператоров как бы второстепенная, и их совершенствование не пользуется большим вниманием. Возможности повышения тепловой мощности доменных рекуператоров использованы далеко не столь тщательно, как возможности повышения мощности самих печей. Здесь имеются большие резервы.

Основным элементом, поглощающим или выделяющим тепло в доменном рекуператоре, столетиями остается обычная кирпичная кладка, хотя размеры, форма и материал этих кирпичей подбирались именно для удобства кладки различных сооружений, а отнюдь не для целей оптимального теплообмена в рекуператоре. Но если мы переходим к металлизации концентрата в рекуператоре, то важно от рекуператора получить большой объем тепла, он становится основным агрегатом, его совершенствование становится весьма актуальным.

Имеется много возможностей улучшения теплообмена и, соответственно, оптимизации предлагаемых процессов металлизации. Обмен теплом между горячими отходящими газами и нагреваемой пылегазовой взвесью можно вести значительно интенсивнее в теплообменнике. Можно даже в простом стандартном чугунном теплообменнике 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 жаростойкими эмалями. 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 охлаждаемые газы.

Если требуется нагрев до наиболее высоких обсуждаемых температур порядка 1100 °С, то можно стальные стенки теплообменника заменить керамическими стенками с оптимальной толщиной, которые 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.

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 отходов, например, колошниковой пыли, измельченной окалины, шлама и др. Предлагаемый способ удобен тем, что такой агрегат, в отличие от существующих установок металлизации, может быть прост, дешев и сравнительно невелик по размерам. Агрегат металлизации может состоять из теплообменника, вентилятора и пылеуловителя «Циклон» для выделения порошка из газа. Такой способ целесообразен для небольших производств.

4.6. Технические сложности

Важно обеспечить высокую 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. Для доменной плавки применяется даже шихта с весьма низкой степенью металлизации 40-50 % при содержании металлического железа $Fe_M = (38-46) \%$ [37, с. 15].

Скорость реагирования *газа* в рекуператоре, скорость изменения его концентрации можно сопоставлять со скоростью реагирования газа в агрегате «Мидрекс» или в домне. Скорость *металлизации окислов*, время такой металлизации несопоставимы с домной, так как на единицу газа приходится в тысячи раз меньшее количество твердого вещества.

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. 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 можно получить достаточно высокую степень металлизации пылеугольной взвеси, пропускаемой через рекуператор. 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 и степень металлизации будет примерно такой же. Производительность такого рекуператора будет примерно такой же, как и домны или агрегата «Мидрекс» равного объема.

Восстановление окатышей тормозится диффузией газов внутри окатыша; сначала металлизуются поверхностные слои и лишь затем фронт металлизации медленно перемещается к центру окатыша. В пылегазовой смеси нет такого торможения реакции.

При необходимости скорость металлизации в рекуператоре можно увеличивать за счет увеличения давления газа, большей турбулизации газовых потоков, увеличения температуры. Скорость металлизации можно также увеличить за счет перехода к более мелким частицам взвеси, если отбирать для металлизации более мелкие фракции концентрата. Если температура на выходе будет 1100 °С, то это уже намного выше «температур Мидрекс» (около 750 °С).

Время пребывания пылегазовой взвеси в теплообменнике t определяется по формуле, с:

$$t = V/W,$$

где V – объём теплообменника, м³; W – скорость вдувания смеси, м³/с.

Линейную скорость движения газа в рекуператоре можно увеличивать, если делать путь газов в нем более «извилистым». Можно заставить газ не один раз пройти рекуператор, а несколько раз проходить его длину туда и обратно.

После того как взвесь пройдет теплообменник, можно отделять основную часть полученного газа «Циклоном», а оставшуюся более концентрированную взвесь направлять на повторный цикл или циклы про-

дувки. Так можно добиваться более высокой степени металлизации. Скорость реакций увеличится при этом также вследствие повышения концентрации твердых частиц во взвеси.

Практически скорость реакций в данном процессе, как и во многих других металлургических процессах, в основном будет определяться скоростью прогрева смеси, то есть тепловой мощностью рекуператора. Отметим, что тепловая мощность доменных рекуператоров обычно больше тепловой мощности самой домны. Рекуператорное тепло, поступающее с горячим дутьем, больше тепла горения топлива в печи (расчёт 1 приложения).

Опыт реакций в факелах также убеждает в том, что реакции тонких порошков могут протекать здесь быстро, за время прохождения факела, что обычно значительно меньше 1 секунды, и часто меньше 0,1 секунды. Реакции горения меднорудного концентрата или угольной пыли в кислородном факеле заканчиваются, например, за несколько сотых секунды.

Возможна следующая опасность или техническая сложность таких процессов: если металлизующую пылегазовую смесь перегреть, то в принципе может начаться припекание частичек металла к футеровке рекуператора или спекание этих частичек в комки большего размера. Выше 1140 °С может начаться даже плавление частиц с образованием натеков и настывей чугуна на кладке рекуператора или трубопровода. Чтобы не допустить этого, можно усилить турбулентность в потоке газов и несколько понизить температуру прогрева пылегазовой смеси в рекуператоре, например, до 1100 °С. Можно также отсеять более крупную фракцию порошка концентрата, а работать с более мелкими частицами, что одновременно повысит и скорость реакций. Однако таких предосторожностей, вероятно, обычно не потребуется.

Действительно, чтобы прошло спекание, железный порошок пресуется, а затем его крупинки в сжатом состоянии выдерживаются, например, 4 часа при температурах 900-1200 °С. В рекуператоре будут лишь кратковременные и редкие столкновения крупинок в газовом потоке.

В рекуператоре возможно также оседание пыли из взвеси, например, на горизонтальных верхних поверхностях кирпичей. Такую осевшую пыль можно «выдуть» кратковременным усилением продувки. В агрегатах, специально изготовленных для металлизации, можно уменьшить долю таких горизонтальных поверхностей, на которых может оседать пыль, а также увеличить турбулентность газовых потоков.

В схеме (см. рис. 4.1), где взвесь плавится на кирпичках насадки рекуператора, в области, предшествующей плавлению, возможно образование настывей за счет спекания частиц взвеси. Такие настыви можно расплавить кратковременным повышением температуры взвеси. И «выдувание» осевшей пыли, и плавление настывей можно провести чисто газовым дутьем, не содержащим порошков.

Если металлизуется суперконцентрат для применения в порошковой металлургии, то нельзя допустить, чтобы полученный порошок металлизированного концентрата содержал примесь остатков угольной пыли и ее золы. В этом случае можно за счет тепла рекуператора отдельно провести газификацию угольной пыли с продуктами ее горения ($C+CO_2=2CO$), затем удалить «Циклоном» остающиеся твердые частицы, и лишь после этого в полученный восстановительный газ CO ввести порошок концентрата на металлизацию. Так же можно вести восстановление отдельно от газификации угля и для получения более чистого сталеплавильного сырья.

В предлагаемом агрегате движение сырья в виде пылеугольной взвеси идет под действием хорошо известных сил в газовых потоках и легко регулируется. В доменной печи движение шихты принципиально неустойчиво, состоит из подвисаний и обрушений. В агрегате «Мидрекс» или «Угольный Мидрекс» возможны некоторые неравномерности из-за остаточного трения, неравномерностей выгрузки или оплавления. При движении пылегазовой смеси в рекуператоре и в факеле, очевидно, не будет уже никаких подобных неравномерностей движения сырья; реализуется наиболее простое, наиболее регулируемое и управляемое движение сырьевых материалов в виде пыли в потоке газа. Если доменный процесс сохраняет еще ряд особенностей древнего ремесла, то металлизация в рекуператоре уже приобретает вид процесса современной химической технологии.

Можно в разных точках отбирать из рекуператора пылегазовую взвесь или ее часть, отделять «Циклоном» газы от более концентрированной взвеси. Газы можно направлять на дожигание в факеле, прогревающем ванну с расплавами, а концентрированную взвесь – на повторные циклы металлизации для повышения степени металлизации. Пропускание пылегазовой взвеси через «Циклон» – несложная и недорогая операция, и ее можно выполнять несколько раз.

Отметим, что в этом процессе угольная пыль вводится в поток не окислительных, а восстановительных газов; она не дает опасного бурного горения уже в точке ввода. При металлизации в рекуператоре угольную пыль можно просто всыпать в газовые потоки. Если для вдувания ее

в домну требуется дорогое специальное оборудование, то здесь эта трудность отпадает, можно применять угольную пыль в доменной плавке без дорогого специального оборудования.

Возможность металлизации пылегазовой смеси в рекуператоре сейчас остается неосознанной (или недостаточно осознанной) из-за общего давления доменной идеологии. В центре внимания этой идеологии всегда было получение металла продувкой кусков руды и топлива. В древней и средневековой металлургии не было инжекционных устройств с пылевидными материалами, поэтому инжекционная металлургия не могла зародиться, внедриться в доменную идеологию. Еще далеко не осознаны возможности металлургических реакций в факелах, хотя такие реакции применяются в разных отраслях техники.

Для пылегазовой взвеси сейчас не осознана, видимо, сама возможность пропускания такой смеси через теплообменник или рекуператор. Не осознан тот факт, что интенсивные газовые потоки рекуператора способны переносить эту смесь во взвешенном состоянии, не допуская ее оседания или выпадения в каких-то зонах. При этом можно металлизировать железорудный концентрат и без окускования сырья, и при полном сжигании топлива, и при 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 непосредственно перед доменной печью или даже уже в факел в самой печи. Традиционно практически не используется вдувание в холодный воздух перед рекуператором. Между тем в этом варианте вдуваемое вещество прогревается дешевым рекуператорным теплом и вносит это тепло в горн, тогда как при вдувании прямо в печь порошок приходит в горн холодным.

Глава 5

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПРОДУВКИ В СУЩЕСТВУЮЩИХ ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ

5.1. Вдувание концентрата

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

Из дискуссии

Если мы пытаемся ввести существенные изменения в доменную плавку, то мы самым непосредственным образом сталкиваемся с доменной идеологией. Кроме того, в обычных вариантах доменная плавка – это пугающе-капризный и плохо управляемый процесс. Чтобы задуть домну после ремонта и вывести на стационарный режим, требуется, например, полмесяца кропотливого и рискованного регулирования процесса. Если наступает похолодание горна и принимается решение увеличить долю топлива в завалке, то это топливо дойдет до горна и повысит температуру через 6-20 часов. Ответственность за работу огромного и пугающе-капризного агрегата заставляет доменщиков очень дорожить отлаженными режимами процесса. Основной задачей становится сохранение и всяческое оберегание сравнительно безопасных и надежных режимов плавки. Любые предлагаемые существенные изменения нередко воспринимаются как авантюристические и недопустимо опасные.

Из приемов, рассмотренных выше, сейчас имеют шансы на внедрение, видимо, лишь такие изменения процесса, которые можно выполнить не скачкообразным, а постепенным изменением параметров, плавно накапливая изменения и убеждаясь на каждой стадии преобразования процесса в том, что эти изменения целесообразны и полезны. Желательно также, чтобы предлагаемое новшество увеличивало возможности регулирования теплового режима горна печи и облегчало сход шихты, увеличивало газопроницаемость. Этим требованиям отвечает вдувание в домну железорудного концентрата.

Действительно, вдувание концентрата подобно вдуванию угольной пыли, которое уже стало в принципе вполне привычным приемом (хотя в России все еще не применяется). 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.

Экономический эффект вдувания пыли и вдувания концентрата может быть примерно одинаков в расчете на тонну металла. В сумме разность цены кокса и угольной пыли, агломерата и концентрата составляют примерно половину всей стоимости чугуна или даже больше.

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 пыль сгорает практически полностью. Ее приходится готовить очень тонкой (20-30 мкм), концентрированно впрыскивать под большим давлением через специальные водоохлаждаемые устройства, вводимые в фурмы. Пыль впрыскивается в определенные точки потока дутья в фурме, часто в виде водной или мазутной суспензии. Много проблем возникает 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 газовых углей с большим (50 % и больше) содержанием углеводородов. При измельчении угля со свежих поверхностей выделяются газообразные углеводороды, которые с воздухом могут образовать взрывоопасные смеси. Практически приходится вести эти процессы без доступа воздуха.

Предложение вдувать концентрат сначала тоже вызывает представление о том, что потребуются сложное оборудование для впрыска концентрата в определенную точку потока дутья под высоким давлением, как и при вдувании угольной пыли, о том, 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. Введение его в поток дутья не-

сложно; достаточно поставить закрытый контейнер над воздушным трактом и всыпать порошок концентрата в дутье с помощью дозатора. В контейнере поддерживается 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. Введение порошка концентрата в поток дутья можно выполнить также с помощью примерно такого же аппарата, каким кусковые материалы загружаются на колошнике. В отличие от угольной пыли, не требуется впрыскивать его под высоким давлением в точно определенные зоны потока дутья, через трубы, вводимые прямо в фурмы.

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 формирования окатышей необходимо добавлять вяжущие материалы, обычно бентонитовые глины.

Возникают некоторые сложности при перевозке и разгрузке концентрата, особенно влажного. Но даже если пришлось бы перейти к опрокидывающимся контейнерам или даже к опрокидывающимся вагонам, при большом объеме производства это не приведет к существенному его удорожанию.

Угольная пыль вдувается в горн печи холодной, тогда как куски кокса приходят в горн прогретыми в шахте печи, например, до 1200 °С. Поэтому при прочих равных условиях расчетный расход угольной пыли получается больше, чем расход кокса, на 5 % при полном сжигании топлива и на 11 % при обычном соотношении %CO/%CO₂ (расчёт 11 приложения). Но и в увеличенном на 5 или 11 % количестве угольная пыль стоит намного меньше кокса. Многие опыты приводят даже к выводу, что пыль в домне замещает практически равное количество кокса [8].

