

И. В.
КОЗЛОВИЧ

И. В. КОЗЛОВИЧ

ПРОЦЕССЫ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ
И ОКИСЛЕНИЯ
В
ДОМЕННЫХ
ПЕЧАХ

МЕТАЛЛУРГИЗДАТ

1951

И. З. КОЗЛОВИЧ

ПРОЦЕССЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ В МОЩНЫХ ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ

Под редакцией акад. М. А. ПАВЛОВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ
Ленинград *1951* *Москва*

АННОТАЦИЯ

В книге излагается ход процессов восстановления в мощных доменных печах, работающих в различных районах Советского Союза. Приведены состав газа, давление его и температура на различных горизонтах доменной печи. Приведены результаты многолетних исследований автора, относящихся к процессам окисления и восстановления элементов чугуна в горне современных доменных печей.

Книга предназначена для научных работников и инженеров металлургической промышленности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора ..	4
Введение ..	5

Часть I

Восстановление окислов железа в доменной печи

Глава 1. Исследования условий восстановления и окисления железа	7
Глава 2. Лабораторные исследования восстановимости руд	12
Глава 3. Заводские исследования	32
Глава 4. Изучение хода восстановительного процесса в доменной печи № 1 Магнитогорского завода	42
Глава 5. Изучение хода восстановительного процесса в доменной печи № 3 комбината Запорожсталь	115

Часть II

Процессы, протекающие в горне мощных доменных печей

Глава 6. Горение углерода кокса	165
Глава 7. Исследования состава газа в горне доменных печей и зависимость размеров окислительной зоны от количества дутья, упругости его и температуры	173
Глава 8. Аппаратура для исследований горна	179
Глава 9. Состав газа в горне на уровне фурм	185
Глава 10. Влияние дутья, обогащенного кислородом, на размеры окислительной зоны	211
Глава 11. Размеры окислительной зоны при подвисяниях печи и осадках ..	223
Глава 12. Давление газов в горне	229
Глава 13. Температура горна	235
Глава 14. Окисление восстановленных элементов	257
Заключение ..	293
Литература ..	297

ОТ РЕДАКТОРА

Интересующиеся теорией доменной плавки не могут не приветствовать выхода из печати книги И. З. Козловича, посвященной изложению многолетних исследований процессов восстановления и окисления, протекающих в мощных доменных печах Советского Союза, выполненных автором лично и отчасти в сотрудничестве с некоторыми другими исследователями.

Доменные техники уже знакомы с опубликованными в этой книге опытными данными по статьям, в свое время помещенным в советских журналах. Однако использование результатов исследований, проведенных И. З. Козловичем, значительно облегчается тем, что все они собраны в одной книге. Очевиднее становятся и те заключения, которые вытекают из этих исследований. Заключения эти опровергают явно теоретически несостоятельные и практически точно не подтвержденные выводы о процессе горения и о состоянии горна доменных печей значительных размеров, которые были опубликованы в немецкой и американской литературе и с доверием восприняты некоторыми советскими металлургами.

Можно надеяться, что книга И. З. Козловича окончательно рассеет опасения, высказанные немецкими исследователями, утверждавшими, что применение широких горнов, например 8 м в диаметре, неизбежно влечет за собой образование так называемого «тотермана», и покажет несостоятельность уверений американских исследователей в том, что работа на сбавленном дутье не уменьшает объема зоны горения в горне доменной печи.

М. ПАВЛОВ

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, протекающие в доменных печах, до сих пор изучены сравнительно мало. Первые исследования состава газа были проведены более ста лет тому назад. С тех пор опубликовано значительное число работ по исследованию состава газа, температуры и давления его на различных горизонтах доменных печей. Работ по изучению восстановимости руд непосредственно в доменных печах проводилось мало. Процессы восстановления исследовались главным образом в лабораториях. Различные исследователи изучали ход процессов восстановления в зависимости от состава газа-восстановителя, температуры и качества руды. Лишь сравнительно недавно внимание металлургов привлекли вопросы качества пустой породы и влияния ее на развитие восстановительных процессов.

Многочисленные и весьма обстоятельные лабораторные работы по изучению процессов восстановления руд не могли воспроизвести всех условий, наблюдаемых в доменной печи, и, естественно, не могли дать ответа на вопрос, как протекают эти процессы непосредственно в доменных печах. Такой ответ мог быть получен только в результате заводских исследований. Заводские исследования состава газа и температуры его на различных горизонтах доменных печей в большом количестве проводились в Германии, но они относились к печам небольших размеров и с несовершенным профилем, что накладывало свой отпечаток на результаты исследований. Процессы восстановления непосредственно не изучались (если не считать одной работы, не имеющей серьезного значения). Поэтому результаты немецких исследований не представляют большой ценности для понимания сущности процессов, протекающих в современных мощных доменных печах. Американские исследования, проведенные в печах с современным профилем, дали настолько противоречивый материал, что на основании его нельзя получить правильного представления о действительном развитии процессов восстановления в доменной печи. Весьма оригинальные исследования процессов восстановления, проведенные в Швеции в маленькой опытной печи, вследствие размеров самой печи и искажений, связанных с остановкой ее, не дали ясного представления о процессах, протекающих в работающих доменных печах.

Нами было проведено изучение процессов восстановления непосредственно в мощных доменных печах Востока и Юга СССР, работающих на различных (магнитогорских и криворожских) рудах. Одновременно изучался состав газа, давление его и температура на различных горизонтах печей.

В особом ряду стоят исследования, относящиеся к изучению горна современных доменных печей.

Грубые ошибки, допущенные Пирот, Кини и Леннингсом при исследовании состава газа в горне доменных печей и Рейнлендером при измерении температуры горна, привели к теоретически неправильным выводам, ныне господствующим в Америке, Англии и Германии. Выводы эти сводятся к тому, что размер зоны горения перед фурмами постоянен, у оси горна существует «мертвый столб» материалов, тем больший, чем больше диаметр горна; температуры у осевой части горна настолько низки, что там никаких реакций не происходит. Из всего этого, как конечный вывод, следовало, что печи малого и среднего размера по сравнению с большими печами технически совершеннее. Такая «теория» дезориентировала практиков и давала неправильное освещение процессов, протекающих в горне современных печей.

Для выяснения истинного состояния горна нами в течение длительного периода проводились исследования мощных доменных печей Магнитогорского и Запорожского заводов.

В настоящей книге разбираются исследования, проведенные с 1934 по 1947 г., критикуются те положения, которые представляются нам неправильными, и на основании собственных исследований излагаются выводы о работе современных мощных доменных печей. В книгу вошел материал, относящийся к влиянию обогащенного кислородом дутья на размеры окислительной зоны (1946 г.), и выводы из исследований процесса размягчения руд (1947 г.).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКИСЛОВ ЖЕЛЕЗА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

ГЛАВА I.

ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

В прошлом столетии было положено начало многочисленным и всесторонним исследованиям процессов восстановления железа из его окислов. Был указан состав нейтральных газовых смесей для различных температур в пределах от красного до белого каления и для различных степеней окисления.

При изучении восстановления магнитной окиси железа водородом и окисления железа парами воды было доказано, что восстановление не идет до конца, а останавливается при определенном соотношении водорода и водяных паров в газовой смеси. Это соотношение остается постоянным как при восстановлении, так и при окислении.

Было введено понятие о диссоциации и изучена реакция распада окиси углерода на уголекислоту и углерод.

В итоге многих работ было установлено, что:

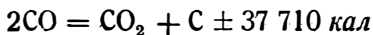
1) реакция распада окиси углерода с выделением сажи-стого углерода протекает наиболее успешно при температуре 400—450°;

2) количество отложенного сажистого углерода для различных руд различно и не связано с процессом восстановления их;

3) присутствие в доменном газе уголекислоты и азота задерживает ход реакции распада окиси углерода;

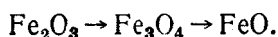
4) восстановительная способность сажистого углерода весьма велика, и процесс восстановления сажистым углеродом протекает при более низкой температуре, чем при восстановлении твердым углеродом.

Было также установлено, что в итоге реакции распада окиси углерода в доменной печи при обратимости ее по уравнению;



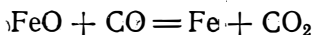
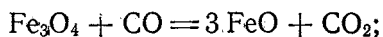
произойдет лишь перемещение тепла с нижних горизонтов печи в верхние и на общем тепловом состоянии печи не отразится.

При исследовании влияния обжига руд на их восстановимость выяснено, что обожженные магнитные железняки восстанавливаются легче необожженных. Силикаты железа при обжиге расщепляются на два окисла — окись железа и кремнезем, химически не связанные между собой; закись железа в процессе обжига превращается в окись железа. При изучении феррата кальция выяснилось, что присутствие окиси кальция затрудняет восстановление железной руды. При восстановлении чистых окислов железа окисью углерода в присутствии углекислоты было установлено, что восстановление идет последовательно от высшего окисла до низшего.



Одно время ошибочно предполагалось существование закиси — окиси (Fe_6O_7).

В ряде работ начала текущего столетия при исследовании равновесия системы $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$ определен при различных температурах (от 400 до 950°) состав газовой смеси окиси углерода и углекислоты в присутствии углерода, и при изучении восстановления окислов железа по реакциям



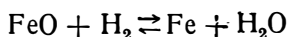
был подтвержден состав нейтральных газовых смесей для этих реакций при различных температурах.

Установлено, что в условиях равновесия закись железа появляется из магнитной окиси железа при температуре 647° и металлическое железо из закиси железа при температуре 685°. Равновесие достигалось как восстановлением окисью углерода, так и окислением углекислотой.

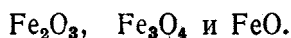
При исследовании процесса восстановления закиси железа и магнитной окиси водородом была применена чистая, искусственно полученная окись железа. При одновременном наблюдении над процессом восстановления окиси железа и окислением металлического железа в газовой смеси $\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$ определенного

состава при заданной температуре в течение 2—3 часов были получены различные результаты. Путем сближения их устанавливался для каждой температуры состав газовой смеси, при которой одновременно существовали закись железа и металлическое железо.

Таким путем в интервале температур 500—950° было установлено равновесие реакции



и существование только трех видов окислов:



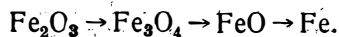
Исследованиями была доказана необратимость реакции восстановления Fe_2O_3 .

В ряде исследований изучалось взаимодействие окислов железа с небольшим количеством окиси углерода при постоянной температуре. По истечении некоторого времени, когда на каждой стадии достигалось равновесное состояние, остаточный газ подвергался анализу. Полученные значения окиси углерода откладывались на оси ординат против соответствующих степеней восстановления, откладываемых на оси абсцисс; после соединения точек между собой получалась изотерма восстановления. Горизонтальные участки в изотерме восстановления соответствуют трем твердым фазам постоянного состава. Переход от одного горизонтального участка к другому происходит с постепенным изменением газовой фазы, что свидетельствует о существовании промежуточных фаз переменного состава, представляющих твердые растворы окислов железа (твердый раствор FeO в Fe_3O_4 , твердый раствор Fe_3O_4 в FeO и твердый раствор FeO в Fe).

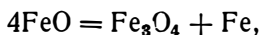
Изотермы восстановления дают возможность определить равновесные состояния восстановления при разных температурах. Они показывают, что для успешного хода процесса восстановления необходимо непрерывно увеличивать содержание окиси углерода в газе по мере роста температуры.

Кривые, построенные по точкам постоянных равновесия в зависимости от температуры, имеют вид плавно изменяющихся линий.

Исследования показали, что процесс восстановления окиси железа до металлического железа протекает через стадии

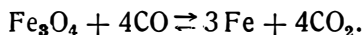


При дальнейших исследованиях было установлено, что закись железа неустойчива и распадается по реакции



образуя ниже 570° магнитную окись железа с выделением металлического железа.