Если порошок концентрата всыпается в горячее дутье, то это также эквивалентно введению его в горн в холодном состоянии, и приведет примерно к такому же увеличению расхода топлива на 5-11 % на той части металла, которая получается не из агломерата или окатышей, а из концентрата. Но концентрат можно вводить еще в холодное дутье, еще до рекуператора, пропускать с дутьем через рекуператор, нагревать примерно до 1200 °С за счет дешевого рекуператорного тепла и, соответственно, избежать отмеченного увеличения расхода топлива в печи. С точки зрения теплового баланса горна, загрузка окатышей сверху и вдувание концентрата будут в этом случае примерно эквивалентны; в

обоих случаях рудная компонента поступает в горн с температурой около 1200 °С, и не будет увеличения расхода топлива на 5-11 %.

Концентрат можно просто всыпать в поток дутья еще на заборе воздуха, еще до воздуходувки, еще при нормальном давлении. Здесь не потребуется и закрытый контейнер или аппараты типа колошниковых загрузочных устройств, достаточен обычный открытый бункер с дозатором.

Газовые потоки в рекуператоре достаточно интенсивны, чтобы переносить пылинки концентрата во взвешенном состоянии. Скорость их падения в газе составляет максимум 50 см/с для концентратов «минус 74 мкм» и порядка 10 см/с для более мелких фракций этого концентрата «минус 30 мкм». В этом случае в печь вдувается не чистый воздух, как обычно, но как бы запыленный концентратом.

Предложение вдувать незначительные количества концентрата часто не вызывает возражений. Неосознанными обычно остаются простота этого приема, его большой экономический эффект, возможность прогрева концентрата в рекуператоре и возможность вдувания его в больших количествах. Если наращивать количество вдуваемого концентрата очень медленно, контролируя последствия, то можно, очевидно, достичь до 5-10 %.

Это даст примерно такой же экономический эффект, как и замена 5-10 % кокса вдуваемой угольной пылью. После того, как процесс с вдуванием 5-10 % концентрата будет хорошо отлажен, можно пытаться дальше наращивать его долю.

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. Хотелось бы увеличить долю кокса в шихте, облегчить и сделать более ровным ее сход, повысить газопроницаемость.

При вдувании концентрата это пожелание можно выполнить с избытком, увеличивая долю кокса в столбе шихты в пределе хоть до 100 %, если приближаться к полной замене окатышей вдуваемым концентратом.

Появляется также возможность легко и быстро регулировать температуру горна в широких пределах, варьируя количество вдуваемого концентрата в дутье. Повышается управляемость процесса. В домне обычно жестко связаны процессы горения и восстановления, мало возможностей повлиять извне на соотношение выделения и поглощения тепла, трудно быстро регулировать температуру горна при его перегревах или переохлаждениях.

В регулировании температуры горна вдувание концентрата дает больше возможностей, чем вдувание угольной пыли; варьирование количества пыли практически не изменяет общую интенсивность процессов горения в горне, которые определяются общим количеством вдуваемого кислорода дутья. При вдувании пыли заменяется горение кокса на эквивалентное горение пыли.

Увеличение количества вдуваемого концентрата эквивалентно увеличению доли окатышей в завалке, но действует практически мгновенно, а не через 6-20 часов после изменения пропорций в завалке. Вдуваемый концентрат в горне практически сразу восстанавливается и плавится, независимо от аналогичных процессов, которые идут с окатышами. Поэтому добавка концентрата сразу же понизит температуру в горне, а уменьшение его количества – повысит. 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.

Таким образом, предлагаемое вдувание концентрата отвечает обычным пожеланиям доменщиков об увеличении доли кокса в завалке, увеличения ее газопроницаемости, облегчении схода шихты. В теоретическом пределе, при полной замене окатышей концентратом, останется один лишь кокс. Сход такой «шихты» будет идти без спекания и зависания, станет таким же, как при обжиге сухих материалов, например, при обжиге известняка.

Полностью устраняются процессы спекания и, соответственно, зависания шихты. Одновременно появляется возможность быстро и в широких пределах регулировать температуру горна. Можно практически полностью избавиться от неустойчивости схода шихты, и, соответственно, от рискованного балансирования между перегревами и переохлаждениями печи. Столб шихты станет намного легче, газопроницаемость будет велика, и улучшатся возможности для замены кокса углем.

Правда, при какой-то достаточно большой доле концентрата увеличение доли кокса в кусковой шихте станет уже больше тех величин, которых обычно добиваются доменщики, потребует перейти в область непривычных параметров плавки. Потребуется обобщение опыта работы с вдуванием концентрата, отладка режима в новых, «слишком хороших» условиях, прежде чем дальше увеличивать его долю.

5.2. Возможные отрицательные последствия

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

Из дискуссии

Рассмотрим некоторые возможные отрицательные последствия вдувания концентрата.

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 образует не столь тугоплавкие соединения типа фаялита, но в рекуператоре, в горячем воздухе нет условий для образования вюстита. В целом такое припекание представляется весьма маловероятным 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.

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. Потери оказываются небольшими как при вдувании пыли, так 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.

Вдувание концентрата, как и вдувание угольной пыли, приведет к некоторому перераспределению температуры в 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 участках факела, исходящего от фурмы, и понижает ее на последующих участках. Вдувание концентрата здесь приведет к обратным изменениям. Отметим, что при совместном вдувании концентрата и угольной пыли их противоположные влияния на распределение температуры в факеле

должны нивелироваться, взаимно уничтожаться. Совместное действие безопаснее отдельного действия каждого из компонентов в отдельности.

Но и изменения температурного поля при отдельном вдувании как пыли, так и концентрата, нельзя, видимо, считать ни однозначно полезными, ни однозначно вредными, хотя относительно их высказывается много различных опасений, как и относительно любых других изменений в доменном процессе. Здесь сказывается глубокий консерватизм идеологии и недоверие к любым новшествам.

С окатышами вводятся флюсы, которые способствуют раннему расплавлению оксидов в домне и к шлакообразованию уже при температурах порядка 1000 °С. Но частички концентрата при вдувании попадают в факелы дутья, где температура может достигать 2000 °С; здесь плавление обеспечено высокой температурой и, очевидно, в этом случае нет необходимости сопровождать концентрат флюсами, помогающими плавлению. Но при необходимости добавочные флюсы можно добавить в окатыши, загружаемые сверху. Можно, в принципе, в измельченном состоянии вдувать флюсы и в смеси с концентратом, но, вероятно, это не потребуется.

В теоретическом пределе, если полностью заменить окатыши вдуваемым концентратом, то в кусковой шихте останется один лишь кокс. При этом доля полного сжигания топлива (или доля косвенного восстановления), доля CO_2 в колошниковых газах может оказаться несколько меньше, чем в обычном доменном процессе. Расход кокса может несколько увеличиться. При полном исчезновении CO_2 в колошниковых газах (или при полном исчезновении косвенного восстановления) расчетный расход кокса вырос бы с 500 до 600 кг/т (расчёты 1 и 2 приложения), но вдувание концентрата останется выгодным даже и при этих условиях. В действительности косвенное восстановление, конечно, не исчезнет полностью, и реальное возрастание расхода кокса будет меньше.

В целом и при полной замене окатышей концентратом такой процесс будет экономически явно выгоднее современной плавки, даже при некотором увеличении расхода кокса.

Так как концентрат обычно дешевле обожженных окатышей в два раза и более, а стоимость железорудного сырья составляет около половины стоимости чугуна, то расчетная экономия данного приема при 100 % концентрата составит примерно 25 % стоимости чугуна или больше ($0,5 \cdot 0,5 = 0,25$ или 25 %).

Возможно, 10-20 % массы железорудного сырья целесообразно все же вводить сверху, чтобы не слишком понижать долю косвенного вос-

становления. В этом случае на верхних горизонтах печи будут свежие окислы рудной компоненты, способные окислять отходящие газы.

Если будет отлажена почти полная замена окатышей на вдуваемый концентрат, то столб шихты будет состоять практически из одного кокса, станет легким и газопроницаемым, сход шихты станет вполне свободным. Возникнут большие резервы газопроницаемости, и будут созданы условия для замены большой доли кокса углем. Появится также возможность в широких пределах регулировать температуру горна, предотвращать различные расстройства хода плавки.

Вдувание концентрата не получило распространения, явные выгоды этого вполне очевидного и простого приема сейчас не осознаны. 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. Поэтому психологически сложно взяться за вдувание того и другого компонента. 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. Под давлением этой действительности доменная идеология немного потеснилась и допустила вдувание угольной пыли, но лишь в таких количествах, пока это не меняет сущность, концепцию процесса. Но в ряде случаев пыль вдувается уже и в больших количествах.

Вдувание концентрата не получило такой «помощи извне» и преимуществ этого приема обычно остаются неосознанными.

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 представляется, 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.

5.3. Вдувание угольной пыли с порошком концентрата

Каждый должен заниматься своим делом. Доменщики должны оберегать отлаженный режим процесса, давать чугун. Физхимики могут говорить, что этот режим надо сломать, что там сплошные несообразности.

Из дискуссии

Если все же принимается решение о вдувании угольной пыли, приобретается и устанавливается соответствующее оборудование, то целесообразно вдувание пыли совместить с вдуванием концентрата, описанным выше. В этом случае еще больше увеличиваются возможности регулирования температуры в горне за счет варьирования количества обоих компонентов. 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.

Угольная пыль (особенно мелкая) может быстро поглотить почти весь кислород потока дутья от фурмы (факела) и дать газогенераторный газ (CO и H_2). 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. Оставшаяся часть восстановительного газа пойдет вверх на металлизацию окатышей в шахте; этот восстановительный газ может содержать непрореагировавший избыток угольной пыли. Факел с угольной пылью и концентратом способен в массиве шихты работать 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 теплоемкости сырья в шахте и к некоторому повышению температуры колошникового газа, к увеличению потерь тепла с этими газами. Но в данном варианте увеличение расхода топлива можно отнести на увеличение расхода угольной пыли, но не кокса, что в несколько раз дешевле.

Постепенно увеличивая долю пылевидных компонентов, можно дойти до малой доли кусковой шихты, загружаемой сверху. В принципе доменная печь может производить чугун почти из одних лишь пылевид-

ных компонентов, вдуваемых снизу, при небольшой доле кусковых материалов, например, 30 %. Правда, в этом случае температура колошниковых газов приблизится, видимо, к зоне «мидрекс-температур» и составит примерно 500 °С. Угольной пыли придется израсходовать несколько больше, чем будет сэкономлено кокса. Расчетная экономия данного приема при 30 % кусковой шихты составит примерно 35 % стоимости чугуна.

В мировой металлургии вдувание угольной пыли широко распространено¹. Вдувание пыли начиналось в виде малой добавки к коксу, которая не меняет суть процесса. 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 20-30 % всего топлива и даже больше. При слишком малой доле кокса в шихте затрудняется ее сход, наступают недопустимые для домны прочные спекания и недопустимо масштабные и длительные зависания металлизированной массы. Но если окатыши в шихте также заменяются вдуваемым концентратом, то долю кокса в кусковой шихте можно поддерживать на желательном уровне, например, 400 кг на тонну чугуна из кусковой шихты. В то же время общий расход кокса можно понизить, например, до 120 кг/т, если общая доля кусковой шихты снизится до 30 %, при 70 % пылевидных материалов. В этом случае 70 % чугуна в домне будет производиться бескоксовым способом.

Уголь и пыль часто содержат больше серы, чем кокс. Но при обилии дешевого тепла в печи этот их недостаток 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. Потоки 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 10-15 % всего расхода кокса в домнах заменяется угольной пылью.

5.4. Утилизация тепла отходящих газов реакцией металлизации пылегазовой взвеси

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

В. Пузанов

В принципе в доменной печи можно реализовать и другие видоизменения процесса получения металла, которые рассмотрены выше в главах 3 и 4. Но при этом придется отлаживать больше новых элементов процесса и вводить больше конструктивных изменений. Сейчас это вполне может оказаться психологически неприемлемым. Но если будут внедрены предыдущие предложения, отлажена работа с вдуванием большого количества концентрата и угольной пыли, то будет подготовлена почва и для более сложных приемов. Видоизменения процесса, предлагаемые ниже, можно рассматривать как дело будущего.

Как при вдувании концентрата, так и при вдувании угольной пыли с концентратом кусковую шихту не удастся полностью заменить пылевидными материалами. Кусковая шихта необходима для использования физического тепла отходящих газов на прогрев загруженной шихты до 700 °С и на реакции восстановления выше 700 °С. Такая утилизация является одним из важнейших преимуществ домны.

Но тепло отходящих газов можно утилизировать химической реакцией, если за счет этого тепла провести металлизацию пылегазовой взвеси концентрата с угольной пылью.

Возможен следующий процесс. В домне оставляют сравнительно немного кокса, например, заполняют им 20 % полной высоты домны от шлаковой летки до колошника. Вся рудная компонента вводится вдуванием концентрата. Вдувается также угольная пыль, причем со значительным избытком, так что она будет поглощать практически весь кислород дутья, а горение кокса будет незначительным. Кокс нужен здесь не как топливо, но лишь как «заполнитель пространства»; на кусках кокса будут образовываться натеки жидкого металла, образованного пылевидными реагентами, концентратом и угольной пылью. В последующем в этой роли кокс, вероятно, можно в большой степени заменять также коксоподобным углем.