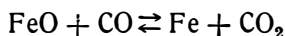
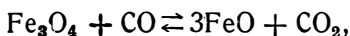
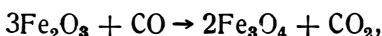
Таким образом, при температурах ниже 570° магнитная окись железа восстанавливается непосредственно в металлическое железо по реакции



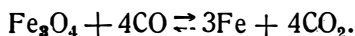
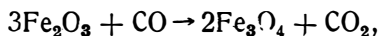
При температуре 570° возможно одновременное существование твердых фаз: Fe_3O_4 , FeO , Fe .

В итоге был установлен состав нейтральных газовых смесей и определен ход реакций:

выше 570°

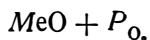


ниже 570°



Одновременно с изучением условий восстановления и окисления элементов развивалось и понятие об упругости диссоциации окислов как о явлении, присущем химическим соединениям и являющемся одним из основных свойств этих химических соединений.

Эта теория наиболее четко сформулирована в трудах академика А. А. Байкова, который говорит, что «восстановление металлических окислов мы рассматриваем как совокупность двух одновременно происходящих превращений: диссоциации окислов с выделением кислорода и воссоединения кислорода с восстановителем (CO или H_2)» [1]. Окислы металла он рассматривает как системы



(P_{O_2} — упругость диссоциации).

По А. А. Байкову существование окислов определяется давлением кислорода внешней среды, и всякое изменение этого давле-

ния создает условия для распада или образования окисла. Поскольку окислы представляют системы, находящиеся в состоянии диссоциации, то существовать устойчиво они могут только в атмосфере, имеющей парциальное давление кислорода не ниже величины, определенной для каждого окисла и являющейся упругостью диссоциации окисла.

Окислы железа Fe_3O_4 и FeO имеют настолько малую величину упругости диссоциации, что измерение ее невозможно. Только Fe_2O_3 при температуре выше 1000° имеет упругость диссоциации, которую непосредственно можно измерить.

Теория, рассматривающая окислы как системы, находящиеся в состоянии диссоциации, дает возможность совершенно определенно судить о направлении процесса и результате, к которому стремится начавшаяся реакция; поэтому теория эта имеет только статический характер.

Скорость реакции, а также механизм возникновения и развития ее этой теорией не определяются.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОССТАНОВИМОСТИ РУД

Многочисленные исследовательские работы в области восстановления руд имели целью выяснить влияние различных факторов на ход процессов восстановления с тем, чтобы полученные результаты можно было применить для оценки поведения руд в доменной печи. Разные исследователи изучали состав газа-восстановителя и влияние его на скорость восстановления, а также влияние смеси газа-восстановителя с углекислотой и азотом. Во многих работах изучалось влияние реакции распада окиси углерода на процесс восстановления. Большое количество исследований было посвящено влиянию температуры на ускорение восстановления. Всесторонне изучалось качество руды, включая и крупность кусков ее. И только сравнительно недавно было обращено внимание на влияние пустой породы руды на ход восстановления. Этот фактор играет громадную роль в развитии восстановительных процессов в доменной печи.

Наиболее многочисленные и всесторонние исследования восстановимости руд в лабораторных условиях провел профессор И. А. Соколов; им изучалось влияние различных факторов на ход процессов восстановления.

Основные работы были выполнены И. А. Соколовым в начале XX века, задолго до того, как аналогичные работы были проведены за границей.

И. А. Соколов [2] применил газ из смеси CO и CO_2 , близкий по составу к доменному газу из соответствующих температурных областей.

Исследования велись в пределах температур $150\text{--}800^\circ$. При температурах выше 600° восстановление производилось чистой окисью углерода. Исследовались различные естественные руды в измельченном состоянии и искусственно приготовленные окислы железа.

Попутно И. А. Соколов изучал отложение сажистого углерода по реакции распада окиси углерода и влияние этого процесса на ход восстановления.

Результаты исследований показали, что восстановление искусственной водной окиси железа начинается при температуре око-

до 150°, естественных бурых железняков, не обожженных или обожженных при низкой температуре, — около 220—230°, сильно обожженных бурых железняков — около 330°, при этой же температуре процесс восстановления начинается и для красных железняков. Магнитный железняк начинает восстанавливаться при 400—420°.

Повышение температуры для легко восстанавливаемых руд приводит к ускорению процесса восстановления, продолжающегося до 400°; дальнейшее повышение температуры замедляет восстановление, в связи с отложением сажистого углерода по реакции распада окиси углерода.

И. А. Соколов установил, что максимальное падение восстановления и наибольшее выпадение углерода происходят при температуре около 500°. С дальнейшим повышением температуры скорость восстановления возрастает и особенно быстро — после 600°. Выделение сажистого углерода прекращается при 700°.

При исследовании трудновосстанавливаемых руд сажистый углерод выпадал при более высоких температурах и в значительно меньшем количестве. При восстановлении бедных руд, содержащих много пустой породы, тесно перемешанной с окислами железа; выделений сажистого углерода не наблюдалось и в связи с этим не было замедления восстановления при температурах, при которых протекает реакция распада окиси углерода.

В интервале температур 700—800° И. А. Соколов установил замедление восстановления, а также показал изменение структуры окислов железа при сильном обжиге их, что связано с существованием двух аллотропических состояний окислов железа; одно из них получается при низкой температуре, другое при высокой. Переход из одного состояния в другое вызывается полимеризацией частиц, вследствие которой увеличивается удельный вес и химическая инертность и ухудшается восстановимость.

Существование двух аллотропических состояний окислов железа было установлено еще в прошлом столетии [3].

Замедление процесса восстановления в области высоких температур нами было экспериментально подтверждено при исследованиях, проводимых в мощных доменных печах заводов Магнитогорского и Запорожстали. Явление это объясняется как воздействием пустой породы руды на ход восстановительных процессов, так и переходом частиц окисла железа из одного аллотропического состояния в другое.

И. А. Соколов совместно с сотрудниками изучал также влияние величины кусков руды на скорость восстановительного процесса. Им были исследованы руды в порошке и в кусках круп-

ностью 5, 10, 20 и 30 мм. В качестве восстановителя применялась чистая окись углерода. Исследования велись в интервале температур 400—900°, продолжительность каждого опыта была 3 часа, пропуск газа — 2 ч. 15 м.

Исследования показали, что с увеличением размера кусков уменьшается количество восстановленного железа из руд в сильной степени для плотных магнитных железняков и в слабой степени для пористых бурых железняков. Руды, содержащие пустую породу, дающую резкое изменение коэффициента расширения при нагревании, благодаря чему происходит образование трещин, показывают слабое падение восстановимости с увеличением размеров кусков. Процесс восстановления в куске руды, как показали те же исследования, идет с поверхности в глубину, при этом в трещинах располагаются отложения сажистого углерода.

Были опубликованы исследования, при которых применяли водород. Восстановление велось при строго постоянной температуре 800° в продолжение 3—7 час. [4].

Изучению подвергались руды минетт и несколько проб красного и магнитного железняков. В результате исследований пришли к выводу, что основную роль в восстановлении руд играет их пористость; на скорость восстановления влияет и характер пустой породы: основные известковые минетт восстанавливаются лучше кислых — кремнеземистых.

Применение в качестве газа-восстановителя окиси углерода, если и не воспроизводит всех условий, при которых протекает восстановительный процесс в доменной печи, то значительно приближает к ним лабораторные условия. Использование водорода, к тому же при строго определенной температуре, а не непрерывно меняющейся, как в доменной печи, значительно отдаляет лабораторные условия от условий доменной печи, в которой водород играет в развитии процессов восстановления второстепенную роль. Поэтому лабораторные работы с водородом имеют ценность лишь для сравнения восстановимости одних руд с другими.

В некоторых работах [5] изучалась скорость восстановления различных руд в зависимости от состава газа-восстановителя, от температуры и от скорости газового потока с одновременным исследованием выделения сажистого углерода. В состав газа входили CO , CO_2 , H_2 , H_2O . Для получения сравнимых данных применялся метод изображения относительной скорости реакций, выраженной в виде величины $\text{tg} Q$ угла наклона касательной к линии в разных точках.

В результате исследований пришли к выводу, что наибольшая скорость восстановления наблюдается в первый его момент,

затем скорость восстановления понижается; когда руда восстановится на 10—30%, скорость восстановления становится постоянной до тех пор, пока восстановимость не достигнет 60—70%; в дальнейшем скорость восстановления падает.

Примесь к газу-восстановителю водорода повышает скорость восстановления, а присутствие CO_2 и H_2O понижает ее. На скорость восстановления весьма большое влияние оказывает скорость газового потока.

Были также опубликованы работы [6] по исследованию влияния различных окислов на ход процессов восстановления окислов железа. Вопрос этот до недавнего прошлого привлекал к себе мало внимания, несмотря на то, что еще ранее указывалось, что присутствие окиси кальция затрудняет восстановление железа из его окислов. Впервые наиболее четко по этому вопросу высказался И. А. Соколов [2], когда он при изучении восстановимости искусственно полученных тонких смесей окиси железа с кремнеземом и глиноземом пришел к выводу, что кремнезем и глинозем (каждый по своему) оказывают задерживающее влияние на процесс восстановления, и этот процесс в присутствии SiO_2 и Al_2O_3 протекает иначе, чем при восстановлении чистых окислов железа.

Железные руды не являются чистыми окислами железа, а представляют собой системы, в которых окислы железа только преобладают, поэтому в реальных условиях доменной печи процессы восстановления сопровождаются одновременным взаимодействием различных окислов руд между собою, что усложняет и видоизменяет процесс восстановления, его результаты и состав продуктов восстановления.

Естественно поэтому, что лабораторные работы, в которых изучается влияние различных окислов на ход процессов восстановления, в значительной степени способствуют пониманию того, как протекает процесс восстановления в доменной печи.

Некоторыми исследователями было обращено внимание на то, что даже материал лодочек оказывает влияние на ход восстановления [6].

Результаты своих работ исследователи представили в виде кривых: на оси абсцисс откладывалось содержание кислорода, связанного с железом в твердом состоянии, а по оси ординат — процентное содержание углекислоты в газовой фазе, находящейся в равновесии с твердой фазой определенного состава (по содержанию кислорода).

Эти исследователи изучали окислы, которые имеются в пустой породе железных руд и непосредственно влияют в доменной печи на восстановление их. К числу таких окислов относятся

основные окислы — MgO , CaO , MnO , кислотный — SiO_2 и нейтральный — Al_2O_3 .

В процессе восстановления существенно изменяется характер окислов; Fe_2O_3 — окисел, обладающий свойствами ангидрида слабой кислоты, переходит в основной окисел FeO , пройдя промежуточную стадию Fe_3O_4 , которая представляет соединение типа шпинели FeO, Fe_2O_3 .

Авторы [6] исследовали две смеси $Fe_2O_3 + MgO$ при 800° ; одну, соответствующую соотношению $Fe_2O_3 + 11 MgO$, и другую $2 Fe_2O_3 + MgO$; восстановление обеих смесей имеет ступенчатый характер. Восстановление смеси $Fe_2O_3 + 11 MgO$ протекает в две стадии. В первый период образуется $MgO \cdot Fe_2O_3$ — феррат магния, восстанавливающийся в первой стадии процесса. Во второй стадии восстанавливался твердый раствор магнезии с закисью железа.

Восстановление окиси железа в смесях, богатых окисью магния, идет непосредственно до закиси железа, минуя магнитную окись.

Восстановление $2 Fe_2O_3 + MgO$ проходит три стадии. В первой стадии идет восстановление до магнитной окиси железа, во второй — восстановление твердого раствора переменного состава двух соединений типа $FeO \cdot Fe_2O_3$ и $MgO \cdot Fe_2O_3$, в третьей — восстановление твердого раствора.

Влияние извести на процесс восстановления проверялось при температуре 900° в четырех смесях разного состава. Восстановление смеси, богатой известью ($10 CaO + Fe_2O_3$), протекало в две стадии.

Смеси типа $CaO \cdot Fe_2O_3$ и $2CaO \cdot 3Fe_2O_3$ восстанавливались, образуя пять промежуточных соединений, природа которых осталась невыясненной.

Только смесь, бедная известью ($CaO \cdot 3Fe_2O_3$), восстанавливалась почти так же, как чистая окись железа.

Влияние закиси марганца изучалось в трех смесях: $8MnO \cdot Fe_2O_3$, $MnO \cdot Fe_2O_3$ и $MnO \cdot 2Fe_2O_3$ при температуре 800° . Восстановление протекало в две стадии. В начальный период смесь окиси железа с закисью марганца восстанавливается легче, чем чистая окись железа. Образующийся твердый раствор закиси железа и закиси марганца восстанавливается во второй стадии. Согласно диаграмме состояния $MnO + FeO$ закись железа и закись марганца неограниченно взаимно растворяются в твердом состоянии.

Влияние кремнезема изучалось в трех смесях: $Fe_2O_3 + 10 SiO_2$, $Fe_2O_3 + SiO_2$ и $3Fe_2O_3 + SiO_2$ при температуре 900° .

Смесь, богатая кремнеземом ($Fe_2O_3 + 10 SiO_2$), восстанавли-

вается в две стадии. Первая стадия характеризуется превращением окиси углерода полностью в уголекислоту. Образующийся силикат железа — фэйялит — $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ восстанавливается во второй стадии до металлического железа.

Восстановление смеси $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ протекало в четыре стадии, причем две стадии мало выражены; они соответствуют изменению магнитной окиси до закиси и закиси до металлического железа.

Смесь, бедная кремнеземом ($3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$), имеет четыре ступени восстановления, выраженные более отчетливо, чем в предыдущем случае.

Проведенные работы показали, что на процесс восстановления железа из его окислов влияют не только различные окислы, но и их количество (в переносе на доменную печь — бедная или богатая руда).

В одной из работ [7] показано, что восстановление окисью углерода окислов железа в интервале температур $500\text{—}800^\circ$ идет значительно медленнее, чем восстановление водородом, и увеличение в газовой смеси водорода увеличивает скорость восстановления. Это происходит несмотря на то, что при этих температурах уголекислота имеет меньшую упругость диссоциации, чем водяные пары. Более слабая диффузия уголекислоты из зоны восстановления по сравнению с водяными парами — причина того, что восстановительное действие водорода оказывается более сильным, чем окиси углерода.

Некоторые исследователи, применяя в качестве газа-восстановителя водород, обратили внимание на то, что в области температур $850\text{—}1000^\circ$ степень восстановления понижается. Связано это со спеканием α -частиц железа на поверхности кусков руд; при переходе α -железа в γ -железо и уменьшении молекулярного объема частиц железа скорость восстановления с дальнейшим повышением температуры снова возрастает.

Автор другой работы [8] стремился в лабораторной обстановке воспроизвести условия доменной печи. Температура изменялась от 200 до 1000° , состав газа и скорость его были аналогичны соответствующим зонам в доменной печи, время — 10 час., давление газа — 1 ат. Испытывались руды минетт и агломерат из колошниковой пыли, рудной мелочи и пиритных огарков.

Максимальное отложение сажистого углерода совпадает с наибольшим количеством образующегося карбида железа. В трудновосстановимых рудах переход окиси железа в закись совершается при более высокой температуре — 600° . Агломерат оказался труднее восстановимым, чем сырые руды.

В дальнейшем исследователи стремились также выяснить

влияние размеров кусков руды на скорость восстановления, но величина кусков менялась у них от мелочи до 50 мм [9]. В отличие от предыдущих работ были созданы условия, более близкие к условиям доменной печи.

Время пребывания руды при определенных температурах, состав газа, давление его и скорость были выбраны аналогичными тем, какие существовали в одной исследованной доменной печи, работавшей на литейный чугун.

Исследования велись в пределах температур 320—1050°. Испытывались руды как богатые железом (60—62% Fe), так и бедные (35—45% Fe). Попутно изучалось выделение сажистого углерода по реакции распада окиси углерода.

Необходимо отметить, что эти лабораторные опыты заметно выделялись среди других исследований тем, что максимально приближались к действительным условиям доменной печи, чего чрезвычайно трудно достигнуть в лаборатории.

Результаты исследований представлены в виде диаграмм, из которых видно, что для руд трудновосстановимых до величины кусков в 10 мм получается почти одинаковая восстановимость — 82%, для легче восстановимых размер кусков увеличивается до 22 мм и при этом достигается восстановимость около 86%. С дальнейшим увеличением кусков руды начинается падение восстановимости; для труднее восстановимых руд — более резко с размера в 12 мм, для легче восстановимых — менее резко с куска в 22 мм. Отложение сажистого углерода для различных руд различно, но для всех наибольшее при минимальной величине куска.

Специальным исследованиям подвергалось влияние пористости руд на восстановимость их; пористость выражалась числом квадратных сантиметров поверхности пор на 1 см³ объема; при этом было установлено, что восстановимость руд прямо пропорциональна пористости их.

Более поздние исследования [10] не подтвердили этого. Было исследовано большое количество образцов руд (110 образцов из 42 руд), восстанавливавшихся водородом при 800°, и была установлена более сложная зависимость между пористостью руд и восстановимостью их. По этим данным, плотные малопористые руды (5—10% пористости) требуют более мелкого дробления (около 25 мм) и наибольшей продолжительности восстановления (81 мин. до 90%), тогда как рыхлые, многопористые руды (50—60% пористости) допускают величину кусков до 95—100 мм и требуют на восстановление до 90% всего лишь 21 мин.

Количество и качество советских исследований, опубликованных за последние десятилетия, вместе с работами по изучению

кинетики процессов восстановления позволило советской металлургической науке занять ведущее место в области изучения процессов восстановления железных руд.

Много работ по изучению восстановимости руд Урала и Сибири было проведено проф. И. А. Соколовым совместно с учениками; часть этих работ опубликована в различных журналах в 1930—1938 гг.

В работе, выпущенной в 1930 г., И. А. Соколов и Н. Н. Круглов [11] приводят результаты изучения восстановимости агломератов из шлихов гороблагодатских магнитных железняков. Агломерат испытывался в порошке и в кусках. В итоге исследований авторы пришли к выводу, что при испытании в одинаковых условиях более закисный агломерат имеет слабую восстановимость (всего 43%) по сравнению с гематитовым (малозакисным) агломератом (61% восстановимости). Восстановимость гематитового агломерата в куске такая же, как и в порошке, тогда как восстановимость более закисного агломерата в куске значительно хуже, чем в порошке. Сравнивая восстановимость агломератов в порошке с восстановимостью естественных руд также в порошке, исследователи считали, что агломерат значительно хуже восстанавливается, чем естественная руда.

На основании таких выводов И. А. Соколов выдвинул положение, что агломерат вообще восстанавливается хуже естественных руд, и для нормального течения восстановительных процессов в доменной печи необходимо готовить исключительно гематитовый агломерат. В первый период введения агломерации в нашей металлургии это положение И. А. Соколова получило широкое признание и вызвало требование иметь в хорошем агломерате не больше 5% закиси железа. Это требование оказалось весьма вредным, так как гематитовый агломерат был мало прочным.

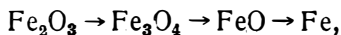
Более поздние работы А. Н. Похвиснева, изучавшего восстановимость агломератов и руд в кусках, доказали, что агломерат в куске, по сравнению с естественными кусковыми рудами, восстанавливается лучше; они рассеяли неверные взгляды И. А. Соколова, и металлургам стало ясно, что гематитовый агломерат как малопрочный материал вреден.

Прочность агломерата, обеспечивающая нормальное течение доменного процесса, является основным требованием, предъявляемым к каждому агломерату.

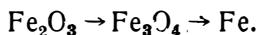
Несмотря на очевидную ошибочность своей позиции в вопросе о качестве агломерата, И. А. Соколов и позже продолжал придерживаться прежней точки зрения. Это нашло свое отражение

в работе, опубликованной в 1934 г. по исследованию агломератов из руд Темир-Тау [12], и в работе 1935 г. по изучению агломератов из керченских руд [13]. Та же точка зрения защищалась им и в книге «Доменный процесс», выпущенной в 1938 г. [14], в которой автор писал: «Много лучшей восстановимостью обладали агломераты гематитового типа и гораздо худшей — файялитовые», и там же: «При переходе от порошка к кускам восстановимость гематитовых агломератов почти не падает, для закисных оплавленных агломератов она заметно уменьшается и очень резко падает для файялитового агломерата, богатого кремнеземом».

В 1933 г. была выпущена работа А. С. Тумарева [15], в которой автор, восстанавливая при 500° окисью углерода магнитную окись железа, исследовал обратимость реакции $4\text{FeO} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$ и установил, что ниже 570° закись железа неустойчива и разлагается с образованием магнитной окиси и металлического железа. Таким образом, еще раз экспериментально было подтверждено, что выше 570° процесс восстановления идет по схеме



а ниже 570° по схеме



С. Т. Ростовцев, Ф. С. Таранов и Г. Е. Понюхно [16] в работе, опубликованной в 1933 г., приводят результаты изучения восстановимости руд курской магнитной аномалии. Из их исследований видно, что в рудах хлорит и кварц задерживают восстановление. Так, при одинаковых условиях, руды, не содержащие хлорита, восстанавливаются до 95%, а содержащие 35% хлорита — только до 61%. Авторы пришли к выводу, что увеличение содержания в рудах хлорита приводит не к пропорциональному, а к более прогрессивному падению восстановимости.

Кварц оказывает менее заметное задерживающее влияние на процесс восстановления; при содержании кварца 9,3% восстановимость 90,5%, при 30% — 80% и при 42% — 72%. Понижение восстановимости руд прямо пропорционально увеличению содержания в них кварца.

Авторы исследовали также влияние величины кусков руд на процесс восстановления при температуре 850° в продолжение 30 мин. и получили, что при величине зерна 0,27 мм восстановимость в среднем около 90%, а при величине 20 мм снижается до 60%.

А. Н. Похвиснев и М. С. Гончаревский [17, 18, 19] детально исследовали руды Кривого Рога (богатые и бедные), керченские и уральские и агломераты из различных руд. Исследования по-

казали, что при восстановлении в порошке водородом при температуре 900° наиболее восстановимой является керченская руда и наименее — агломерат из нее. Богатая криворожская руда восстанавливается так же, как и керченская, а бедная криворожская руда (кварцит) — значительно хуже богатой. Гороблагодатский мартит в первые 40 мин. восстанавливается хуже криворожских кварцитов, а при более длительном восстановлении — одинаково с ним.

При изучении восстановимости различных типов криворожских руд авторы установили хорошую восстановимость всех руд в первый период и значительно худшую (после восстановления до 40%) для магнетитовой руды Шварцевского рудника, которая в течение 30 мин. восстанавливалась только до 70%, тогда как остальные за то же время — до 90—95%. Все руды испытывались в кусках величиной 12—15 мм.

Особый интерес имела работа А. Н. Похвиснева и М. С. Гончаревского по сравнительному изучению восстановимости водородом криворожских руд и агломератов из них в кусках величиной 5—50 мм при температуре 900° . Результаты исследований показали, что падение восстановимости агломератов по мере увеличения кусков происходит менее заметно, чем руд, а в кусках величиной более 20 мм агломерат восстанавливается лучше, чем руды, из которых он изготовлен. Таким образом, как уже отмечалось выше, работа А. Н. Похвиснева и М. С. Гончаревского опровергла неправильные выводы И. А. Соколова о худшей восстановимости агломератов по сравнению с рудами и внесла полную ясность в этот вопрос.