Теплообмен газов и кусковой шихты (кокса) будет незначителен, газы будут покидать слой кокса практически с температурой ванны, около 1500 °С. Над слоем кокса в отходящие горячие газы вдувается пылегазовая взвесь концентрата и угольной пыли в таком количестве, чтобы реакция металлизации поглотила тепло газов и охладила их до «тем-

пературы Мидрекс» порядка 700 °С. Выше 700 °С реакция металлизации идет с большой скоростью, поглощение тепла будет интенсивным. Около 700 °С реакции замедляются.

В такой «пустой» верхней части домны полезно организовать движение отходящих газов не прямо вверх, а по спирали. Эта часть домны будет выполнять как бы роль рекуператора, металлизующего пылегазовую взвесь.

Металлизированный концентрат выделяется из колошниковых газов средствами пылеочистки вместе с колошниковой пылью, и затем вдувается в домну в виде примеси к угольной пыли. Угольная пыль, к которой подмешан металлизированный концентрат, будет иметь меньшую температуру горения и будет менее опасна для окружающих конструкций.

В этом варианте расход кокса будет уже незначителен, и металл будет получаться почти полностью из концентрата и угольной пыли. Это даст экономию около половины стоимости чугуна.

Во время капитального ремонта доменной печи нередко существенно изменяют ее профиль, часто с увеличением рабочего объема печи. Во время ремонта можно установить и устройства вдувания в печь пылегазовой взвеси, а также изменить устройства пылеочистки колошниковых газов так, чтобы они выделяли и пылевидный металлизированный концентрат.

В настоящее время такой процесс выглядит экзотическим. Доменщики, очевидно, сочтут его совершенно неприемлемым, фантастическим и т. д. Но если будут реализованы два предыдущих процесса, которые представляются более «нормальными», то и данный третий процесс будет выглядеть уже более приемлемым.

Отметим, что и без кокса реакция концентрата с угольной пылью в факеле доменного дутья может идти до образования микрокапелек чугуна и вдувания их в расплавы. Если такой факел сделать наклонным к зеркалу ванны, то можно добиться поглощения ванной полученных капелек расплава так, как это делается сейчас в кислородно-капельной автогенной плавке меди. Тогда не потребуется слой кокса, поглощающего капельки расплавов. В «пустой» домне будут работать наклонные факелы, вдувающие капельки расплавов в ванну, а над ними будет выполняться реакция металлизации пылегазовой взвеси, поглощающая избыточное тепло газов.

5.5. Вдувание пылегазовой взвеси, металлизированной в рекуператоре

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

Из дискуссии

Выше (раздел 4.3) отмечено, что если через доменный рекуператор или через теплообменник пропустить взвешенную в газе смесь концентрата с угольной пылью, то произойдет металлизация и прогрев смеси за счет дешевого тепла рекуператора. На выходе из рекуператора мы получим пылевидный металлизированный концентрат, взвешенный в потоке CO, с температурой доменного дутья, например, 1100 °С. В доменной печи останется только нагреть примерно на 300 °С этот металлизированный порошок и расплавить его.

Можно считать, что в этом случае мы переплавляем в домне горячее (1100 °С) металлизированное сырье. Хорошо известно, что добавки обычного металлизированного сырья (холодного) в доменную шихту повышают показатели доменного процесса. Так, на каждые 10 % металлизированной шихты в завалке отмечено снижение на 5-7 % расхода кокса, повышение на 4-7 % производительности [8, с. 341]. Горячее металлизированное сырье соответственно эффективнее холодного.

Если рекуператоры греют как воздух, так и пылегазовую взвесь, то потребуется две системы трубопроводов или один трубопровод, но разделённый перегородкой на две половины. Горячий воздух может вдуваться, например, в четные фурмы, а пылегазовая взвесь – в нечетные. Можно также отладить вдувание обоих компонентов в каждую фурму.

Другой вариант состоит в том, что систему рекуператоров домны мы полностью занимаем металлизацией концентрата в виде пылегазовой взвеси его с угольной пылью и отлаживаем окислительное дутье кислородом или смесью кислорода и воздуха.

Отметим, что здесь появляется простая возможность использования угольной пыли вместо кокса без дорогого современного оборудования, которое требуется сейчас для ее вдувания. Дороговизна оборудования сдерживает применение угольной пыли, которое само по себе выгодно. В предлагаемом процессе угольная пыль просто всыпается вместе с концентратом в поток восстановительного газа (CO), в его «переходящий остаток». В этом газе угольная пыль ведет себя как инертный порошок, и не требуется таких предосторожностей, которые применяют сейчас при ее вдувании, не требуется дорогого оборудования, которое необходимо сейчас для вдувания угольной пыли.

Можно к обсуждаемому процессу подойти более плавно, если в качестве первого шага поставить дополнительный компактный стальной теплообменник, выделить одну фурму для вдувания пылегазовой взвеси и питать ее пылегазовой взвесью из этого теплообменника. После отработки процесса на одной фурме можно увеличить число таких фурм, и лишь после хорошей длительной отладки процесса занять металлизацией рекуператоры. Можно порошок металлизированного концентрата, полученный в теплообменнике, использовать как добавку, как примесь к вдуваемой угольной пыли.

Можно довести количество чугуна, получаемого из пылеугольной взвеси, например, до 70 %, а 30 % сырья загружать в виде окускованной шихты, кокса и окатышей. Этого количества кусковой шихты достаточно для утилизации тепла отходящих газов и понижения их температуры под колошником до значений несколько ниже 700 °С, «температуры Мидрекс».

Следующим шагом, как и выше, можно оставить в печи примерно лишь 20 % кокса, а утилизацию тепла газов выполнять за счет реакции металлизации пылегазовой взвеси, вдуваемой выше уровня кокса. Далее, как и выше, можно отлаживать вдувание капель пылегазовой взвеси, нагретой примерно до 1500 °С, непосредственно в ванну, без сыпучих.

Отметим, что при горении кокса в домне нужно добиваться начальных температур порядка 2000 °С, чтобы газы несли запас тепла на плавление металлизированных окатышей и на реакции восстановления. В случае вдувания прогретой пылегазовой взвеси реакции восстановления и плавление частиц концентрата уже пройдены, и нужна температура лишь около 1500 °С. Поэтому выделение капелек расплавов из пылегазовой взвеси можно провести не только на кусках кокса, но и на кусках огнеупорного кирпича. Можно заменить слой кокса слоем битого огнеупорного кирпича (см. рис. 4.1) и вообще не расходовать кокс.

Следующим шагом может быть отладка прямого вдувания прогретой пылегазовой взвеси в ванну наклонными факелами, как и выше, в разделе 5.4. В данном случае мы придем в домне к такому же процессу, как в разделе 4 (см. рис. 4.1).

Правда, от рекуператоров потребуются значительно больше тепла, чем при обычной их работе. Скорость теплопередачи в рекуператоре примерно пропорциональна разности температур ΔT между газом и кладкой. Увеличивая ΔT , можно увеличивать теплопередачу, хотя при этом будет теряться несколько больше тепла с продуктами горения, которые будут уходить из рекуператора при его отоплении на ΔT градусов более горячими. Однако это не очень большие потери.

В целом для реализации данного процесса потребуется отладить много новых элементов, выполнить значительные перестройки агрегата. Сейчас внедрение такого процесса выглядит нереальным. Можно считать это делом будущего.

5.6. Другие изменения процесса

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

Из дискуссии

Предыдущие приемы направлены на замену кокса угольной пылью, а окатышей – концентратом, на устранение «несообразности № 2» доменной плавки. Если не затрагивается «несообразность № 1» – неполное горение топлива, то расход топлива в таких предлагаемых процессах можно ожидать примерно таким же, как и в домне, например, 500 кг/т.

Чтобы повысить полноту горения топлива, можно решиться на создание течек над фурмами (рис. 5.1) и всыпать прямо в факелы доменного дутья кокс. Можно питать все течки от одного - двух загрузочных устройств типа колошникового устройства, но на порядок меньшей производительности. За счет этого можно поддерживать, пополнять коксовую насадку печи. 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 большое количество угольной пыли, чтобы кислород дутья поглощала в основном именно пыль, а расход кокса был бы минимальным.

Если коксовая насадка формируется через течки снизу, то сверху можно загружать одни окатыши, и тем самым создать условия для полного горения топлива. В отсутствие топлива легковосстановимые руды способны сами достаточно полно окислять газы дутья почти до 100 % CO_2 . Тем самым можно добиться малого расхода топлива, теоретически немногим более 200 кг/т (расчёт 1 приложения), причем в основном в виде угольной пыли, при минимальном расходе кокса. Плавление металлизированных окатышей будет проходить на слое кокса, традиционным способом (см. рис. 5.1).

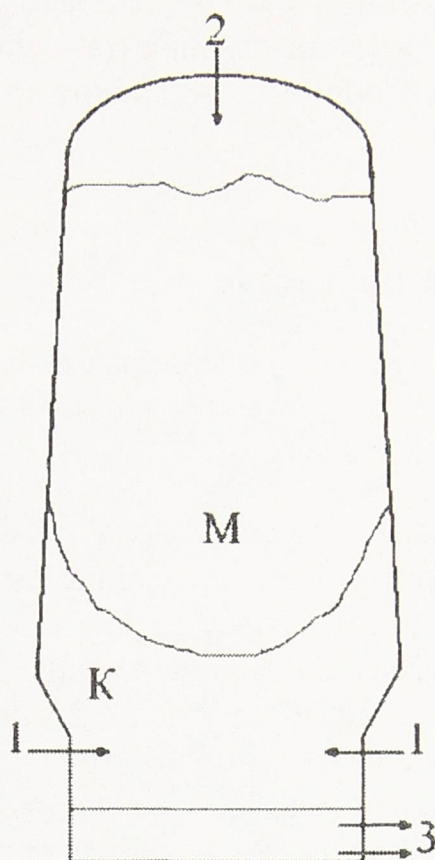


Рис. 5.1. Схема доменного процесса с элементами последовательной продувки.

М – масса металлируемых и плавящихся окатышей; К – зона кокса;

1 – дутье с вдуванием угольной пыли, концентрата и с введением кускового кокса через точки; 2 – загрузка окатышей; 3 – летки

В случае трудновосстановимых руд для полного горения отходящих газов потребуется подавать вверх дополнительное дутье для их дожигания.

В этом случае останется лишь заменить угольную футеровку днища сталеплавильной футеровкой во время очередного ремонта, затем откорректировать профиль печи и добавить выносной горн-отстойник, чтобы уже полностью превратить домну в агрегат «Угольный Мидрекс», выплавляющий сталь.

Глава 6

ДРУГИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПРОДУВКИ. ДРУГИЕ ВАРИАНТЫ

6.1. Получение металла из руды в сталеплавильном агрегате. Тепловой баланс плавки

Много обсуждалось получение стали прямо из руды в сталеплавильном агрегате, известен ряд соответствующих патентов. Сейчас, в эпоху кислородных конвертеров, обычно предлагается получать сталь из руды в агрегате типа конвертера, например, процессом типа «Ромелт». Раньше часто предлагали получать сталь из руды в агрегате типа мартеновской печи. Таков неудавшийся процесс Рюмина. Все металлургические агрегаты подобны в том смысле, что основное содержание работы каждого агрегата – проведение реакций в тройной системе: железо – кислород – углерод.

Если металл получают в сталеплавильном агрегате, то сырые материалы можно просто засыпать на поверхность ванны с расплавами. Можно засыпать уголь и кусковую руду, можно вдувать или загружать в завалку концентрат в пакетах или мешках. Физические свойства топлива и рудной компоненты обычно несущественны, и можно использовать сырье, не прошедшее дорогие подготовительные переделы, как для доменной плавки. Можно сэкономить окискование сырья, то есть коксование угля и агломерацию концентрата. Общая экономия на этом составляет около половины стоимости доменного чугуна или больше. Устраняется «несообразность № 2» доменной плавки.

Если металл получают в сталеплавильном агрегате, то его можно довести здесь же до качества стали, устранить второй (доводочный) передел, устранить «несообразность № 3». Но под давлением традиций и здесь часто предлагается двустадийный процесс; первичную плавку и в сталеплавильном агрегате предлагается вести на чугун. Плавка на чугун представляется также технически менее сложной.

Главным вопросом эффективности процесса, как и выше, остается стоимость тепла и его количество. Для успеха необходимо обилие дешевого тепла. В сталеплавильных агрегатах нет утилизации тепла отходящих газов; если дому колошниковые газы покидают с температурой 200 °С, то ванну конвертера газы покидают с температурой ванны, например, 1500 °С, и уносят много тепла. Далее, дутье конвертера – холодный кислород (0 °С), тогда как в дому дутье поступает с температу-

рой порядка 1200 °С и вносит в печь много рекуператорного тепла. Устраняя две несообразности доменного процесса, мы поступаемся здесь двумя его важными преимуществами. В схеме «Угольный Мидрекс» или при металлизации в рекуператоре несообразности устраняются без потери преимуществ домны.

Как отмечено выше, расчетный расход топлива на получение тонны металла при неполном горении составляет в домне 600 кг, в обсуждаемом сталеплавильном агрегате – 2700 кг плюс 2240 нм³ кислорода (расчёт 5 приложения). Получается неприемлемо большой расход топлива и кислорода. При горении топлива только до СО процесс практически неосуществим.

Тепло в сталеплавильных агрегатах намного дороже, чем в доменной печи, поэтому сталеплавильный передел обычно дороже самого получения металла в домне. Если в сталь переплавляются металлизированные окатыши, то обычно сталеплавильщики требуют, чтобы эти окатыши содержали не больше нескольких процентов примесей SiO₂, CaO и др. В противном случае на переплавку этих примесей в шлак потребуется значительное количество тепла, а для сталеплавильного агрегата обеспечение такого тепла уже дорого и затруднительно. Для сравнения отметим, что доменная печь иногда справляется с переплавкой до 400 кг шлака на тонну металла.

Главная задача современного кислородного конвертера – сравнительно небольшое изменение состава металла, например, удаление 2-4 % (весовых) лишнего углерода. Если в конвертере вести получение металла из руды, то потребуется, как и в домне, удалить из руды до 60 % (атомных) кислорода. Потребуется примерно в 10 раз больший объем продувки. Дутье современного конвертера на тонну металла примерно на порядок величины меньше дутья домны.

Газопроницаемость ванны с жидкими расплавами значительно меньше, чем у столба твердых шихтовых материалов в домне. Поэтому производительность агрегата типа конвертера при получении металла получится значительно ниже по сравнению с домной в расчете на единицу площади пода печи. Получение металла в конвертере будет сравнительно медленным. Для ускорения реакций приходится повышать концентрации реагентов и получать чугун, а не сталь, хотя процесс ведется, в сущности, в сталеплавильном агрегате, в конвертере.

Часто оказывается справедливым старое правило доменщиков: по возможности большую часть восстановления выгоднее провести в твердом состоянии, до расплавления. Процессы в твердом состоянии часто значительно экономичнее.

Ясно, что сталь можно получать из железной руды в электропечи [38]. Но из-за высокой цены электроэнергии тепло в таком процессе будет весьма дорогим, и процесс окажется нерентабельным. Подобные процессы оправдывают себя, оказываются рентабельными лишь при получении более ценных металлов, например, ферросилиция, ферромарганца и других ферросплавов, которые выплавляют из окислов в электропечах.

Предлагается также совместить металлургический агрегат с теплоэлектростанцией, утилизировать химическое и физическое тепло отходящих газов в паровом котле [11]. Но газы, отходящие из конвертерной ванны, очень горячие (1500 °С), содержат много пыли и микрокапелек расплавов. Обычный паровой котел не может принимать такие газы.

Чтобы успешно получать металл из руды в агрегате типа конвертера, жизненно необходимо организовать дожигание отходящих газов и обеспечить значительное усвоение расплавами тепла этого дожигания. При полном дожигании получился бы приемлемый расчетный расход топлива 350 кг/т, почти на порядок величины меньше, чем при неполном горении.

6.2. Процесс «Ромелт»

Это же не печь, это самовар
с чугунными стенками!

Из дискуссии

В России широко известен один из процессов получения металла в агрегате типа конвертера, это процесс «Ромелт» [36]. Основная задача – полное горение топлива – решается здесь 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 %. Отчасти расхождение расчета и действительности можно объяснить большими потерями тепла через футеровку в таких агрегатах. В домне (а нередко и в кислородном конвертере) без специальных мер по дожиганию газов получается горение до CO_2 примерно на 25 % (табл. 6.1).

Расчетный и действительный расход углерода топлива и кислорода

	Расход углерода топлива, кг/т	Расход кислорода, нм ³ /т
Расчет при горении до СО	2 700	2 240
Расчет при полном дожигании до СО ₂	350	390
Расчет при дожигании на 30 %	860	650
Достигнутый реальный расход	780-1000	680-750

Неудачный момент в работе таких агрегатов – то, что топливо, кусковой уголь, засыпается на поверхность ванны, где и организуется окислительная зона, идет дожигание газов. В потоках газа, контактирующих с плавающими кусками топлива, продукты горения СО₂, практически нацело восстанавливаются обратно до СО. Присутствие топлива в верхних слоях шлака делает дожигание газов здесь столь же трудным, как и дожигание в домне, в присутствии кокса. Газы таких потоков удастся дожечь лишь тогда, когда они уже удалятся от поверхности ванны и не смогут передать расплавам тепло 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 снизу, как в схеме «Угольный Мидрекс». В этом случае глубокое дожигание можно было бы организовать не в надшлаковом пространстве, но уже в верхних 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 почти стопроцентное дожигание, то расчетный расход топлива и кислорода приближаются соответственно до 350 кг/т и 390 нм³/т.

В этом варианте нежелательно чрезмерно сильное перемешивание ванны, приближение к так называемому режиму совершенного смешивания, который понизит различия состава восстановительной и окислительной зон.

Угольную пыль можно вдувать в ванну в смеси с дымовыми газами или с холодным воздухом. Если пыли в смеси будет стехиометриче-

ски много больше, чем воздуха, то процессы горения не получат развития.

Данное направление в металлургии (получение металла в агрегате типа конвертера) имеет уже длительную историю. Агрегаты типа «Ромелт» 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.

В целом данное 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 др.

Дутье кислорода в верхние фурмы таких агрегатов можно заменить «доменным» вертикальным факелом. При небольшом заглублении факела в шлаковый расплав обеспечивается плотный контакт газов с расплавом и приближение их к тепловому и химическому равновесию. Если в шлаке имеются высшие окислы железа, то будет полное дожигание газов (100 % CO_2). Если в шлаке равновесие $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$, то получится примерно 90 %-ное дожигание. При равновесии FeO/Fe , при восстановлении железа в верхних слоях шлака возможен «доменный» уровень дожигания газов около 25 %.

Выше рассмотрено разделение восстановительной и окислительной зон по вертикали; эти зоны можно разделить также и по горизонтали. Ванну с расплавами можно выполнить круглой, подобно горну доменной печи, и организовать над нею наклонные факелы «доменного» дутья, то есть горячего воздуха с угольной пылью. Воздух можно обогащать кислородом. При дутье чистым кислородом образуются очаги слишком высоких температур и интенсивное испарение металла. В агрегатах «Ромелт» кислород приходится разбавлять воздухом.

Наклонные факелы обеспечат циркуляцию расплавов по кругу. С одной стороны такой ванны можно организовать окислительную зону, засыпать или вдувать сюда сверху рудные материалы, давать здесь избыток дутья, обеспечивать полное горение до CO_2 и определенный перегрев расплавов. Здесь можно организовать и восстановление высших окислов железа до закиси FeO , если уменьшить избыток дутья и примириться с горением до CO_2 примерно на 90 % соответственно равновесию $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$. С другой стороны ванны организуется восстановительная зона, в шлак засыпается или вдувается уголь и идет восстановление железа (рис. 6.1). Здесь мы примиряемся с горением лишь до CO или на 25 % до

CO₂, соответственно равновесию FeO/Fe. Дополнительное тепло на реакции восстановления здесь дают расплавы, поступающие перегретыми из окислительной зоны. Шлаковый расплав, перегретый на 100 °С, способен за счет запасенного физического тепла восстановить примерно 15 % вес. железа. Капли металла образуются в верхних слоях шлака в восстановительной зоне, тонут, проходят всю толщину слоя шлака и собираются на дне ванны. Они проходят примерно такое воздействие шлака, как при электрошлаковом переплаве.

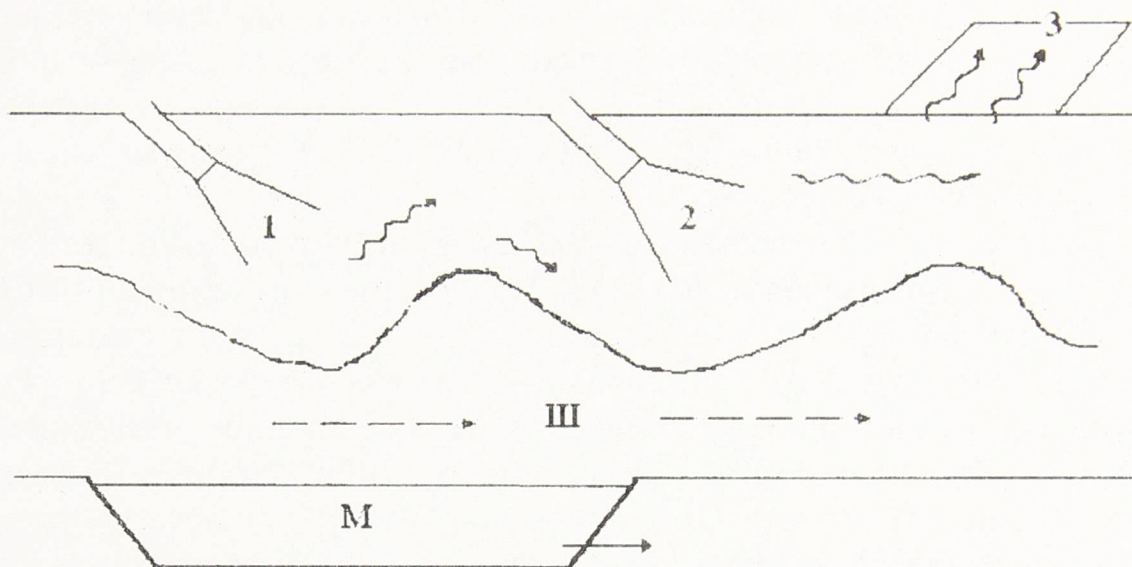


Рис. 6.1. Последовательность процессов по окружности конвертера: 1 – вдувание угольной пыли, восстановительная зона; 2 – вдувание концентрата, доменное дутьё, окислительная зона полного горения; 3 – отходящие газы; 4 – лётка; М – металл; Ш – шлак

Газы восстановительной зоны (в основном СО) 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 рекуператор, где отдают физическое тепло. Если создается лишь небольшая опытная установка, и строительство рекуператора нецелесообразно, то воздух дутья можно нагревать, например, до 1000 °С в компактном металлическом теплообменнике.

Если в такой агрегат поступает много углерода, то мы получим преобладание восстановительной зоны, углеродистый металл, в пределе чугуна. Интересен другой вариант, когда зона шлаков с окислительным потенциалом преобладает, и даже под восстановительной зоной нижние слои шлакового расплава имеют значительное содержание окислов железа. В этом случае мы получим необычный металл – мягкое железо – очень чистый по углероду и другим примесям.

Если мы приближаемся к полному дожиганию газов, то расчетный расход углерода топлива будет около 350 кг/т (если не очень велики теплотери через футеровку и др.).

Когда потребуется спустить накопившийся шлак, можно на время прекратить подачу руды и понизить окислительный потенциал дутья.

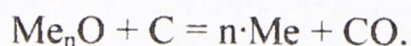
Примерно такая же схема обеспечения ванны теплом пригодна и для сталеплавильного агрегата. В таком агрегате будет обилие дешевого тепла, поэтому можно проводить длительные операции глубокого рафинирования стали.

6.3. Восстановление других металлов

Приведенная схема может оказаться целесообразной и при выплавке других металлов. Теоретически так 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 любой окисел.

Известно, что при повышении температуры углерод становится все более сильным раскислителем стали, способным отбирать кислород у все более трудновосстановимых 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 CO₂, наступает при температуре 910 °С, когда $K=P_{\text{CO}_2}=1$ атм.

Температуры химического кипения T_x (начала быстрого восстановления различных металлов углеродом) в К приведены ниже:

Cu ₂ O	380	MnO	1700	MgO	2100
NiO	730	TiO ₂	1910	CaO	2400
FeO	1000	SiO ₂	1950	Al ₂ O ₃	2480

Для закиси железа эта температура равна 1000 К или 730 °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. Наиболее трудновосстановимы металлы, образующие самые прочные окислы. Для алюминия $T_x=2480$ К, 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 все (или почти все) металлы.

Следовательно, 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 и восстановить все окислы.

Как обычно, сложнее решить вопрос о скорости процесса. Но ясно, что если восстановление окисла наступает при температуре выше 1000 °С ($T_x > 1000$ °С), то равновесное давление P_{CO_2} угольной кислоты CO₂ при равновесии мало, и скорость восстановления окислов газом будет низкой. Движущей силой восстановления газом можно считать разность ΔP_{CO_2} концентраций CO₂ 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.

Схема процесса может быть следующей. Восстановление идет в цилиндрической ванне, в которой наклонные факелы дутья вызывают

циркуляцию оксидных расплавов по кругу (см. рис. 6.1). Имеется восстановительная зона с горением топлива лишь до СО и окислительная зона, где горение идет до СО₂, 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 и затем частично восстанавливается вдуваемой угольной пылью. Под оксидным расплавом накапливается жидкий металл, который периодически выпускается. Если поддерживается температура выше 2200 °С, то не потребуется выпускать накапливающийся шлак, все оксиды шлака будут восстанавливаться до металлического состояния.

Выполним расчеты расхода топлива на выплавку некоторых металлов в таком «конвертере» (см. рис. 6.1), то есть при полном сжигании углерода без утилизации тепла отходящих газов и без подогрева дутья.

Расчет для выплавки сплава железа при 1500 °С окажется повторением расчета 5 приложения и даст тот же расход углерода 330 кг/т.

Расчетный расход углерода для выплавки самого трудновосстановимого металла, алюминия, получается 1840 кг/т, для выплавки титана – 930 кг/т (расчет 14 приложения). По порядку величины эти значения близки к расходу топлива при выплавке чугуна процессами типа «Ромелт» (1000 кг/т). Если устранена «несообразность № 1», достигнуто полное горение углерода, то получается хороший тепловой баланс при восстановлении любого металла.

Подобная выплавка любого металла будет стоить примерно столько же, как и современная выплавка чугуна, или немногим больше. Но многие металлы из распространенных руд стоят в десятки раз дороже чугуна, поэтому подобная плавка может оказаться весьма выгодной.

Конечно, если обсуждать выплавку всех металлов, мы столкнемся со 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 придутся на гарнисажную футеровку.

Далее, у ряда металлов температура кипения T_K ниже температуры восстановления T_X . Так, у магния температура кипения всего 1103 °С, тогда как для восстановления необходимо $T_X=2100$ °С. Такие металлы в основном испарятся и окажутся в отходящих газах в виде пылевидных окислов. Даже у алюминия T_X (2210 °С) близка к температуре кипения $T_K=2348$ °С, поэтому значительное испарение возможно и для алюминия.