В 1935 г. была опубликована работа Л. М. Цылева [20] по изучению восстановимости тульских и липецких руд. Восстановление проводилось окисью углерода в присутствии угольной кислоты при температуре 400 — 600° и чистой окисью углерода при температуре 800° . Испытывалась руда в порошке. Все руды показали хорошую восстановимость, несмотря на сравнительную бедность их и повышенное содержание пустой породы. В области температуры 400 — 550° все руды резко замедляют восстановимость, связанную с развитием при этих температурах реакции распада окиси углерода; выше 550° по мере повышения температуры все руды резко увеличивают восстановимость. При испытании этих же руд в кусках величиной 5—30 мм автор установил понижение восстановимости по мере увеличения размеров кусков, но менее резкое, чем это было в других работах [9].

С 1935 по 1938 гг. были опубликованы работы И. А. Соколова с учениками [21, 22, 23] по исследованию руд Сибири и Дальнего Востока, проведенные по ранее применявшейся методике. Исследования показали те же свойства руд, какие были описаны

ранее в многочисленных работах И. А. Соколова. Руды эти преимущественно бедные, требующие обогащения и агломерации, поэтому изучение восстановимости их в естественном состоянии практически представляет малый интерес.

Определенный интерес для суждения о поведении в доменной печи руд, попавших невосстановленными (или недовосстановленными) в область высоких температур, имеет работа И. А. Соколова и В. В. Кумина [24], опубликованная в 1935 г. Авторы изучали восстановимость при высоких температурах уральских, сибирских и керченских руд; первые — богатые железом, вторые — содержащие от 9 до 36% кремнезема и последние — бедные железом (36,55%), с высоким содержанием пустой породы, преимущественно кремнеземистой (26,63% SiO_2) и глиноземистой (9,03% Al_2O_3). Испытания велись в течение 1 и 2 час. в токе окиси углерода при температурах 700, 800, 900, 1000 и 1100°. Результаты исследований представлены в виде диаграмм, показывающих зависимость восстановимости руд от содержания пустой породы в них.

При одночасовых опытах восстановимость росла для всех руд до температуры в 900°; до 1000° она продолжала расти для богатых железом руд и падала для бедных по железу и содержащих много пустой породы; выше 1000° восстановимость для всех руд резко падала.

При двухчасовых опытах восстановимость росла для всех руд до 1000°, выше 1000° для всех руд падала еще более резко, чем при одночасовых опытах. Падение восстановимости было тем больше, чем больше в руде содержалось пустой породы.

Исследования показали, что химические реакции между окислами железа и пустой породой руды при температурах выше 900° ухудшают процессы восстановления по сравнению с развитием их при более низких температурах. Это весьма существенно для представления о том, как протекают процессы восстановления непосредственно в доменной печи.

В 1936—1937 гг. под руководством И. А. Соколова проводились работы [25] по изучению влияния на процессы восстановления механических смесей Fe_2O_3 с SiO_2 , CaO и Al_2O_3 при температуре 600—1200°. Восстановление велось в течение одного часа окисью углерода. К смесям примешивался в измельченном состоянии кокс или древесный уголь. Для сравнения одновременно изучалось восстановление чистой окиси железа. Восстановимость смеси Fe_2O_3 с 30% SiO_2 непрерывно росла до 800°, хотя и медленнее, чем чистой окиси железа; в интервале температур 800—1000° произошло падение восстановимости смеси, тогда как восстановимость чистой окиси железа продолжала расти. После 1000° восстановимость смеси резко упала. При 1200° процент

восстановленного железа из смеси составил всего лишь около 14%, тогда как при этой же температуре чистая окись железа восстановилась до 98%. Влияние Al_2O_3 на восстановление окислов железа оказалось слабым по сравнению с SiO_2 . Падения восстановимости в интервале температур 800—1200° не было, произошло лишь понижение восстановимости смеси по сравнению с чистой окисью железа.

Образование соединения FeO с Al_2O_3 происходило при более высокой температуре, чем FeO с SiO_2 , поэтому и задерживающее влияние Al_2O_3 оказалось иным, чем SiO_2 .

Влияние смеси SiO_2 и Al_2O_3 на процесс восстановления выше 800° оказалось менее резким, чем одной SiO_2 , но весьма значительным. При 1200° чистая окись железа восстановилась до 98%, тогда как смесь Fe_2O_3 с 30% SiO_2 и Al_2O_3 только до 47%.

Сплав Al_2O_3 с SiO_2 типа муллита — $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ оказал такое же влияние на понижение восстановимости, как и смесь Al_2O_3 с SiO_2 .

Задерживающее влияние смеси CaO с Fe_2O_3 так же, как и сплава CaO с Fe_2O_3 , оказалось весьма слабым.

Влияние шлага состава 42% SiO_2 , 17% Al_2O_3 и 41% CaO было таким же, как и механической смеси того же состава; при 1000° чистая Fe_2O_3 восстанавливалась до 94%, тогда как вместе со смесью и шлаком только до 76%; при повышении температуры до 1200° разница в восстановимости составила менее 4%.

Исследования показали, что присутствие в рудах пустой породы оказывает весьма существенное влияние на процессы восстановления вследствие реакций, протекающих между окислами железа и окислами пустой породы.

В 1936 г. была опубликована работа М. М. Лейбовича [26], изучавшего восстановимость бакальских сидеритов. Исследования в токе водорода показали, что необожженный сидерит начинает восстанавливаться в порошке при температуре 400° и в куске (20 мм) при 500°. Процесс разложения задерживал восстановление, при дальнейшем повышении температуры по окончании разложения скорость восстановления резко возрастала и при 800° в течение 1 часа достигала 91%. Недостатком исследований является применение в качестве газа-восстановителя вместо окиси углерода водорода, вследствие чего не выявлено влияние углекислоты от разложения сидеритов на процесс восстановления.

Ряд работ в 1937 г. был посвящен вопросу отложений сажистого углерода по реакции распада окиси углерода и влиянию его на процессы восстановления.

В работе акад. А. А. Байкова и А. С. Тумарева [27] изучалось восстановление химически чистых окиси железа и магнитной окиси углеродом-сажей при температурах 600 и 800°. При выдержке

в течение 6 час. при 600° смесь $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C}$ давала только магнитную окись и в газовой фазе одну углекислоту. При нагревании той же смеси до 800° появлялась и закись железа, а в газовой фазе устанавливался состав, соответствующий равновесной системе $\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{FeO} - \text{CO} - \text{CO}_2$ при этой температуре.

В смеси магнитной окиси железа с углеродом после 8-часовой выдержки при температуре 800° магнитная окись целиком переходила в закись железа, а затем и в металлическое железо, состав газовой фазы устанавливался соответственно равновесной системе $\text{FeO} - \text{Fe} - \text{CO} - \text{CO}_2$. Эта работа еще раз подтвердила последовательность восстановления от Fe_2O_3 до Fe .

А. Н. Похвиснев и Г. А. Воловик [28], изучая восстановимость агломератов из криворожских руд в токе окиси углерода при температурах $400-900^\circ$, установили весьма заметное понижение восстановимости при температурах до 600° . Выше 700° восстановимость резко повышалась. Понижение восстановимости было связано с выделением сажистого углерода по реакции распада окиси углерода.

А. М. Зайцев [29] изучал восстановимость богатых бакальских бурых железняков в обожженном состоянии и высокогорского магнитного железняка при последовательном повышении температуры до 1200° . Восстановление велось окисью углерода в присутствии древесного угля и окисью углерода в присутствии кокса. Испытывались кусочки руд величиной $10-20$ мм. Исследования показали, что бурый железняк начинал восстанавливаться при 400° ; с повышением температуры до 550° процесс ускорялся, затем начиналось замедление в связи с отложением сажистого углерода, которое продолжалось до температуры 670° . Восстановление сажистым углеродом начиналось при 700° и заканчивалось при 950° . Прямое восстановление древесным углем шло с 750 до 900° медленно, затем процесс быстро ускорялся. Прямое восстановление коксом начиналось только с 950° и протекало медленно до 1100° . Восстановление магнитного железняка начиналось с 650° ; отложение сажистого углерода происходило в интервале температур $570-700^\circ$.

Исследования показали, что бурый железняк восстанавливается в присутствии древесного угля на 100% , а в присутствии кокса только на 75% и магнитный железняк в присутствии древесного угля на 75% , а в присутствии кокса на 47% . Тем самым доказано, что восстановительная способность древесного угля значительно выше чем у кокса, и процессы восстановления в древесноугольных печах заканчиваются в более высоких горизонтах, чем в коксовых печах.

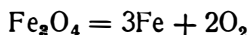
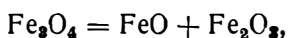
Изучению хода реакции распада окиси углерода при восстановлении различных руд посвящена работа Д. С. Хорунова [30].

Его исследования магнетитовых, керченских, бакальских, горблагодатских и сибирских руд и агломератов Дальнего Востока показали, что отложение сажи углерода происходит главным образом в интервале температур 500—700° и преимущественно на поверхности кусков руд и что восстановимость руд не связана с количеством выпадающего сажи углерода.

В 1940 г. была опубликована работа А. С. Тумарева [31] по изучению диссоциации магнетитовой окиси железа с целью получения выводов, приложимых к изучению диссоциации сложных химических соединений.

В основу работы был положен принцип, сформулированный акад. А. А. Байковым как «принцип множественности химических реакций», допускающий возможность распада сложного химического соединения по различным схемам с образованием различных продуктов разложения.

В итоге проведенной работы А. С. Тумарев пришел к выводу, что «одно и то же химическое соединение может в зависимости от условий распадаться (диссоциировать) по различным схемам»:



и поскольку Fe_3O_4 представляет соединение типа шпинели — $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, то «все, что относится к Fe_3O_4 , относится и к другим солям, которые, следовательно, могут диссоциировать по разным схемам, либо распадаясь на составляющие их окислы элементов, либо отцепляя один какой-либо элемент».

Л. И. Шушпанов [32] при исследовании расплавленных железистых шлаков установил, что в течение процесса наблюдается как раздельное, так и совместное восстановление.

Особое значение имеют работы Г. И. Чуфарова с сотрудниками. Они изучали весьма актуальные проблемы кинетики процессов восстановления.

В своих работах о восстановлении окислов железа газообразными восстановителями [33], о начальных скоростях восстановления гематита и магнетита [34] и о сравнении начальных скоростей реакции между окислами железа и водородом, окисью углерода и их смесями [35] Г. И. Чуфаров с сотрудниками пришел к выводу, что процесс восстановления имеет автокаталитический характер. Реакции взаимодействия восстановителя с окислом при их соприкосновении не начинаются мгновенно, а лишь по истечении некоторого времени; после начала реакции развиваются с повышающейся скоростью до своего максимума,

затем скорость восстановления замедляется в связи с понижением концентрации восстановителя.

Начальной стадией процесса восстановления авторы считают адсорбцию газа-восстановителя на поверхности окислов. Экспериментально было установлено, что автокатализ имеет место после того, как окись железа перейдет в магнитную окись. Для окиси железа наибольшая скорость восстановления наблюдается после того, как отнято 50—55% всего кислорода, для магнитной окиси — 30—40%.

При различных температурах скорость восстановления окиси железа водородом резко различна. От 300 до 400° восстановление во времени протекает равномерно, при 500° первые 30 мин. идет с ускорением до максимума, который поддерживается в течение последующих 40 мин., после чего резко падает.

При 600, 700 и 800° максимум достигается через 25—30 мин., затем наблюдается снижение восстановимости (более резкое при температуре 600—700° и менее резкое при 800°) в связи с процессом спекания и уменьшения пористости. С дальнейшим повышением температуры происходит увеличение скорости восстановления; при 900° максимум достигается через 15 мин.