Окислы металлов в целом составляют до 99 % земной коры, всех горных пород. Известные 70 металлов Периодической системы составляют в сумме около 50 % вес. земной коры, 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 %) и 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.

6.4. Получение водорода

Предложенный выше (глава 4) рекуператорный процесс с пылегазовой взвесью удобен для проведения многих других реакций, в частности, для получения водорода. В доменной печи, в агрегатах «Мидрекс» и других окислы железа восстанавливаются окисью углерода и водородом (CO и H₂), причем скорость восстановления водородом больше, и он играет роль ускорителя металлургических реакций восстановления. Обратная реакция идет столь же быстро, как и прямая. Если же реакцию восстановления окислов водородом провести в обратном направлении, можно получать водород из паров воды, ($Q=+16$ кДж):



Это актуально в связи с развитием экологически чистой водородной энергетики. В равновесии пары воды и водород будут примерно в равных количествах.

Возможен следующий процесс. Железорудный концентрат в смеси с угольной пылью пропускается через рекуператор и металлизуется. Полученный порошок железа отделяется от газов аппаратом «Циклон», от остатков угольной пыли – отмагничиванием, и с потоком паров воды пропускается через рекуператор еще раз. По реакции (6.1) примерно половина паров воды около «температуры Мидрекс» восстанавливается до водорода. Дальше окисленный порошок железа опять отделяется аппаратом «Циклон» и может идти на новый цикл восстановления, а пары

воды из газовой смеси ($H_2 - H_2O$) конденсируются при охлаждении, они легко отмываются из смеси в градирне. В газовой фазе остается водород.

Продувка на получение водорода может идти примерно с такой же интенсивностью, как и обычная продувка на получение металла. Рекуператор домны объемом 1000 м^3 , способный производить в сутки порядка 1000 т металлизированного порошка концентрата, способен также за сутки произвести несколько миллионов нм^3 водорода. Так как в рекуператоре можно экономично восстанавливать порошок железорудного концентрата угольной пылью, то здесь можно также достаточно экономично превращать химическую энергию угольной пыли (через стадию железа) в химическую энергию водорода.

6.5. Газификация угля в рекуператоре

Рекуператор или теплообменник является также удобным агрегатом и для газификации угля.

Сейчас уголь газифицируют обычно в газогенераторе, но при воздушном дутье получается лишь газ, подобный доменному газу, на $2/3$ состоящий из азота воздуха и низкокалорийный. Чтобы получить более ценный и концентрированный газ, потребуется сжигать это топливо в дорогом кислороде, причем в обоих случаях затруднительно использовать выделяющееся тепло неполного горения.

Если такое топливо в виде пыли пропустить через рекуператор в смеси с парами воды, мы получим по реакции $C + H_2O = CO + H_2$ концентрированный высококалорийный газ, состоящий из водорода и CO , пригодный для получения высокотемпературного тепла. Его теоретическая температура горения даже выше, чем у природного газа CH_4 . Если топливо содержит углеводороды, то конечная доля водорода будет выше, и получаемый газ будет приближаться к конвертированному природному газу состава $CO + 2H_2$, который получают в каталитической насадке агрегатов «Мидрекс» и используют для металлизации окатышей.

Цикл процесса может состоять из газификации пылевидного топлива водяным паром в горячем рекуператоре, охлаждения его, удаления частиц золы методами пылеочистки. Чтобы не допустить развития процессов разложения CO с выделением сажистого углерода ($2CO = C + CO_2$), нужно устранить поверхности, которые могут служить катализаторами этого процесса (в частности, поверхности железа), а также вести охлаждение газа быстро.

Прогрев следующих секций рекуператора, подготавливаемых к металлизации, можно вести полным сжиганием того же пылевидного топлива при некотором избытке воздуха. Тепловая энергия топлива, за вычетом потерь в рекуператоре и с отходящими газами, превратится в потенциальную тепловую энергию полученного газа.

Глава 7

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКА КОНЦЕНТРАТА ПО СХЕМЕ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ – ПРЕССОВАНИЕ – СПЕКАНИЕ (совместно с Р. А. Апакашевым)

7.1. Преимущества схемы металлизация – спекание

Если порошок железорудного концентрата прошел металлизацию угольной пылью в рекуператоре или в теплообменнике, то далее из него можно прессовать заготовки и направлять их на спекание готового изделия. Изделие будет получено по схеме металлизация – спекание. Перед металлизацией можно корректировать состав порошка добавками, выполнить тщательное перемешивание, при необходимости можно провести также какие-то операции механической обработки порошка, применяемые в порошковой металлургии для улучшения прессуемости и спекаемости порошков.

Для порошка, который идет на прессование – спекание, весьма важно иметь минимальное количество примесей. Нежелательно попадание в него золы, остающейся при сгорании угольной пыли в процессе металлизации, часто нежелательно попадание остатков углерода после металлизации. 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 газ СО вводится металлизуемый концентрат. Металлизация идет уже без присутствия твердого углерода.

Тепло охлаждения порошка после металлизации можно утилизировать в рекуператоре – теплообменнике. В принципе возможно и прессование горячего порошка сразу после металлизации. Тогда металлоизделие мы получим практически за один цикл нагрева – охлаждения.

Для прессования – спекания можно использовать концентрат, металлизированный обычным способом в окатышах, например, в агрегате «Мидрекс». Металлизированные окатыши измельчаются, дезинтегрируются обратно до порошка; порошок прессуется и спекается. В этом случае изделие получается за 2-3 цикла нагрева – охлаждения материалов в пределах твердого состояния. Расчеты Р. Тэлмеджа [18] показали, что подобная твердотельная металлургия с металлизацией окатышей требует примерно в 5 раз меньших энергозатрат по сравнению с современной металлургией. Если же прессование – спекание проходит концентрат, металлизированный в рекуператоре, то энергозатраты на

получение изделия будут примерно на порядок величины меньше по сравнению с современной металлургией.

Сейчас уже для получения жидкой стали требуется минимум 4 цикла нагрева – охлаждения сырья: два энергоемких расплавления в доменном и сталеплавильном процессах, а также коксование и агломерация. При последующей обработке до получения готового изделия нередко требуется еще несколько раз нагревать металл при формовке, термообработке и др. С учетом дополнительных подготовительных циклов получается, например, 8 циклов нагрева – охлаждения.

По выражению [15], металлургия твердого тела открывает перспективу «освободить, наконец, нашу планету от огнедышащих производств, загрязняющих окружающую среду, отягощающих экономику...».

В СССР возможности получения суперконцентратов и богатых концентратов из легкообогатимых руд оценивались в 50 млн т в год [15]. С этой точки зрения теоретически до половины всех металлоизделий можно получать из металлизированных суперконцентратов, которые содержат не больше нескольких процентов примесей, или даже десятые доли процента.

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 H_2 , N_2 , O_2 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.

Сейчас отмеченные заманчивые перспективы почти не реализуются. Основная причина этого, по нашему мнению, все та же доменная идеология, убеждение в том, что доменный процесс в массовом производстве незаменим и т. д. Как обычно бывает на ранних стадиях ломки идеологии, преобладает мнение, что, *наверное, тут что-нибудь не получится*, вероятно, кто-то пробовал и убедился, что так нельзя и др. Иногда предпринимаются попытки в этом направлении, но они оказываются робкими и непоследовательными. Исследователи часто отступают при первых же трудностях, которые неизбежны при опробовании новых процессов. Даже при освоении новых агрегатов по давно известному процессу часто возникает немало трудностей.

Казалось бы, существует целая мировая промышленность порошковой металлургии, в которой уже столетие пробуются и отрабатываются приемы получения изделий из порошков. Но порошковая металлургия имеет свою специфическую идеологию, которая развивалась в условиях господства доменной идеологии большой металлургии.

Приемы порошковой металлургии по традиции не идут в крупнотоннажное массовое производство из дешевых порошков; порошковая металлургия тяготеет к малым изделиям из дорогих порошков. Главная причина этого то, что «так сложилось». Большая металлургия давно уже мыслится почти исключительно как металлургия расплавов, в которой незаменим доменный процесс.

Порошковая металлургия по традиции тяготеет к чистым дорогим порошкам, к небольшим изделиям сложной формы, для которых достаточны небольшие лабораторные прессы, а экономия получается не на материале, а на обработке.

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. Современная порошковая металлургия не экономит на подготовке порошка. В этом плане современные методы порошковой металлургии малопригодны для производства недорогих рядовых изделий в крупнотоннажном производстве.

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 довосстановление водородом, а также ряд дополнительных обработок по улучшению его физических свойств: текучести, прессуемости, спекаемости и др. В результате стандартный порошок железа получается, например, в 3-5 раз дороже металлизированных окатышей подобного состава и, соответственно, в 3-5 раз дороже металлизированного концентрата, полученного дезинтеграцией этих окатышей. Поэтому крупнотоннажное массовое производство рядовых изделий из стандартного порошка железа уже не очень выгодно. Но это производство становится весьма выгодным, если производить эти изделия из рядового металлизированного концентрата, полученного из окатышей. Если же металлизировать концентрат в рекуператоре, то можно рассчитывать получить еще более дешевый

порошок железа, примерно на порядок величины дешевле стандартного порошка, применяемого сейчас в порошковой металлургии.

К тому же для многих массовых металлоизделий не требуется такая точность формы, как, например, для монет, и поэтому необязательна механическая обработка порошка для улучшения текучести, прессуемости, спекаемости. Достаточен рядовой металлизированный концентрат.

Если преодолеть эти психологические сложности, выйти за пределы отмеченных традиций, то можно применить в крупнотоннажном массовом производстве заготовок и металлоизделий богатый опыт, накопленный порошковой металлургией, многие отработанные здесь приемы, но при использовании рядовых металлизированных концентратов.

Когда обсуждаются коррективы к доменному процессу, агрегат «Угольный Мидрекс» и др., то обычное возражение состоит в том, что это все рассуждения, теории, которые очень сложно и дорого проверить на деле. При спекании металлизированных концентратов предлагаемые процессы поддаются проверке на малых образцах, в лаборатории. Около 2000-го года появилась возможность провести подобные эксперименты, и нами совместно с Апакашевым Р. А. были получены образцы металла таким способом. Были получены также простые металлоизделия, например, небольшие мелющие тела. Сейчас подобные изделия производят традиционными методами, например, литьем. Другой способ состоит в том, что их вырубают из проката и проводят последующую обработку давлением.

Имеется также много металлоизделий, к которым предъявляются еще меньшие требования; такие изделия производятся миллионами тонн. Предельным случаем подобных изделий с минимальными требованиями по прочности и точности формы являются различные грузы – противовесы.

7.2. Экспериментальная часть

Выполнен эксперимент по получению образцов металла из рядового Лебединского концентрата, металлизированного в окатышах на Старо-Оскольском комбинате обычным способом «Мидрекс».

Такие попытки ряда исследователей, а также некоторые наши предварительные эксперименты дали отрицательные результаты. При некоторых значениях параметров металлизации спекаемость и

прессуемость порошка оказывались недостаточными, и в итоге получался плохо спеченный материал с низкими механическими свойствами. Иногда осыпались ребра и вершины прессовок. При других параметрах металлизации последующее спекание оказывалось достаточно глубоким и давало кондиционный металл.

Основной вывод состоял в том, что достигается удовлетворительная прессуемость - спекаемость, и получается кондиционный металл, если сами частицы порошка железа содержат не более 0,1-0,2 % углерода, а остальной углерод образует отдельную фазу. Прессуемость снижается от присутствия карбидов железа, а также от больших концентраций углерода, растворенного в крупинках железа, что делает их хрупкими и плохо прессуемыми, подобно порошкам чугуна или хрупкой стали. Стандартный железный порошок различных марок обычно должен содержать не более 0,03-0,012 % углерода, чтобы давать хорошее спекание. Эти цифры оказываются справедливыми и для металлизированных концентратов, но лишь применительно к углероду, растворенному в частицах железа. Так как растворимость примесей в твердом железе мала, то материал может содержать много примесей, но в качестве инертных фаз включения они почти не влияют на свойства основной (материнской) фазы – железа. Концентрацию растворенного углерода и присутствие карбидов можно установить по данным рентгенофазового анализа на установке MS-46 «САМЕСА».

Спекание получается лучше, если прессуется порошок несколько недовосстановленный с добавкой порошка углерода, и уже в процессе такого «реакционного спекания» идут реакции окончательного довосстановления остаточных окислов железа.

Была достигнута более высокая плотность и прочность металла, если после первого прессования и небольшой выдержки в горячем состоянии проводили еще одно прессование-обжатие и затем уже окончательное спекание. Подобным образом можно из металлизированного концентрата делать заготовки на прокатку.

7.3. Неметаллические включения

Известно мнение, что рядовые концентраты содержат слишком много неметаллических примесей, например, 5 % SiO_2 , и поэтому не поддаются глубокому спеканию. Необходима переплавка такого металла, чтобы удалить в шлак неметаллические примеси.

Правда, в прошлом из крицы (то есть из спекающихся металлизированных кусков руды) выковывали качественные изделия, но считается, что в прошлом металлурги могли пользоваться особенно чистыми рудами. Прямые анализы металла древних металлоизделий, которые сейчас хранятся в музеях, не подтверждают это мнение; изделия древней или средневековой металлургии содержат, например, до 7-8 % неметаллических включений [1, 2].

Если изделие получается металлизацией – спеканием концентрата, то все примеси концентрата попадают в готовое изделие. Однако достаточно малые включения нередко не только не понижают прочность металла, но и повышают ее; такой металл называется дисперсионно-упрочненным. Упрочнение железа до характеристик стали при введении углерода тоже, в сущности, является упрочнением материала дисперсными включениями. В ряде случаев в металл специально вводят до 10 % и более таких дисперсионно-упрочняющих включений. Дисперсные включения (SiO_2 , Al_2O_3) появляются, в частности, при раскислении стали ферросилицием и алюминием.

На прочность металла качественно различно действуют малые и большие включения. При размерах примерно до 10 мкм включения упрочняют металл подобно тому, как прочность железа повышается включениями углерода подобных размеров. Более крупные включения, 30 мкм и больше, обычно понижают прочность, они как бы «надрезывают» матрицу.

В мелких концентратах с крупностью минус 74 мкм крупных включений немного. Можно для спекания отсеивать более мелкую фракцию концентрата, чтобы еще понизить вероятность попадания крупных включений. Можно перейти к более мелкому размолу руды перед обогащением для этих же целей.

Образцы металла, полученного прессованием – спеканием металлизированного концентрата, испытаны в качестве мелющих тел в лабораторной мельнице при истирании угля. Их износостойкость (убыль веса при истирании в мельнице) соответствовала применяемым промышленным мелющим телам с отклонением $\pm 15\%$.

Отмечено, что образцы металла из Лебединского концентрата давали более интенсивное истирание породы, чем аналогичные по составу образцы без включений, полученные из стандартного железного порошка. Металл, полученный спеканием Лебединского концентрата, содержит (как и исходный концентрат) примерно 5 % включений SiO_2 – зерен кварца. Эти включения делают мелющее тело похожим на абразив,

содержащий твердые кристаллы кварца, которые усиливают истирание породы, то есть улучшают работу мелющих тел.

Изучена зависимость механических свойств получаемого металла от содержания примесей в исходном концентрате. Пройден интервал от наиболее чистого суперконцентрата (Оленегорский, 0,1 % примесей) до рядового (Лебединский, 5 %) и концентрата с повышенным содержанием примесей (Качканарский, 14 %). Более интенсивное истирание породы в мельнице дали образцы из Лебединского концентрата.

Исследовано влияние добавки углерода перед прессованием и спеканием в количестве 0,3; 0,7; 1; 2; 5 %. Наибольшую прочность на сжатие показали образцы с добавкой 1 % углерода.

Общий вывод из данных экспериментов состоит в том, что можно и нужно изготавливать металлоизделия или заготовки из металлизированного концентрата прессованием – спеканием, то есть методами порошковой металлургии. Получается кондиционный металл с обычными или даже с повышенными прочностными характеристиками, и кондиционные изделия. При этом металлизированный концентрат из окатышей обычно в 3-5 раз дешевле стандартного порошка железа, применяемого в порошковой металлургии. Поэтому такое изготовление изделий выгодно, особенно в крупнотоннажном массовом производстве.

Глава 8

ТОЧНОЕ ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ И ЭЛЕМЕНТЫ ДРЕВНЕГО РЕМЕСЛА В МЕТАЛЛУРГИИ. ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ СЛОЖНОСТИ ВОПРОСА

8.1. Элементы древнего ремесла в доменной плавке

Люди умнеть еще не начали
Любят они, чтобы их дурачили
Мюзикл «Чикаго»

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. Если придерживаться такой позиции, то данную главу следует считать не обязательной, а дополнительной. Здесь не обсуждаются конкретные схемы процессов получения металла или их технические сложности.

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 эксэргии [40].

Еще одна особенность домны, унаследованная от древнего ремесла, – движение материалов под действием нефундаментальных сил трения в 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.

8.2. Силы фундаментальные (простые) и нефундаментальные. История вопроса

Эти десять уравнений – единственное, что мы знаем точно.

Из дискуссии

Новые технологии обычно основываются на 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. Такие процессы совершенствуются примерно так же медленно, как 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. Обсудим взаимоотношения точных наук с эмпирическим «ремесленным» совершенствованием нефундаментальных процессов.

Для этого 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 Р. Фейнман, нобелевский лауреат [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 ($F=Gm_1m_2/r^2$). Эти два уравнения полностью описывают небесную механику. Для расчетов по этим уравнениям была разработана даже целая новая математика – дифференциальное и интегральное исчисление (Ньютон и Лейбниц).

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 Эйнштейна¹.

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 изме-

¹ После Планка и Эйнштейна уже целое столетие почему-то нет уравнений и теорий такого масштаба, хотя число исследований и исследователей растет в геометрической прогрессии. Может быть, такие фундаментальные закономерности вообще закончились? Может быть, к 10 упомянутым фундаментальным уравнениям вообще больше не удастся добавить ничего существенного, и нам останется лишь разрабатывать приложения этих законов, открытых в 18-19-х веках?

рений 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.

За последние 200 лет, когда развитие шло в основном на базе точного естествознания, экономика передовых стран выросла примерно в 100 раз, производство 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.

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.

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. 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].

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.

8.3. Явления, не поддающиеся анализу методами точных наук

Легкость мысли необыкновенная!
Как у Хлестакова.

О. А. Есин

Многие другие явления кроме трения почти не поддаются анализу методами точных наук. Так, еще древние греки заметили, что янтарная расческа при трении о волосы электризуется и дает характерные искорки. Это – электризация трением, явление нефундаментальное, поэтому в его понимании 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 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.

Подобным образом давно и почти безуспешно делаются попытки объяснить – почему лед скользкий? Один из конкурсов научных работ на эту тему также привел к важному «побочному» фундаментальному результату, к открытию закона Клаузиуса – Клапейрона для плавления (1851 г. [43]). Авторы 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 трения или электризации. 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 и др.

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, сохранные 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 фактов, как и процессы ремесла. Так, электроника прогрессирует быстрее, чем металлургия, компьютеры совершенствуются быстрее, чем домны 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 сосредото-

тачивается 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. Наоборот, доменщиков их работа вынуждает сосредоточиться на таких явлениях в домене, которые почти не поддаются точным наукам. Это важная причина таких расхождений, как у физхимиков с доменщиками или с представителями ремесла.

Естественно, становятся широко известными яркие достижения науки и техники в фундаментальных процессах, и остаются почти неизвестными неудачи науки в непростых (нефундаментальных) явлениях. Мы почти забываем о нефундаментальных явлениях, не описываемых точными науками. 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 металы за счет упру-

гой 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.

8.4. 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 на одном из конкурсов забраковала работу 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 Фультона (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 полстолетия для осознания этой простой механики, которая для нас давно

стала 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 развернутое и подробное изложение своих взглядов, своей доменной идеологии; дальше 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 выбивании из металла излучением. В металлургии подобные несообразности сейчас уже достаточно понятны.

8.5. Нефундаментальные явления сосредоточены в теории твердого тела

Да, идеологии сильны! Вот попробуйте вашей жене привить идею ислама, что вторая жена – это совсем неплохо для семьи. Глаза выцарапает!

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, 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, что они обусловлены качественно иными эффектами, видимо, квантовым вырождением атомарной системы, квантовым «вымораживанием» атомарных степеней свободы. По мере охлаждения все больше атомов (степеней свободы) переходят на нулевой энергетический уровень ($E=0 \cdot hv=0$) и движение по ним прекращается.

Раньше казалось вполне понятным, почему кристалл твердый, и считалось, что для вычисления твердости 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 модель единого куска 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 $1000\text{ }^\circ\text{C}$. 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. 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 и т. д. Когда говорят, что доменный процесс определяется действием целого ряда взаимосвязанных и взаимообусловленных явлений, он очень сложный, многофакторный и трудно учесть влияние всех факторов, что по ряду вопросов имеется ряд конкурирующих теорий и т. д., то 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.

8.6. Квазикристаллические свойства жидкости и приемы улучшения металла

Если доменная идеология простоит еще двадцать лет, я потеряю веру в человечество.

Из дискуссии

Отметим, что в газах и простых перегретых жидкостях не обнаружено нефундаментальных явлений, не поддающихся точным наукам. Разреженные газы имеют достаточно точную молекулярную теорию еще с 19-го века, со времени Больцмана, Максвелла и др. Их свойства сводятся к 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 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 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. 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 сталь долго «помнит» о воздействии ультразвука и 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.

8.7. Термовременная обработка стали (ТВО)

Я не пойду с докладом в этот институт!
Это же все равно, как если бы еретик пошел
обращать инквизиторов в свою веру!

Из дискуссии

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]. Эти эксперименты привели к выводу о существовании в бинарных расплавах достаточно крупных кластеров чистых компонентов, например, кластеров 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. В этом интервале был зафиксирован скачок вязкости жидкого металла (по другим данным – излом политермы или аномалия вязкости). Дифракционные исследования показали, что около этой температуры резко изменяется атомарная структура жидкого металла [29]. Полиморфные превращения 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 ≈ 1650 °С. Физики «переспорили», продемонстрировали лучшее знание молекулярной теории, уличили металлургов в недостаточной физической грамотности, и дискуссия завершилась как бы опровержением представлений металлургов [28]. Даже большинство экспериментаторов пришли к выводу, что при соответствующей постановке экспериментов не получаются особенности на политермах вязкости и плотности стали [28, табл. 29].

Из публикаций многих металлургов на 10–15 лет исчезли представления, 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 сапож-

ников, 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.

8.8. Различия в мышлении физхимика и доменщика

- Физхимики – бумажные металлурги.
Видели домну только на картинке
- Доменщики мыслят чугунами чушками и болванками.
Бесполезно 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. 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. Если обеспечивается нужный нагрев материалов, то реакции обычно успевают пройти, поэтому работы физхимиков часто не очень популярны у металлургов-практиков.

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 для анализа схемы процесса. Наши специальности привязаны к отдельным стадиям существующего цикла и закрепляют его структуру. Существующая теория металлургических процессов также занимается физхимией отдельно взятых реакций, не занимается анализом цикла в целом.

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, заклинивается», 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.

8.9. 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.

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. Если же такая возможность все же появляется, то могут возникнуть 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 в прошлом, которые нередко заканчивались казнью одного из оппонентов.

8.10. О формировании идеологии

Мужик – что бык. Втемяшится
в башку какая блажь,
колом ее оттудова не выбьешь.
Упираются, всяк на своем стоит.

Н. А. Некрасов

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 несолидно. 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 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 вытащат 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, *зацикливается* 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 лежат в области бессознательного; говорят, что идеология – 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 истоки, то разрешить спор оказывается уже сравнительно легко. Здесь хорошо поставленный вопрос содержит в себе уже часть ответа.

Факты, противоречащие нашей идеологии, не соответствующие нашим бессознательным установкам, часто «не проникают в сознание», даже если и «попадают в уши» (А. Солженицын). В других случаях такие факты «как-то не укладываются в голове». Знание, основанное на таких фактах, не идет дальше *неясных предчувствий и смутных ощущений*.

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 не идет обычно дальше *смутных ощущений* и далеко не достигает той степени ясности, при которой становятся возможны уже конкретные решения и действия по устранению пороков. Здесь создается интересная и парадоксальная ситуация, характерная для начального периода ломки идеологии: «пороки» в определенной мере понятны, их можно устранить несложными изменениями схемы процесса, но в то же время очень трудно убедить кого-либо в том, что устранение пороков вполне реально, этим можно и нужно заниматься.

В исследования металлургических процессов вложено много труда, в том числе очень высококвалифицированного труда виднейших ученых. Поэтому трудно представить, что здесь остались явные и даже вопиющие несообразности, если не принимать во внимание эксцессы идеологии.

Всего в мире сейчас больше 10 миллионов научных сотрудников и немалая часть их связаны с металлургией и металлами. Для сравнения интересно отметить, что во время первой ньютоновской революции в физике, которая положила начало всему современному точному естествознанию, в мире было всего 300 физиков. Во время второй революция в физике в начале 20-го века в мире было около 3000 физиков [41].

В металлургии мы мыслим обычно в рамках давно устоявшейся «доменной» идеологии. Когда мы пытаемся изобретать за пределами этой идеологии, уже само наше мышление становится неуверенным, непоследовательным. Тем более робкими и неуверенными, непоследовательными быстро становятся реальные действия при внедрении таких изобретений, когда они сталкиваются с техническими трудностями, неизбежными в металлургии. Ряд разумных изобретений были доведены до реальных агрегатов, но заброшены при первых же технических осложнениях.

Часто мы не можем вполне осознать того, что здесь действительно явные несообразности, которые можно просто устранить. Возникают недоуменные вопросы, например, «что же, металлурги все дураки, что ли?». Разве возможна такая *поразительная слепота*, с которой мы не замечаем эти *вопиющие несообразности*?! Но такая *слепота* неоднократно отмечена в начале ломки разных идеологий [12, 19].

Под давлением таких вопросов мы склонны придумать такие объяснения, что, вероятно, эти вопросы давно кем-то глубоко проанализированы и вполне разрешены, что те очевидные улучшения, которые здесь напрашиваются, невозможны из-за каких-то технических сложностей, но анализ этих сложностей до нас почему-то не дошел. Мы принимаем, что, вероятно, здесь *что-нибудь не получится*, если пытаться реализовать эти улучшения и т. д.

Сейчас на обсуждениях несообразностей цикла можно собрать много интересных материалов по закономерностям ломки идеологии, ее психологическим нюансам. Как говорят в подобных случаях, сейчас здесь самой жизнью ставится очень интересный эксперимент по психологическим особенностям такой ломки.

Иногда создается впечатление, что современный цикл может продержаться очень долго за счет одной инерции, одних психологических причин, несмотря на его очевидные и даже «вопиющие» несообразности.

Практически любой грамотный металлург в основном соглашается со всем сказанным по несообразностям, если удастся привлечь к этому его внимание. Но и в этом случае изложенное воспринимается в лучшем случае как некая абстрактная философия, которая, может быть, в своем роде занятна, но не имеет прямого отношения к действительности.