Длительное время в металлургии существовали две точки зрения по вопросу о том, что же является катализатором реакции распада окиси углерода: металлическое железо или закись железа. Г. И. Чуфаров и А. Н. Куликов своей работой о катализаторах для реакции разложения окиси углерода на углекислоту и углерод [36] окончательно установили, что таким катализатором является только металлическое железо. Выдерживая длительное время при температуре 600—625° закись железа в нейтральной газовой смеси CO и CO₂ (когда не могло происходить восстановления FeO до Fe), они не обнаружили распада окиси углерода на углекислоту и углерод.

При взаимодействии же губчатого железа с окисью углерода при 500° происходило весьма интенсивно выделение сажистого углерода.

Большой интерес представляют работы Г. И. Чуфарова с Е. П. Татиевской [37] и Г. И. Чуфарова [38] по изучению отложения сажистого углерода в рудах и влияния его на процессы восстановления. Гематитовые руды, красные железняки, бурые железняки, богатые мартиты могут пропитываться углеродом, не пропитываются только плотные магнетитовые руды. Поэтому гематитовые руды очень быстро восстанавливаются сажистым углеродом, тогда как магнетитовые медленно. Так, например, железный блеск, пропитанный сажистым углеродом, при 1000° восстанавливался в течение 10—15 мин., при 1200° — 5 мин., и при 1500° полное восстановление происходило всего лишь за 2 мин.

Тот же железный блеск, смешанный с древесным углем, восстанавливался при тех же условиях во много раз медленнее.

Различное поведение руд под воздействием сажистого углерода авторы объясняют тем, что в гематитовых рудах при умеренных температурах (500°) в неравновесных условиях возникают две реакционные зоны: $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ и $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}$. Первая зона, продвигаясь быстрее в глубь куска руды, создает высокую ультра- и микропористость слоя, состоящего из Fe_3O_4 . Проникающая в этот слой окись углерода, разлагаясь в присутствии образующегося металлического железа, выделяет сажистый углерод, который воздействует в объеме на кусок руды.

В магнетитовой руде при низких температурах имеется одна реакционная зона $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}$, которая приводит к тому, что отложение сажистого углерода происходит только на поверхности куска руды и в порах его; тончайшие же ультра- и микропоры образоваться не могут.

В заключение необходимо остановиться на работах Г. И. Чуфарова с Е. П. Татиевской [39] и Г. И. Чуфарова и В. Д. Авербух, не относящихся непосредственно к восстановлению окислов железа, но имеющих весьма важное значение для понимания кинетики процессов восстановления окислов металлов, в том числе и железа. В первой из этих работ авторы экспериментально установили, что закись и окись меди, имея резко различную упругость диссоциации (в миллионы раз), обладают примерно одинаковой скоростью восстановления. Во второй работе исследователи нашли, что окись серебра восстанавливается до металла при 50° в газовой смеси с парциальными давлениями водорода и кислорода, равными 380 мм, тогда как упругость диссоциации при 50° составляет только 1,42 мм.

В свете этих работ представляется несостоятельной попытка А. П. Любана [40] представить процесс восстановления окислов только как «процесс, состоящий из двух отдельных химических превращений: диссоциации окислов и соединения восстановителя с выделившимся в результате диссоциации кислородом», где «для осуществления непрерывной диссоциации окисла необходимо в окружающей окисел атмосфере все время поддерживать с помощью восстановителя (в этом и заключается его роль) парциальное давление кислорода ниже вполне определенной величины, которая не зависит от характера восстановителя».

П. В. Гельд и О. А. Есин [41] вполне справедливо критиковали эти положения А. П. Любана, так как механизм процессов восстановления не может объясняться только использованием равновесных термодинамических данных. Как показали исследования А. С. Тумарева, упругость диссоциации окислов не является единственным фактором, определяющим температуру начала восста-

новления окислов и возможность возникновения реального процесса. А. С. Тумарев, изучая температуру начала химического взаимодействия окислов с восстановителями, установил (табл. 1), что начало реакции больше зависит от свойств восстановителя, чем от природы окисла.

Таблица 1

Температура начала химического взаимодействия окислов с восстановителями

Восстановители Окислы	Mg	Mg ₂ Si	Si	Al
CaO	557	575	998	1048
Fe ₂ O ₃	557	630	1018	1058
SiO ₂	567	672	—	—
Среднее ...	560	626	1008	1053

В процессе восстановления происходит взаимодействие всех газообразных и твердых веществ между собой. Это взаимодействие как газообразных веществ с твердыми, так и твердых с твердыми приводит в разных условиях к различному течению процесса. Вполне понятно, что газ-восстановитель не только понижает парциальное давление кислорода в процессе восстановления, но и активно участвует в нем, не ожидая, пока окисел диссоциирует и освободит кислород. В противном случае потребовались бы долгие годы, как это показали расчетом для закиси железа П. В. Гельд и О. А. Есин ($8,65 \cdot 10^5$ лет) и А. С. Тумарев (получивший по формуле Я. И. Френкеля $9,3 \cdot 10^6$ лет).

Теория Г. И. Чуфарова о механизме процесса восстановления твердых окислов газообразными восстановителями (СО и Н₂) предполагает, что первоначально происходит адсорбция восстановителя на поверхности окисла, затем реакция его с поверхностными атомами кислорода окисла и последующим образованием адсорбированного продукта и десорбцией его. Таким образом, эта теория является шагом вперед в изучении процессов восстановления во всем их комплексе.

Ранее уже отмечалось, что посторонние примеси (пустая порода) в железных рудах меняют ход процессов восстановления, так как окислы пустой породы в разных стадиях восстановления взаимодействуют с окислами железа. Это взаимодействие может быть различным в зависимости от степени окисления железа. В

доменной печи процессы восстановления неизбежно протекают при взаимодействии окислов железа с окислами пустой породы руды. Поэтому особенно интересной является последняя работа А. С. Тумарева по изучению восстановления элементов из сложных химических соединений. Практический интерес представляет часть работы, посвященная изучению системы окислов: $MgO - Fe_2O_3$ и $CaO - Fe_2O_3$.

При изучении системы $MgO - Fe_2O_3$ были взяты чистые MgO и Fe_2O_3 , предварительно прокаленные при 1000° и смешанные в соотношении, соответствующем соединению $MgO \cdot Fe_2O_3$. Смесь тщательно перемешивалась в порошке. Часть такой смеси исследовалась в виде $Fe_2O_3 + MgO$, а часть в виде $Fe_2O_3 \cdot MgO$.

$Fe_2O_3 \cdot MgO$ получалась прокаливанием в течение 8 час. при 1200° . Восстановление велось при температурах 800 и 1000° .

При 800° обнаружилось различие свойств прокаленных и непрокаленных смесей окиси железа с окисью магния. Восстановление смеси $MgO + Fe_2O_3$ проходило через три ступени, так же как и восстановление чистой окиси железа. При этой температуре влияния магнезии еще не могло сказаться. При восстановлении же смеси $MgO \cdot Fe_2O_3$ было обнаружено только две стадии. В первой стадии происходило восстановление окиси железа непосредственно до закиси железа, ступень магнитной окиси выпала. Во второй стадии вместо горизонтального участка, соответствующего восстановлению закиси железа, линия содержания CO_2 этого периода восстановления имеет наклон.

При 1000° различие в процессе восстановления прокаленных и непрокаленных смесей окиси железа и окиси магния сглаживается. Из этого можно сделать вывод, что при этой температуре наступает химическое взаимодействие окислов железа и магния и восстановлению подвергается продукт их взаимодействия.

Исследования показали принципиальное отличие в процессе восстановления соединения $MgO \cdot Fe_2O_3$ от смеси $MgO + Fe_2O_3$.

При исследовании системы $CaO - Fe_2O_3$ были взяты также чистые окислы в молекулярном соотношении 1 : 1. Испытывалась как простая смесь $CaO + Fe_2O_3$, так и смесь, полученная путем прокаливания в порошке углекислого кальция с окисью железа в течение 5 час. при температуре $1240-1260^\circ$.

Восстановление тщательно перемешанной смеси извести с окисью железа производилось при температурах 800, 900, 1000° . При 800° влияние извести на процесс восстановления не было обнаружено; восстановление протекало в три стадии, соответствующие трем стадиям восстановления чистой окиси железа. При 900° влияние извести было обнаружено тем, что участок кривой, соответствующий стадии восстановления магнитной окиси желе-

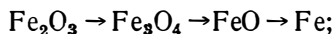
за, стал наклонным. Твердая фаза, восстанавливающаяся в этот период, изменяла в некотором интервале свой состав. При 1000° стадия восстановления магнитной окиси железа не была обнаружена. Горизонтальный участок отсутствовал, и вместо него появилась наклонная линия, что свидетельствовало о том, что вместо магнитной окиси железа восстанавливалась фаза переменного состава. Участок линии, соответствующий третьей стадии восстановления, также приобрел слабый наклон, связанный с растворимостью извести в закиси железа.

Восстановление прокаленных смесей производилось при температурах 800 и 1000°, и в обоих случаях отсутствовал горизонтальный участок, соответствующий восстановлению магнитной окиси железа. Кривые, полученные при 800 и 1000°, близки одна к другой. При 1000° восстановление прокаленных и непрокаленных смесей извести с окисью железа протекает одинаково; таким образом, исследования показали, что при этой температуре происходит взаимодействие извести с окисью железа в твердой фазе, изменяющее условия и результат процесса восстановления.

Исследования А. С. Тумарева с полной убедительностью доказали, что: 1) при нагревании окислы взаимодействуют между собой с образованием химических соединений, и этот процесс протекает одновременно с процессом восстановления, изменяя и усложняя его; 2) распадаются химических соединений на окислы не наблюдается.

Многочисленные лабораторные исследования позволили установить весьма важные факторы, связанные с процессами восстановления руд в доменной печи; они показали, что:

1) при восстановлении чистых окислов железа процесс восстановления имеет ступенчатый характер и протекает по стадиям:



при восстановлении же руд, в которых окислы железа занимают только преобладающее, но не единственное место, процессы восстановления видоизменяются и усложняются в зависимости от того, с какими окислами взаимодействуют окислы железа в процессе их восстановления, в этом случае обычная схема трехступенчатого восстановления оказывается неподходящей;

2) при длительном восстановлении, что имеет место в доменной печи, все руды имеют близкую восстановимость;

3) по сравнению с временем пребывания материалов в доменной печи восстановление руд протекает настолько быстро, что в реальных условиях печи имеется колоссальный резерв времени, и с этой точки зрения форсирование доменных печей имеет неограниченные возможности; ускорение хода доменных печей

задерживают газо-динамические условия работы их, но не процессы восстановления;

4) при высоких температурах восстановимость руд ухудшается в связи с химическими реакциями между окислами железа и окислами пустой породы руды, и восстановлению подвергаются продукты их взаимодействия.

Все лабораторные работы не могли, естественно, дать ответа на то, как действительно протекает процесс в реальных условиях доменной печи, где сочетаются не только все перечисленные факторы, но процессы восстановления усложняются сочетанием химических, физических и газо-динамических процессов, причем последние в доменной печи играют не менее важную роль, чем процессы химические и физические.

Такой ответ может быть получен только исследованием процессов восстановления непосредственно в доменной печи и тех условий, при которых такие процессы протекают.

ЗАВОДСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследований процессов восстановления непосредственно в доменной печи, в отличие от многочисленных лабораторных работ по восстановлению руд, было проведено очень мало. Объясняется это трудностью эксперимента в условиях действующей доменной печи и сложностью приспособлений и методики для таких исследований. Значительно больше изучался состав газа, его температура и давление на различных горизонтах доменных печей. Все заводские исследования, за исключением советских, проведены на малых и средних по мощности печах. Все же большой интерес представляют и такие исследования.

В 1868 г. Кулибин с сотрудниками провел исследование древесноугольной печи Райволовского завода¹. Печь была прямоугольного сечения, объемом 54,3 м³ и работала на холодном дутье.

Исследованиями было установлено различное содержание углекислоты в газе как на различных расстояниях по высоте печи, так и в различных точках на одном и том же горизонте в шахте печи.