Известен ряд процессов получения металла, которые, казалось бы, основывались на весьма прогрессивном, заманчивом принципе, но оказывались не в состоянии преодолеть возникающие сложности и были заброшены. Так, металлизация порошка концентрата водородом на конвейере была оставлена из-за припекания восстанавливаемого металла к ленте конвейера. Процесс «Быстрый нагрев» («Фаст Фуд») не получил распространения из-за сложности механических манипуляций с высокотемпературными окатышами и др.

8.11. Устойчивость традиционной идеологии

Нет, свободную дискуссию нельзя открывать. Тут такая рубка начнется! Мужики же в топоры кинутся!
Из обсуждения регламента конференции

Идеологии (как и религии) устойчивы и могут сохраняться столетиями, даже тысячелетиями. Отдельные факты обычно не могут поколебать идеологию, сколько бы их не было собрано, «документ против идеологии бессилён» [12, 19]. Имеются психологические защитные механизмы, предохраняющие идеологию от ломки; один из таких механизмов состоит в том, что люди часто просто не воспринимают информацию, противоречащую их идеологии. К такой информации проявляется отмеченная выше *поразительная слепота*. В каждом новом массиве данных мы выделяем, осознаем и принимаем те сведения, которые соответствуют нашей идеологии, и часто не можем осмыслить или оставляем без внимания все другие данные.

Если идеология не встречает серьезной конкуренции, то она укрепляется. Со временем идеология нередко костенеет, твердеет так, что становится неспособной к эволюционным изменениям. На базе таких неререформируемых социальных идеологий возникают неререформируемые политические структуры и режимы. Они заканчивают обыкновенно крутой ломкой, разрушением. Доменная идеология в металлургии проявляет черты такой затвердевшей неререформируемой идеологии.

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.

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.

8.12. Закономерности ломки идеологии

К 90-м годам накопилась критическая масса понимания того, что реформы неизбежны.

Е. Гайдар

Для идеологий характерно длительное пребывание в почти неизменном состоянии, а затем быстрое крушение, резкая ломка, когда накопится критическая масса противостоящих идей и фактов. Ломка идеологии в любой области протекает обычно драматически, с интенсивными эмоциями. При ломке социальной идеологии эти эмоции часто выливаются в яркие общеизвестные драматические события, нередко доходящие до кровопролития. В России памятна недавняя ломка социальной идеологии 80-90-х годов. Ломка научно-технической идеологии обычно не сопровождается яркими общеизвестными событиями, часто остается малозаметной, но развивается по тем же психологическим закономерностям.

Достаточно ясное осознание несообразностей существующей идеологии часто достигается сначала небольшой группой исследователей; распространение этого осознания обычно идет внешне незаметно, имеет, как болезнь, длительный «инкубационный период», когда изменения почти незаметны. Затем наступает острый «кризис» или «взрыв»

изменений [12, 19]. Когда накопится «критическая масса» такого осознания, понимания несообразностей, наступает быстрая ломка.

После того, как в обществе накапливается ясное понимание несообразностей социальной системы, эта система обычно существует недолго; ее ломка становится вопросом времени. Быстро, скачком, протекала и такая ломка научных идеологий, как «революция в физике».

Видимо, очень недолго и доменный процесс будет оставаться монопольным способом получения черного металла после того, как у металлургической общественности накопится аналогичная «критическая масса» понимания его несообразностей. Сейчас мы, видимо, в «инкубационном периоде» накопления этого понимания. Внешне ничего не происходит, доменная идеология господствует, и в домне очень тяжело внедрить хотя бы микроскопические улучшения принципов процесса.

В металлургии ситуация сейчас интересна тем, что ломка идеологии вполне может пройти и достаточно быстро, но может растянуться надолго. Но всё же основные вопросы достигли уже такой ясности, что представляется немислимым такой вариант, что *доменный процесс переживет тысячелетия* или хотя бы одно столетие. Самые устойчивые идеологии за несколько десятилетий проходили путь от инкубационного периода ломки идеологии до реальной крутой драматической ломки действительности, производства, жизни.

Из истории известно, что изобретения иногда счастливо быстро внедрялись потому, что изобретателю сразу удавалось убедить какого-то крупного влиятельного деятеля, способного быстро принять нужное решение. Другой вариант состоит в том, что публикации и распространение новых идей постепенно подготавливало общественное мнение, снимало идеологические табу, и вследствие этого изобретения внедрялись затем легко, почти сами собой (имя первого изобретателя при этом часто терялось). Важная задача данной книги – продвинуться в таком прояснении идеологии.

Исследователь, который сейчас займется анализом цикла и его изменением, будет выглядеть несведущим человеком, который просто не понимает ситуации, не знает множества сложностей, и по своей глубокой наивности пытается *изменить все одним махом*, пытается поставить под сомнение самоочевидные вещи. Такому исследователю обычно советуют бросить свои фантазии и заняться серьезным нормальным делом, то есть забросить анализ принципов и заняться деталями и частностями процесса, которыми только и следует заниматься серьезным ученым.

Обычное возражение на предлагаемые схемы процессов сводится примерно к тому, что теоретизировать легко, но пока это только предположения, а убедить может успешно действующий агрегат, хотя бы опытный и малый. Это неверно, действующий опытный агрегат нередко оказывается тем фактом, или тем документом, который *бессилен против идеологии*. Всегда есть много возможностей сомневаться и в эффективности опытного агрегата, и в возможности воспроизвести его работу в большом масштабе и др. Множество опытных агрегатов были заброшены и остались неизвестными.

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.

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. Из-за неполного горения топлива печь получает в 2-3 раза меньше тепла. Приходится применять дорогое топливо – кокс, поэтому тепло горения топлива примерно в 10 раз дороже, чем в угольной топке или паровом котле.

Причиной несообразностей является доменная идеология, сложившаяся в раннем средневековье при формировании доменного процесса. Доменная плавка стала неизбежным следствием интенсификации старого кричного процесса. Доменный процесс не был изобретен или внедрен, он явился самопроизвольно, металлурги несколько столетий боролись с ним, затем смирились. Сформировалась своеобразная средневековая идеология-религия испуганного смирения перед опасными капризами доменной плавки. При изменении условий производства металлурги скорее соглашались ввести дополнительный дорогой передел, чем изменить доменный процесс соответственно новым условиям. На более простых печах (например, для обжига известняка) эти несообразности настолько очевидны, что выглядят уже *вопиющей несообразностью*, которую удастся не замечать вследствие той *поражительной слепоты*, которая встречается при господстве устаревшей идеологии.

Если выйти за пределы доменной идеологии, сжигать топливо отдельно в зоне факелов дутья, то его физические свойства несущественны, можно отапливать печь угольной пылью при полном ее дожигании, что в 10 раз дешевле. При этом можно не переуглероживать металл и получать сталь или полупродукт, близкий к стали, который доводится до попадания в анализ коррекцией состава в выносном горне-отстойнике или ковше.

В этом варианте плавки можно предоставить спекающейся массе металлизированных окатышей опускаться как единое целое до плавления, до пода печи, сделать сход шихты более ровным и тем самым избавиться от опасного лавирования между зависаниями и обрушениями шихты, между опасными перегревами и переохлаждениями горна.

Можно вдвухать концентрат и угольную пыль в больших количествах, получать, например, половину металла из таких неокускованных материалов, что примерно вдвое дешевле. При этом для вдвухания концентрата не требуется такого сложного дорогого оборудования, как для

вдувания угольной пыли. Концентрат можно просто всыпать в поток доменного дутья.

Перспективна металлизация железорудного концентрата в состоянии пылегазовой смеси с угольной пылью. Смесь пропускается через рекуператор (или теплообменник), металлизуется за счет дешевого рекуператорного тепла и отделяется аппаратом «Циклон» и другими средствами пылеочистки. Полученный порошок металлизированного концентрата можно дополнительно прогреть до 1500 °С в факеле, плавить и вдувать в ванну с расплавами, как в кислородно-капельной автогенной плавке меди. Если применить богатый концентрат, провести глубокую металлизацию в рекуператоре, то можно получить порошок железа, пригодный для процессов порошковой металлургии. Возможности порошковой металлургии также оказываются намного шире, чем их определяет современная идеология. Рассмотрено и проверено экспериментально получение металлоизделий прессованием – спеканием металлизированных железорудных концентратов.

Обсуждены закономерности ломки идеологии на примерах близких процессов в металлургии и в других научно-технических вопросах. Можно ожидать подобного процесса ломки и для доменной идеологии.

Предлагаемые процессы в основном получают перегруппировкой известных отлаженных элементов. Технические сложности, которые потребуются преодолеть при их отладке, сравнительно невелики. Большие сложности преодолеваются при создании таких радикально новых процессов, как кислородно-капельная автогенная плавка черновой меди, процессы типа «Ромелт» и др.

Общие затраты на производство чугуна в большой доменной печи (5000 м³) достигают, например, 500 млн дол. в год, и потери из-за несообразностей процесса составляют сотни миллионов долларов. Между тем 1 млн дол. достаточно для того, чтобы построить и отладить небольшой экспериментальный агрегат на одном из предлагаемых принципов. После этого задача внедрения нового способа свелась бы в основном к наращиванию размеров агрегатов.

Фирма, которая отладила бы новый процесс, а затем проконтролировала его распространение, смогла бы получить прибыль, соответствующую огромным масштабам этой отрасли.

**Расчеты теплового баланса, расхода топлива,
теоретической температуры горения**

Для успеха каждого нового металлургического агрегата или новой схемы процесса очень важно, чтобы было обеспечено обилие недорогого тепла. Решающими условиями успеха часто оказывается хороший тепловой баланс процесса, не слишком большой расход топлива и высокая тепловая мощность. Многие предлагавшиеся ранее изобретения были обречены с самого начала на неудачу из-за недостатка тепла.

Если анализируются физико-химические схемы 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 веществ (H, C и др.) при низких температурах меньше этой величины, особенно в молекулярном состоянии; теплоемкости тяжелых веществ при высоких температурах больше $3R$, особенно в расплавах. Однако соответствующие ошибки не очень велики.

При данном допущении физическое тепло $Q_{\text{и}}$, поступающее с исходными веществами процесса, выразится суммой $3R \cdot \sum N_{\text{и}} T_{\text{и}}$, а физическое тепло $Q_{\text{п}}$, уносимое продуктами процесса, равно:

$$3R \sum N_{\text{п}} T_{\text{п}},$$

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:

$$Q = \Delta H_{298} + Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}} = \Delta H_{298} + 3R \cdot \sum N_{\text{и}} T_{\text{и}} - 3R \cdot \sum N_{\text{п}} T_{\text{п}}, \quad (\text{П. 1})$$

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 $T_{\text{д}} = 1200$ °С 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 °С, а из ванны сталеплавильного агрегата они уходят с высокой температурой, например, $T_{\text{о}} = 1500$ °С.

Эффективность получения металла в нашей схеме определяется температурами исходных веществ и продуктов плавки $T_{\text{о}}$, $T_{\text{м}}$, $T_{\text{д}}$, а также долей полного горения углерода, то есть долей CO_2 в суммарном объеме газообразных продуктов горения $\text{CO} + \text{CO}_2$.

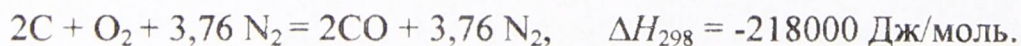
Например, в доменной печи металл (железо) получается по реакциям типа $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} = 3\text{Fe} + 4\text{CO}$, а необходимое тепло обеспечивается реакциями горения углерода типа $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$ и $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ в газообразном кислороде 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.1).

Рассмотрим ряд конкретных задач.

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 CO_2 , горение полностью идет до CO .

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.1):

$$Q = -\Delta H_{298} + Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}} = \Delta H_{298} + 3R\sum N_{\text{и}}T_{\text{и}} - 3R\sum N_{\text{п}}T_{\text{п}},$$

$$Q = 218000 + 25[2(1+3,76)1200 - 25 \cdot 2(2+3,76)200] = 450000 \text{ Дж} = 450 \text{ КДж},$$

где $3R=25 \text{ Дж/г-ат}\cdot\text{К}$.

Реакция восстановления:



будет иметь общую теплоту

$$Q = -685000 - 3(25 \cdot 1500 + 15000) - 25 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 200 = -960000 \text{ Дж} = -960 \text{ КДж}.$$

Чтобы обеспечить теплом реакцию восстановления ($Q = -960 \text{ КДж}$), потребуется «провести $960/450 = 2,15$ реакций горения», так как одна реакция горения дает 460 КДж . Можно сказать также, что реакцию горения потребуется провести с коэффициентом $960/450 = 2,15$. Всего на 3 г-ат железа ($3 \cdot 56 = 168$) потребуется израсходовать $2 \cdot 2,15 = 4,3 \text{ г-ат}$ углерода на горение и 4 г-ат углерода на восстановление, всего $2 \cdot 2,15 + 4 = 8,3 \text{ г-ат}$ углерода, или $8,3 \cdot 12 = 100 \text{ г}$ углерода. Расход углерода составит $100/168 = 0,6$ или 600 кг углерода на тонну железа. Из них $2 \cdot 2,15/8,3 = 0,52$ или 52% углерода потребуется сжечь кислородом дутья, и 48% окислится кислородом окислов железа.

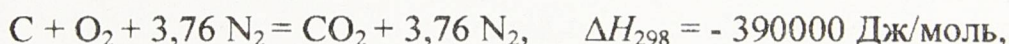
Отметим, что физическое тепло дутья (то есть тепло исходных веществ в реакции горения), равно

$$Q_{\text{и}} = 25 \cdot 2(1+3,76)1200 = 290000 \text{ Дж},$$

больше тепла горения, которое составляет $\Delta H_{298} = 218000 \text{ Дж}$.