На горизонте фурм в «фокусе горения» Кулибин отметил весьма высокую температуру — платиновая проволока расплавилась.

Исследования показали, что восстановление начинается в верхней части шахты и к распару достигает в среднем 34%.

На кусочках руды, вынутой из шахты, была видна осажденная сажа, образовавшаяся от распадаения окиси углерода. Разложение известняка к распару достигало 90%. В XIX в. были проведены исследования на старых печах с открытым колошником. К сожалению, эти работы имеют весьма существенные погрешности. Состав газа тогда определялся неправильно (недопоглощалась окись углерода), а температуры, приводимые исследователями, недостоверны. Измерение температур велось тогда в предположении, что пропорционально процентному соотно-

¹ Описано в Юбилейном сборнике Горного института, стр. 143 и у Н. Иосса в дополнении к «Металлургии чугуна», 1880, стр. 24—32 и 48—53.

шению примесей в сплавах меняется и температура плавления сплавов, что не соответствует действительности. Таким образом, не представляется возможным рассмотреть весьма интересные исследования старых печей, работавших с открытым колошником.

Оригинальное исследование, не потерявшее значения и до сих пор, впервые в России в 1891 г. провел М. А. Павлов [42]. Он изучал плавильный процесс доменных печей Климковского завода. Все исследование и многочисленные анализы были выполнены им лично. В результате проведенной работы автор составил первый в России тепловой баланс древесноугольной доменной печи и установил (вопреки мнению Грюнера), что оптимальным ходом доменной печи следует считать такой, в котором сочетаются в определенном соотношении прямое и не прямое восстановления. Это положение, выдвинутое М. А. Павловым еще в 1891 г., лежит теперь в основе теории и практики доменного производства.

Весьма подробные исследования состава газа, температуры его и давления были сделаны И. А. Соколовым [43] на древесноугольных доменных печах Урала в 1904—1908 гг. Исследовались печи с широким колошником, узким горном и ручной засыпкой материалов. В доменной печи № 3 Алапаевского завода пробы газа отбирались на четырех горизонтах в шахте.

Исследования показали, что различный по радиусу шахты состав газа является результатом применявшейся системы загрузки материалов и профиля и конструкции печи. И. А. Соколов пришел к ошибочному выводу об исключительно вертикальном движении руды в шахте доменной печи.

Максимуму углекислоты всегда соответствовал минимум температур, и наоборот. Автор пришел к заключению, что границей прямого и непрямого восстановления в древесноугольных печах является область температур 800°, так как, по его исследованиям, выше этой температуры углекислоты в газе почти не имеется. Следует отметить, что в распаре, по данным И. А. Соколова, была исключительно низкая температура (700°), что может быть объяснено только несовершенством применяемой им методики измерения температур.

Исследования И. А. Соколова показали, что состав газа в эллиптической печи Теплогорского завода на различных горизонтах заметно отличается от состава газа в круглой печи Алапаевского завода.

В 1910 г. Метц [44] изучал доменную печь объемом 342 м³, работавшую на рудах минетт и выплавляющую томасовский чугун. Время пребывания материалов в печи достигало 20 час. Одновременно с забором проб газа и измерением температур

впервые были взяты пробы материалов на различных горизонтах у кладки печи. Автор установил, что состав газа и температура его в период исследований резко колебались, что объяснялось неравномерностью хода печи. Углекислота наблюдалась в газе уже в верхней части заплечиков в довольно большом количестве (1,6 — 7,0%), постепенно повышаясь в верхней части шахты до 10—12%. В колошниковом газе содержание углекислоты составляло 11—12%. Температуры, указанные автором для нижней части шахты и заплечиков, весьма низки; так, в верхней части заплечиков температура колебалась от 690 до 885°, что явно не соответствует действительности и может быть объяснено несовершенством методики измерений.

В верхней части шахты содержание закиси железа достигало в среднем 22%, в середине шахты — 29% и в нижней части шахты — 42%, при очень низком содержании окиси железа — 1,8%. У автора отсутствуют данные по содержанию металлического железа в шахте, которое несомненно имелось при таком развитии восстановительного процесса. И лишь в одном случае автор приводит содержание металлического железа в нижней части шахты — 2,56% при отсутствии окиси железа и 54,41% закиси железа. В верхней части заплечиков содержание металлического железа указано в 13,3%, при отсутствии окиси железа и при 23,17% закиси железа.

Левин и Нидт [45] исследовали силезскую и рейнскую доменные печи с устаревшим профилем, узким горном и широким колошником, выплавлявшие томасовский чугуны. Ими в заплечиках также были определены низкие температуры (в силезской печи) — ниже 1000°, тогда как в этой области, несомненно, чугуны и шлак уже были в жидком состоянии. Состав газа указывает на появление углекислоты в заплечиках и постепенное увеличение ее до колошника.

Шлезингер [46] приводит также низкие температуры области заплечиков. В его исследованиях интерес представляет высокое отношение углекислоты к окиси углерода в газе на различных горизонтах печи; оно значительно превосходит теоретическое, установленное лабораторными исследованиями равновесия реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$.

Булле и Леннингс [47] изучали работу доменных печей с центральным и боковым отводом газа и установили, что состав газа по радиусу печи находится в прямой зависимости от системы загрузки, профиля и конструкции печи.

Исследования трехсоттонной американской печи, выплавлявшей литейный чугун из красного и бурого железняков и агломерированных пиритных огарков, провели Кини, Ройстер и Джозеф [48].

Исследования проводились по радиусу на четырех горизонтах в шахте доменной печи и показали, что у кладки и у оси печи наблюдается уменьшенное содержание углекислоты в газе, а максимум ее приходится на среднюю часть между периферией и осью. Для одного и того же горизонта (середина шахты) углекислота изменяется от 1,0 до 13,0%. Авторами показаны более высокие, по сравнению с приведенными ранее, температуры в нижней части шахты (в среднем около 900°).

На основании расчета исследователи пришли к выводу, что до распара восстанавливается 80% руды и остальные 20% — на пути от распара до горна. Следует отметить, что расчетный метод определения процессов восстановления, конечно, далек от действительного, так как невозможно определить все факторы, ускоряющие и тормозящие ход восстановительных процессов в реальных условиях работы доменной печи.

Оригинальная работа проведена Стокгольмской высшей горной школой [49]. Специально была построена маленькая опытная доменная печь, объемом 7,8 м³, оборудованная двумя фурмами и работавшая с давлением дутья 45 мм рт. ст. и температурой 200°. Печь проплавляла на древесном угле магнитный железняк, сильно кремнеземистый (30% SiO₂), содержащий 47% железа. В период работы печи были измерены температуры на различных горизонтах от колошника до горна. В нижней части шахты и в распаре температура оказалась высокой — 1400°, тогда как в горне явно преуменьшенной — в окислительной зоне горна всего лишь 1525°. Чтобы установить картину всех процессов, протекающих в действующей доменной печи, печь на полном ходу остановили, замазали все щели и после 43-дневного охлаждения весь материал разобрали и подвергли анализу.

Следует, однако, отметить, что остановка и охлаждение печи исказили действительную картину происходящих в ней процессов. После остановки тепло из нижних горизонтов печи медленно передавалось вышележащему слою шихты и, таким образом, в течение некоторого времени температура поднималась по высоте, процессы восстановления и плавления (хотя и в слабой мере) передвинулись в верхние горизонты и изменили то состояние, которое действительно имеет место в непрерывно действующей печи. А затем вследствие потери тепла в окружающее пространство печь медленно остывала, зона высоких температур сокращалась, и весь материал в печи превратился в застывшую массу. Несмотря на такое искажение, полученные опытные данные все же представляют некоторый интерес.

Исследования показали, что процессы восстановления начинаются непосредственно у поверхности колошника; вслед за появлением закиси железа появляется и металлическое железо,

при сравнительно низкой температуре — 350°. В верхней части шахты заканчивается восстановление магнитной окиси и остаются только закись железа и металлическое железо.

В интервале температур 900—1000° обнаружено замедление процессов восстановления, связанное со спеканием руды и началом шлакообразования. В нижней части шахты при температуре 1200° заканчивается восстановление закиси железа — железо находится в виде металлического и частично силиката железа, который начинает образовываться при температуре около 1000°. В связи с растворением в шлаке извести при 1075° появляется двойной силикат. Выше 1200° начинается энергичное восстановление силиката железа, заканчивающееся только в горне. При 1325° заканчивается поглощение кремнезема двойным силикатом. Известняк разлагается до конца в середине шахты при температуре 1000°. Свободная известь сохраняется до самого горна. Таким образом, шлак окончательно формируется в горне.

В 1928 г. американским Горным бюро были проведены исследования на большой семисоттонной печи [50]. При исследовании были измерены скорости движения материалов и газов в различных точках по сечению печи. Скорость движения газов определялась при помощи трубки Пито, не дающей надежных результатов для таких измерений. Измерения на уровне засыпи показали, что скорость движения материалов над чугунной леткой является максимальной — 80,3 мм/мин, в центре минимальной — 53,3 мм/мин и над шлаковой леткой — 74,2 мм/мин. Таким образом, было установлено, что движение шихты в печи не является однородным.

Измерение температур, статического давления газов, скоростного напора и определение состава газа производились по радиусу с одной стороны на четырех горизонтах в шахте печи.

Исследователи допустили большую ошибку, считая, что достаточно определить состав газа и измерить температуры и давления с одной стороны, по радиусу, так как противоположная сторона является, по их мнению, ее зеркальным отражением. Более поздние исследования доменной печи № 1 Магнитогорского завода показали, что такое представление ошибочно. По окружности печи в равноудаленных точках по радиусу как состав газа, так и температуры резко различны.

Скорость газа под уровнем засыпи, по этим исследованиям, колебалась от 22,6 м/сек у периферии до 133,8 м/сек в центре печи. В нижней части шахты скорость движения газа у периферии составила 38,1 м/сек, на расстоянии полуметра от периферии падала до 14,1 м/сек и у оси печи увеличивалась до 52,2 м/сек. Высокая скорость у периферии и у оси и низкая в

промежуточной части является следствием распределения материалов аппаратом Парри и свидетельствует о наличии периферийного и центрального движения газов в исследованной доменной печи. Справедливо замечание автора о том, что установленное Беллом отношение $\text{CO} : \text{CO}_2 = 2$ в современных печах нарушено, это отношение в исследованиях Кини в колошниковом газе равнялось 1,69, а в некоторых местах печи опускалось до 1,29.

Состав газа на различных горизонтах доменной печи указывает на зависимость его от способа загрузки сырых материалов на колошнике. Содержание углекислоты по радиусу ниже уровня засыпи колеблется от 6,5 до 17%, при содержании ее в колошниковом газе 14,7%. Минимум углекислоты приходится на периферийную и осевую части печи на те области, куда попадает меньше руды. В середине шахты у периферии находится 3% углекислоты, в точке, отстоящей от периферии на 686 мм, содержание ее поднимается до 16% и затем падает к оси до 8%.

В нижней части шахты содержание углекислоты в газе колеблется от 1,0 до 10%, минимум находится у периферии и у оси. Особо следует отметить, что температура в нижней части шахты достигает 1000° и при этом в газе присутствует около 10% CO_2 . В исследованиях Кини приведенные им температуры на различных горизонтах в шахте находятся в противоречии с составом газа. Максимум углекислоты всегда приходится на ту область, где больше всего имеется руды; вполне естественно, что физическая работа газов по отдаче тепла там должна быть максимальной и температуры минимальными. Где наблюдается максимум углекислоты, должен быть минимум температуры, и наоборот. У исследователя же максимальному содержанию углекислоты в газе соответствуют во многих точках по радиусу на всех горизонтах максимальные температуры.

На основании своих исследований Кини рассчитал, что только 24,4% кислорода, связанного в окись железа, удаляются в шахте (выше 4-го горизонта), остальные 75,6% удаляются в распаре, заплечиках и горне. Такое представление о развитии процессов восстановления в доменной печи не имеет ничего общего с действительностью.

В немецких заводских исследованиях, за исключением исследования Метца, изучались только состав газа и температуры на различных горизонтах доменных печей. Процессы восстановления непосредственно не рассматривались. Брались преимущественно печи небольших размеров устаревших конструкций и с несовершенным профилем, что, несомненно, накладывало свой отпечаток на результаты исследований. Поэтому немецкие работы не имеют большой ценности для выяснения сущности процессов, протекающих в мощных доменных печах.

В американских исследованиях, проведенных в семисоттонной печи с современным профилем, процессы восстановления непосредственному изучению также не подвергались, полученные же данные по составу газа и температурам на различных горизонтах находятся в противоречии между собою, и поэтому ценность их значительно снижается.

Некоторый интерес представляют исследования процессов восстановления и плавления, проведенные Стокгольмской высшей горной школой [49], но чрезмерно малые размеры печи (7,8 м³) и искаженные остановкой и охлаждением результаты исследований не могли дать ясного представления о действительном развитии процессов в современных мощных доменных печах.

Таким образом, заграничные заводские работы дали сравнительно мало материалов для понимания того, как протекают процессы в мощных печах.

В 1934 г. изучением доменной печи № 1 Магнитогорского завода, проведенным с нашим участием, было положено начало советским исследованиям больших доменных печей. В дальнейшем число таких исследований увеличилось, и к настоящему моменту по масштабам и по значимости полученных результатов они оставляют позади себя заграничные исследования.

На Магнитогорском заводе в 1934 г. [51] были получены первые данные о составе газа, давлении и температуре его по радиусу на различных горизонтах доменной печи. Было установлено, что состав газа и температуры на разных горизонтах в шахте доменной печи в значительной степени разнятся как в радиальном направлении, так и по периферии печи.

Поток газов движется преимущественно по периферии и у оси шахты, вследствие того, что вершина гребня руды отходит от кладки шахты, а к оси руды попадает мало. Поэтому на всех горизонтах у периферии и у оси печи содержание углекислоты в газе минимальное, соответственно в этих областях — максимальные температуры.

В 1935 г. на той же печи Я. М. Гольмшток [52] продолжил исследования состава газа, давления его и температуры на двух горизонтах в шахте и в распаре. Была установлена такая же неравномерность в составе газа по окружности и по радиусу, как и в 1934 г. На верхнем горизонте под уровнем насыпи у периферии было около 13% CO₂, у оси — 10%, а в промежуточной части — около 18%, при содержании в колошниковом газе 13,5% CO₂. Кривая содержания CO является зеркальным отражением кривой CO₂, в сумме они составляют около 41%. Температура в различных точках сечения шахты изменяется весьма резко — от 125 до 700°; статическое давление от 175 до 190 мм рт ст.

В середине шахты сохраняется та же закономерность в изменении состава газа и температуры по сечению печи. У периферии углекислоты всего лишь около 4%, у оси около 5%, тогда как в промежуточной части максимум ее достигает 15%. Соответственно углекислоте изменяется и окись углерода. Температура у периферии с северной стороны 900°, а с южной — 1235°, в промежуточной части между периферией и осью она снижается до 525°, у оси — 800°. Статическое давление колеблется около 400 мм рт. ст.

В распаре сохраняется такое же большое различие в составе газа как по радиусу, так и по окружности. У периферии содержание углекислоты составляет 0,8%, в промежуточной части между периферией и осью поднимается до 5,8% и у оси снижается до нуля, соответственно и температура изменяется от 1050° у периферии до 775° в промежуточной части, поднимаясь у оси до 1275°. Такая высокая температура (1275°) остается почти во всех точках по радиусу с южной стороны, где и содержание углекислоты в газе близко к нулю. Статическое давление в распаре колеблется около 640 мм рт. ст.

Попутно при исследовании Я. М. Гольмшток извлекал из распара пробы чугуна и шлака; шлаки наблюдались как мало-железистые (0,65% FeO), так и с повышенным содержанием закиси железа (7,33% FeO).

Аналогичное исследование в том же году провел В. Т. Басов [53] на доменной печи № 4 Кузнецкого завода. В результате было установлено, что при исправно работающем засыпном аппарате (чего не было в период исследований на Магнитогорском заводе) состав газа и температура различны по радиусу, но почти одинаковы по окружности печи. Состав газа по радиусу от периферии до оси близок к составу газа, полученному на Магнитогорском заводе.

В 1936 г. Я. М. Гольмшток и М. М. Лейбович [54], продолжая исследования доменной печи № 1 Магнитогорского завода, изучали ход процессов восстановления и шлакообразования по пробам материалов, извлеченным преимущественно из распара. Из средней части шахты было извлечено мало проб материалов.

Исследования показали, что восстановление весьма интенсивно протекает в середине шахты, где в среднем степень его достигает 38%, по радиусу восстановление колеблется от 10,2 до 67,8% в зависимости от температур, различных в разных точках сечения печи. Рудная мелочь значительно больше восстановлена, чем куски. В распаре степень восстановления достигает в среднем 59%, колеблясь от 22,3 до 86%, также в зависимости от температурных условий.

Пробы чугуна, извлекавшиеся из распара, весьма различны по своему составу.

Авторы исследования предполагают, что содержание кремния в пробах, вследствие возможных включений пустой породы и шлака, указано преувеличенным. В хорошо отобранных пробах содержание кремния составляло 0,20, 0,28, 0,39%.

Содержание марганца в чугунах из распара было более высоким; оно колебалось от 0,28 до 1,80%, в большинстве анализов превышало 1%. Содержание углерода изменялось от 1,68 до 4,15%.

Пробы шлака, взятые у периферии из распара, показывают, что в области распара шлак преимущественно маложелезистый (1—2% FeO), с повышенным содержанием закиси марганца (до 8—9%). По остальным составляющим шлак близок к конечному шлаку, так как соотношение между SiO_2 и Al_2O_3 в золе кузнечного кокса почти такое же, как и в магнитогорской руде. Авторы исследования пришли к выводу, что жидкотекучесть магнитогорских шлаков в области распара связана с повышенным содержанием закиси марганца в них, и поэтому работа на более магниезальных шлаках (без высокого содержания закиси марганца) может повысить подвижность шлаков в распаре.

В связи с этим М. М. Лейбович [55] в 1937 г. провел на той же печи Магнитогорского завода исследование влияния повышенного нагрева дутья и добавки в шихту магниезального известняка на ход процессов шлакообразования в нижней части шахты и в распаре. Он установил (в отличие от исследований 1936 г.), что в нижней части шахты и в распаре содержание закиси железа в шлаках резко колеблется: оно изменяется от 1,9 до 24,3% в нижней части шахты и от 0,4 до 36,5% в распаре. Исследования показали, что повышение температуры дутья уменьшает содержание суммы закиси марганца и закиси железа в области шлакообразования. При нагреве дутья до 450° сумма $\text{MnO} + \text{FeO}$ составляла $7,1 + 11,4 = 18,5\%$, а при 600° только $6,1 + 6,2 = 12,3\%$. Применение магниезального известняка привело к увеличению содержания магнезии в первичных шлаках.

В 1937 г. была опубликована статья Л. М. Цилева и Н. Е. Новоселова [56] об исследовании работы шахты доменной печи № 1 Новолипецкого завода. В шихту поступало 70% бурого железняка и 30% криворожской руды. Исследования показали, что в области шлакообразования получается железистый шлак, в котором содержание закиси железа изменяется в пределах 17,3—27,9%. В связи с резко периферийным потоком газов

температура в нижней части шихты достигала 1200° , и поэтому зона шлакообразования находилась в середине шахты.

В результате исследований больших доменных печей, в Советском Союзе в 1934—1937 гг., был получен подробный материал о составе газа, давлении его и распределении температур по радиусу на различных горизонтах, но процессы восстановления, плавления и шлакообразования не были освещены с достаточной полнотой. Поэтому нами в 1937 г. было принято детальное исследование процессов восстановления и шлакообразования на доменной печи № 1 Магнитогорского завода и в 1938 г. на доменной печи № 3 Запорожстали, с одновременным изучением состава газа, давления его и температур на различных горизонтах по радиусу печей. Результаты наших исследований должны были показать особенности магнитогорской и криворожской руд в процессе их восстановления непосредственно в мощных доменных печах и выявить влияние на эти процессы состава пустой породы руд.

ГЛАВА 4

ИЗУЧЕНИЕ ХОДА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 1 МАГНИТОГОРСКОГО ЗАВОДА

При капитальном ремонте доменной печи № 1 летом 1937 г. для исследований были проделаны отверстия в кожухе и кладке и установлены площадки на трех горизонтах в шахте, а также в распаре и заплечиках. В шахте отверстия были расположены под уровнем засыпи материалов, в средней части и в нижней — несколько выше распара. Над осями воздушных фурм и от верхней кромки кладки отверстия располагались на расстояниях:

	От оси воздушных фурм, мм	От верхней кромки кладки мм
Верх шахты — 1-й горизонт . . .	20 140	3 842
Середина » — 2-й » . . .	13 829	10 153
Низ » — 3-й » . . .	7 659	16 323
Распар	5 169	18 813
Заплечики	1 363	21 690

Расстояние между горизонтами: 1-м и 2-м — 6314 мм; 2-м и 3-м — 6170 мм, 3-м и распаром — 2490 мм, распаром и осями фурм — 5169 мм.

В заплечиках, несмотря на весьма важное значение их для изучения хода процессов восстановления, исследования, к сожалению, не производились, так как примитивное устройство (задвигка Лудло) не позволило пользоваться отверстиями на ходу печи. Исследования заключались в заборе проб материалов (руд, кокса, шлака, чугуна, известняка или извести), измерении температур и определении состава газа и давления его по радиусу от периферии к оси печи.

Пробы материалов (из всех горизонтов, кроме горна) при извлечении из печи охлаждались в заборной трубке в восстановительной атмосфере в патрубке с наружной стороны за задвигкой, для чего задвигка закрывалась неплотно, и газ из печи в небольших количествах поступал в пространство, где

охлаждались взятые пробы. От проникновения наружного воздуха предохраняли плотно набитые сальники между трубкой, в которой помещалась проба, и патрубком. С наружной стороны патрубков и задвижка поливались водой для быстрейшего остывания проб. Охлажденные до нормальной температуры (наружного воздуха) пробы материалов тщательно рассортировывались на составные части (руду, шлак, кокс, чугун, известь) и подвергались химическому анализу.

На рис. 1 изображен профиль печи, на которой проводились исследования. Площадки для исследования были оборудованы на всех горизонтах. На площадках были установлены ручные полутонные лебедки для ввода трубок в печь и вывода их обратно.

На рис. 2 показано устройство затвора у отверстий в шахте доменной печи. Сконструированная задвижка оказалась вполне пригодной для исследовательских целей. Сальниковая набивка из шнурового асбеста предохраняла от продувания газа в период исследований. Железная труба ставилась не на всю толщину кладки, а только на половину ее, с тем, чтобы разгар кладки шахты не привел к смятию трубы.

Для забора проб газа и материалов и измерения температур применялись специально сконструированные трубки, охлаждаемые водой. Вода подавалась от насоса с давлением в 4 ат. Трубки для устранения засорения их в момент ввода в печь продувались воздухом с давлением 6 ат от компрессора.