Расчёт 2.

Решим ту же задачу при условии, что газы дожигаются, так что углерод горит до CO_2 .



$$Q = 390000 + 25 \cdot 2 \cdot 4,76 \cdot 1200 - 25 \cdot 200(3 + 2 \cdot 3,76) = 630000 \text{ Дж} = 630 \text{ кДж};$$



$$Q = -335000 - 3(25 \cdot 1500 + 15000) - 25 \cdot 6 \cdot 200 = -520000 \text{ Дж} = 520 \text{ кДж}.$$

Для обеспечения расхода 520 Дж на восстановление потребуется реакцию горения, дающую 630 Дж , провести с коэффициентом $520/630 = 0,83$. На 3 г-ат железа (168 г) потребуется $0,83 + 2 = 2,83 \text{ г-ат}$ углерода или 34 г . На 1 тонну железа потребуется $34/168 = 200 \text{ кг}$ углерода или в 3 раза меньше, чем при горении до CO (600 кг). Из этих 200 кг углерода $0,83/2,83 = 0,3$ или 30% потребуется сжечь кислородом дутья и 70% окислится кислородом окислов железа.

Отметим, что при сделанном предположении относительно теплоемкостей ($C = 3R$) такие задачи решаются точно и быстро. Если в колошниковых газах доменной печи 10 % CO_2 и 30 % CO , их соотношение 1:3, то расчетный расход углерода составит примерно $200 \cdot 0,25 + 600 \cdot 0,75 = 490$ кг на тонну железа, что не очень далеко от реальной величины расхода кокса.

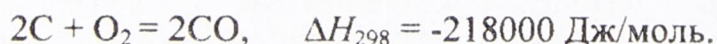
Чтобы оценить расход кокса в реальных условиях, нужно пересчитать углерод на кокс, учесть углеводородную часть топлива, а также затраты тепла на шлакообразование, на потери с водоохлаждением печи, учесть расход углерода на науглероживание металла. Придется сделать много допущений и намного удлинить и усложнить расчет, сделать его намного менее ясным. Но полученные величины расхода топлива будут не очень отличаться от приведенных значений. Интересующее нас соотношение расходов топлива при полном его сжигании до CO_2 (200 кг/т) и неполном сжигании до CO (600 кг/т) останется примерно тем же. Расход топлива и эффективность процесса сильно зависит от полноты сжигания топлива, от % CO_2 .

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 $T=1200$ °С, как на входе в домну, а $T=0$ °С, как на входе в рекуператор. Тогда общий расход топлива получится во втором расчете не 200, а 275 кг/т. На отопление рекуператора потребуется 75 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 °С; отходящие газы имеют температуру 1500 °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 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):

$$Q = \Delta H_{298} + Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}} = \Delta H_{298} + 3R \cdot C N_{\text{и}} T_{\text{и}} - 3R \cdot C N_{\text{п}} T_{\text{п}},$$

$$Q = 218000 - 25 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1500 = 218000 - 150000 = 68000 \text{ Дж.}$$

Реакция восстановления:



будет иметь общую теплоту

$$Q = -685000 - 3(25 \cdot 1500 + 15\,000) - 25 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1500 = -1\,150\,000 \text{ Дж.}$$

Для обеспечения расхода тепла 1150 кДж на восстановление потребуется провести реакцию горения, дающую 68 кДж, 17 раз, или с коэффициентом $1,150/68 = 17$. 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 $17 \cdot 10^6/168 = 100\,000$ молей на тонну, или

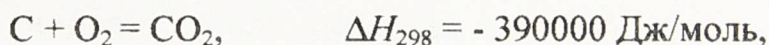
$$100\,000 \cdot 22,4 = 2\,240\,000 \text{ л} = 2\,240 \text{ м}^3.$$

Здесь использовано правило: при нормальных условиях моль газа занимает 22,4 л.

Расход и углерода (2700 кг/т) и кислорода (2,240 м³/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.



$$Q = 390\,000 - 25 \cdot 3 \cdot 1500 = 390\,000 - 113\,000 = 277\,000 \text{ Дж};$$



$$Q = -335\,000 - 3(25 \cdot 1500 + 15\,000) - 25 \cdot 6 \cdot 1500 = -713\,000 \text{ Дж.}$$

Для обеспечения расхода 773 000 Дж на восстановление потребуется реакцию горения, дающую 277 000 Дж, провести с коэффициентом $713/277 = 2,6$. 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 $2,6 \cdot 10^6/168 = 15\,500$ молей на тонну, или $15\,500 \cdot 22,4 = 350\,000 \text{ л} = 350 \text{ м}^3$.

Из этих данных видно, что для успеха подобных процессов решающее значение имеет обеспечение высокой полноты горения топлива до CO_2 . При неполном горении только до CO 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 % CO_2 в сумме $\text{CO}_2 + \text{CO}$ (доля полного горения топлива). Все полученные данные сведём в таблицу.

Процесс, дутьё, доля полного горения	T_d , °C	T_o , °C	T_m , °C	Доля полно- го го- рения, %	Расход углеро- да, кг/т	Расход кисло- рода, нм 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 рекуператорами	1200	200	1500	100	275	
«Циклон», на порошок же- леза, 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, 30 % CO_2	0	1500	1500	30	860	-
«Ромелт», достигнутый рас- ход топлива и O_2	0	1500	1500	30	780-1000	680-750

Расчёт 6.

Расчет теоретической температуры горения T_r выполняется по той же формуле (П.1), определяющей тепловой баланс реакции. В отличие от расчета расхода топлива, в данном случае неизвестной является конечная температу-ра реакции T_p (то есть температура продуктов реакции, $T_r = T_p$). Общая тепло-

та реакции Q равна нулю, так как все тепло реакции расходуется на нагрев ее продуктов.

$$Q = \Delta H_{298} + Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}} = \Delta H_{298} + 3R \cdot CN_{\text{и}} T_{\text{и}} - 3R \cdot CN_{\text{п}} T_{\text{п}} = 0.$$

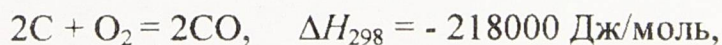
Расчет температуры горения $T_{\text{Г}}$ приведен в таблице.

Реакция полного горения (ПГ) или неполного горения (НГ)	ΔH_{298} , кДж/моль	$T_{\text{Г}}$ °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 O_2 до CO ($2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$). Рассчитать теоретическую температуру горения $T_{\text{Г}}$.

Реакция горения будет иметь вид:



$$Q = 218000 + 25 \cdot 2 \cdot 1500 - 25 \cdot 4 \cdot T_{\text{Г}} = 0,$$

откуда $T_{\text{Г}} = 2950$ °С.

Итоговое тепло Q равно нулю, потому что все тепло реакции расходуется на нагрев продуктов горения (2CO) до температуры $T_{\text{Г}}$.

Рассмотрим еще смесь ($3\text{Fe}+4\text{CO}$) при $1100\text{ }^\circ\text{C}$, которая образуется при металлизации магнетита углем ($\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{C}=3\text{Fe}+4\text{CO}$) в рекуператоре. Если газ CO на 25% дожигается до CO_2 холодным ($0\text{ }^\circ\text{C}$) кислородом, то полное тепло реакции горения ($\text{CO}+0,5\text{O}_2=\text{CO}_2$) при $1100\text{ }^\circ\text{C}$ составит

$$Q = 280000 - 25 \cdot 1100 = 254000 \text{ Дж.}$$

Этого тепла достаточно для расплавления металла (15000 Дж/г-ат) и нагрева 11 грамм-атомов веществ смеси на

$$\Delta T_{\Gamma} = (254000 - 3 \cdot 15000) / 25 \cdot 11 = 760\text{ }^\circ\text{C}.$$

Практически требуется прогрев смеси на $400\text{ }^\circ\text{C}$, и для этого нужно дожигание $0,6$ моля CO из 4 молей смеси, то есть дожигание на 15% . Кислорода потребуется $0,6 \cdot 0,5 = 0,3$ моля на 168 г железа, то есть $0,3 \cdot 10^6 / 168 = 1800$ молей или $40 \text{ м}^3/\text{т}$.

Расчёт 8.

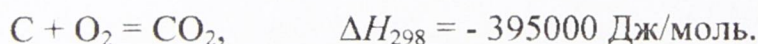
Рассчитать расход углерода топлива на реакцию разложения CaCO_3 в печи обжига известняка при неполном горении топлива до CO и при полном горении до CO_2 . Для простоты не учитываем расход тепла на изменение температуры реагентов в процессе.

При неполном горении до CO :



Для баланса тепла вторую реакцию нужно взять с коэффициентом $(355/216) = 1,65$, тогда на моль CaO (40 г) потребуется $2 \cdot 1,65 + 1 = 4,3$ моля углерода или $4,3 \cdot 12 = 47 \text{ г}$. 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 $0,45 \cdot 12 = 5,4 \text{ г}$. Расход углерода составит $5,4/40 = 0,13$ тонны углерода на тонну известня.

В этом случае полное горение до CO_2 приводит к расходу углерода в $1,18/0,13 = 9$, т. е. в 9 раз меньше по сравнению с неполным горением до CO .

Расчёт 9.

Рассчитаем расход углерода топлива на перегрев до 1400 °С 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 °С, отходящие (колошниковые) газы имеют температуру 200 °С, 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 °С 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 °С и переплавить $630/49 = 13 \text{ г-ат}$ 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 $12/23,2 \cdot 13 = 0,04 \text{ кг}$ 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 $12 - 4 = 8 \text{ кг}$ на тонну металла.

Расчёт 10.

Рассчитаем расход топлива (углерода) для нагрева жидкого металла в горне-отстойнике на 200 °С при обдуве ванны доменным дутьем (1200 °С) с угольной пылью.

Если газы из отстойника переходят в основной корпус агрегата, где дожигаются до CO_2 и охлаждаются до температуры 200 °С 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

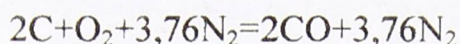
$$Q = 25 \cdot 200 = 5000 \text{ Дж} = 5 \text{ кДж.}$$

За счет горения грамм-атома углерода (12 г) можно нагреть на 200 °С $630/5 = 126 \text{ г-ат}$ 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 вдвухается 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

$$Q = 25 \cdot 1200 = 30000 \text{ Дж/г-ат.}$$

Как показано в расчётах 1 и 2, при неполном горении моль углерода даёт $450/2=225$ 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:



$$Q = \Delta H_{298} + Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}} = \Delta H_{298} + 3R \cdot C N_{\text{и}} T_{\text{и}} - 3R C N_{\text{п}} T_{\text{п}};$$

$$Q = -685000 - 3(25 \cdot 1500 + 15000) - 25 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1500 = -1150000 \text{ Дж.}$$

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.

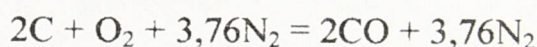
Расчёт 13.

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

$$Q = 218000 + 25 \cdot 2 \cdot (1 + 3,76) \cdot 1200 - 25 \cdot 2 \cdot (2 + 3,76) \cdot 1400 = 100000 \text{ Дж.}$$

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. 6.1), то есть при полном сжигании углерода, без утилизации тепла отходящих газов и без подогрева дутья.

Расчет для выплавки сплава 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.

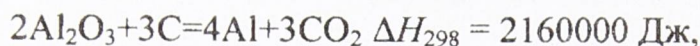
Реакция горения



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 4г-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. Расход углерода на выплавку алюминия составит

$$16,4 \cdot 12 / 4 \cdot 27 = 1,84 \quad \text{или} \quad 1840 \text{ кг/т.}$$

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. Расход углерода на выплавку титана составит

$$3,7 \cdot 12 / 48 = 0,93 \quad \text{или} \quad 930 \text{ кг/т.}$$

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 [и др.]. 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. 2006114771 Российская Федерация, МПК C21B13/14.* Способ и устройство для получения расплавленного железа / Вирамонтес-Браун Риккардо, Вильярель Тревилюо 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. 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, 1997. 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 «Энергетическая 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.
36. *Современные процессы бескоксового производства чугуна* / А. Б. Усачев, В. А. Роменец, В. Е. Лехерзак, А. В. Баласанов // Металлург, 5, 2002, с. 37-40.
38. Делонский С. В. Теоретические основы и технология плавки металлов из неокискованного сырья. С.Пб.: Наука, 2007. 322 с.
39. *Справочник химика*. Т. 1. Л.: Изд-во «Химия», 1971 1072 с.
40. Лейтес И. С. Второй закон и его 12 заповедей. М.: Изд-во МГУ, 2002. 174 с.
41. Льюис М. История физики. М.: Мир, 1970. 465 с.
42. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.1-2. М.: Мир, 1977. 440 с.
43. Уббеллоде А. Р. Плавление и кристаллическая структура. М.: ИЛ, 1969. 296 с.
44. Всемирная история, в 24 т. Минск: Литература, 1997. Т. 12: 612 с.
45. Павлов В. В. Несообразности металлургического цикла, их устранение. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2008. 128 с. Электронный вариант книги // Материалы сайта: Pavlovvalery.ru

Научное издание

Валерий Васильевич Павлов

**НЕСООБРАЗНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЦИКЛА.
ИХ УСТРАНЕНИЕ**

Второе издание, исправленное и дополненное

Редактор изд-ва *Л. Н. Авдеева*
Компьютерная верстка *Д. В. Благин*

Подписано в печать 28.03.2011 г. Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 14,4. Тираж *150* экз. Заказ № *35*.

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