Для отбора проб газа из шахты печи применялась полутоннорадиймовая трубка. Вода подавалась в нее двумя трубками

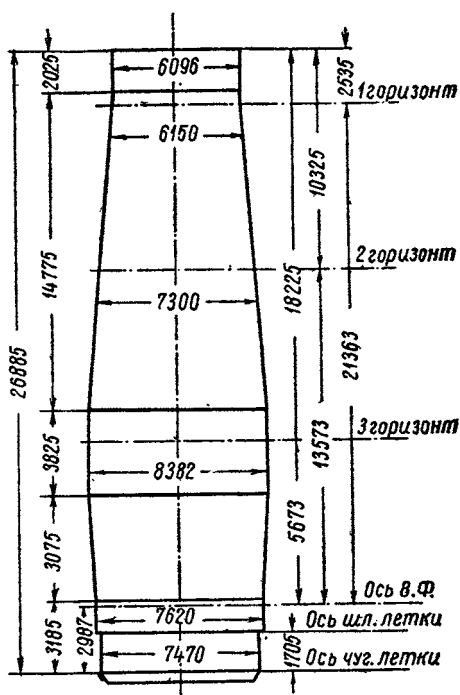


Рис. 1. Профиль доменной печи № 1 Магнитогорского завода с указанием горизонтов исследования

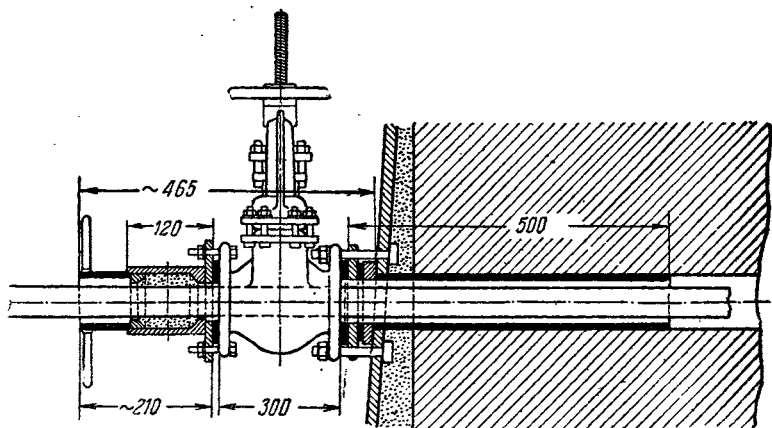


Рис. 2. Устройство затвора у отверстий в шахте доменной печи

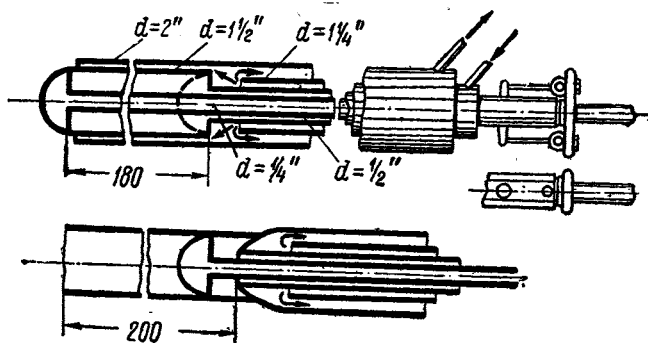


Рис. 3. Трубка для отбора проб материалов из различных точек сечения шахт

диаметром $\frac{1}{4}$ дюйма, доводилась до сварного переднего носка трубки и отводилась через наружную трубку.

Для отбора проб газа была поставлена третья трубка диаметром также $\frac{1}{4}$ дюйма, приваренная на обоих концах к наружной трубе. Для измерения температур применялась аналогичная по конструкции трубка, с той лишь разницей, что вода подводилась одной $\frac{1}{4}$ -дюймовой трубкой, а термопара в железном чехле проходила через трубку $\frac{1}{2}$ дюйма, приваренную к обоим концам наружной $1\frac{1}{2}$ -дюймовой трубки.

Термопара выдвигалась на 100 мм из охлаждаемой водой трубки, чтобы устранить влияние ее на горячий спай термопары. Температуры измерялись в шахте нихром-константановой и хромель-алюмелевой термопарами и в распаре — платина-платинородиевой термопарой.

Пробы материалов отбирались трубкой, изображенной на рис. 3. Верхний чертеж представляет трубку при вводе ее в печь, нижний — в момент взятия пробы в намеченной точке.

В период исследований доменная печь проплавляла руды горы Магнитной — мартиты и полумартиты. В табл. 2 приведены среднemesячные анализы руд.

Таблица 2

Среднemesячный анализ руды (%)

	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	Потери при проанализировании	H ₂ O	Mn
Сентябрь . .	59,15	6,75	4,45	0,75	0,25	0,030	0,025	2,95	7,20	0,13
Октябрь . .	58,30	7,15	4,95	1,05	0,40	0,025	0,030	3,30	6,70	0,12

Хотя среднemesячные анализы показывают небольшие колебания по содержанию железа и составляющих пустой породы, но из суточных анализов видно, что содержание железа и глинозема в руде резко колебалось.

Непостоянство по химическому составу сопровождалось непостоянством и по физическому состоянию; в руде было очень много мелочи, что приводило к высокому расходу руды — до 2,4. Почти треть руды выносилась. Вынос пыли в процентах от веса чугуна составлял: в сентябре — 68,5, в октябре — 89,6. Громадный и переменный вынос пыли часто нарушал нормальную работу печи. Рудная часть колоши колебалась от 10 000 до 15 000 кг при 6000 кг кокса. В связи с переменным выносом печь выплавляла горячие передельные чугуны; в среднем чугун

содержал 1,14% Si и 2,2% Mn. Шлак в период исследований был следующего состава (в %):

SiO ₂ . . .	36,07	MnO . . .	3,32
Al ₂ O ₃ . . .	19,45	FeO . . .	1,0
CaO . . .	34,80	S . . .	0,9
MgO . . .	4,65		

Количество дутья колебалось и составляло до 3400 м³/мин при нагреве около 450°. Давление дутья изменялось от 1,45 до 1,6 *ати*. Производительность печи и расход кокса указаны в табл. 3.

Таблица 3

Производительность печи и расход материалов

	Сентябрь	Октябрь
Среднесуточная производительность, т	1390	1268
Расход на единицу чугуна:		
кокса	0,98	1,01
железной руды	2,13	2,40
известняка	0,25	0,23

Известняк, применявшийся в качестве флюса, содержал 1—2% нерастворимого остатка; потери при прокаливании составляли 43—44%. Кокс — местного производства из привозных кузнецких коксующихся углей. Содержание золы в нем колебалось от 12,33 до 13,57% и серы — от 0,52 до 0,56%, при барабанной пробе около 290 кг.

Идеальными условиями исследований являются такие, при которых можно одновременно взять пробы материалов и газов и произвести измерения температур на всех горизонтах печи от колошника до горна. Но, к сожалению, такие условия вследствие экспериментальных трудностей создать почти невозможно. Поэтому в исследованиях подобного рода приходится ограничиваться таким числом проб, которые, при установившемся ходе печи и работе ее на сырых материалах примерно одинакового состава и выплавке определенного сорта чугуна

могут характеризовать и отображать по температурам и составу газа и материалов развитие процессов как на различных горизонтах доменной печи, так и на одном и том же горизонте, но в разноудаленных точках по радиусу. И в наших исследованиях одновременное взятие проб на различных горизонтах осуществлялось редко, но это, в силу только что сказанного, не может очень исказить результатов исследований, тем более, что все исследование проводилось в двухмесячный период и взятие проб материалов на различных горизонтах или совпадало или чередовалось между собой.

Большие расхождения в составе отдельных проб материалов наблюдаются главным образом на одном и том же горизонте, но в разноудаленных точках по радиусу. Это является результатом неравномерной работы газов в различных сечениях печи. Расхождения в отдельных пробах материалов, взятых в одних и тех же точках по радиусу, отображают неравномерность схода материалов и различные вследствие этого температурные условия для работы газов. Кроме того, и распределение газового потока в связи с неравномерностью схода материалов также меняется. В этих условиях весьма трудно вывести средний состав проб материалов для каждого горизонта печи. Приходится ограничиваться средним из всех проб, что не совсем точно отображает среднюю степень восстановимости на том или ином горизонте. Можно было бы вывести среднюю степень восстановимости расчетом по среднему составу газа, но такие расчеты дали бы результаты, далекие от истины. Состав газа известен (хоть он и изменяется в соответствии с колебаниями состава материалов), но количество его, проходящее в тех или иных точках по радиусу, неизвестно, и до сих пор не существует надежных методов измерений этого количества. Поэтому вычисление таким методом средней степени восстановимости руд на том или ином горизонте доменной печи приводит иногда к абсурдным результатам, примером чего являются расчеты Кини.

С нашей точки зрения, наиболее правильным, хотя и наиболее трудным, является путь исследований восстановимости руд отбором материалов непосредственно в доменной печи. Такие исследования дают наиболее достоверные результаты.

Первый горизонт

На первом горизонте, непосредственно под уровнем засыпи, производился забор проб материалов от периферии к оси по радиусу, измерение температур и забор проб газа. Средний

состав газа и средние температуры, по данным Я. М. Гольмштока, указаны на рис. 4 и в табл. 4.

Содержание углекислоты у периферии было наименьшим — 10%. На расстоянии 500 мм от кладки шахты количество ее

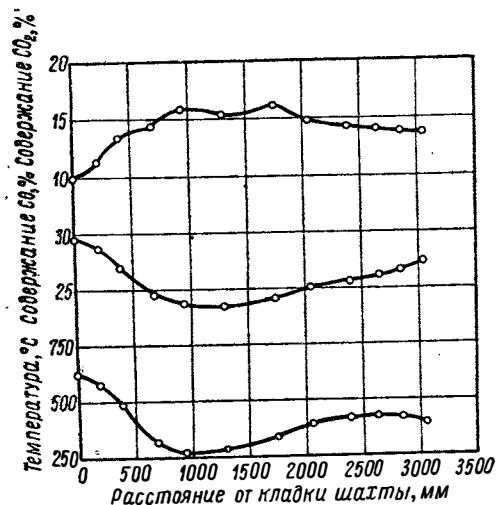


Рис. 4. Состав и температура газа на первом горизонте с северной стороны

возрастало до 14% и в кольце шириной в 700 мм (на расстоянии 1000—1700 мм) достигало своего максимума — 16%. Затем по направлению к оси печи количество углекислоты в газе начинало незначительно убывать.

В соответствии с кривой содержания углекислоты находится и кривая содержания окиси углерода. У периферии при минимальном содержании углекислоты в газе количество окиси углерода было максимальным, достигавшим 29,5%. На расстоянии 500 мм от кладки шахты содержание окиси углерода

уменьшалось и составило 26%. Минимальное содержание окиси углерода в газе — 23,5% — было установлено на расстоянии 1300 мм от кладки шахты. Затем к оси печи количество окиси углерода в газе несколько повышалось.

Температура на первом горизонте у периферии была максимальной — 620°; по направлению к оси печи она резко снижалась и на расстоянии 950 мм от кладки шахты составляла 270°. Минимальные температуры на этом расстоянии соответствуют максимальному содержанию углекислоты и минимальному содержанию окиси углерода в газе. Дальше по направлению к оси печи температура повышалась.

Пробы материалов, извлекавшиеся из печи на первом горизонте, состояли из руды, кокса и известняка. В пробозаборную грубку попадала преимущественно мелочь и кусочки величиной менее 50 мм. В табл. 5 приведен химический состав руды, загружаемой в печь, по величине кусков. Как видно из таблицы, мелкая руда содержала значительно меньше железа, чем кусковая.

Таблица 4

Состав и температура газа на первом горизонте
с северной стороны

Расстояние от кладки шахты мм	Содержание %		Темпе- ратура °С
	CO ₂	CO	
0	10,0	29,5	620
200	11,2	28,6	580
400	13,4	27,0	490
700	14,5	24,5	310
950	15,8	23,7	270
1300	15,4	23,5	280
1750	16,0	24,1	335
2050	14,8	25,0	390
2400	14,3	25,6	415
2650	14,0	26,1	425
2850	13,8	26,6	425
3050	13,6	27,3	400

Таблица 5

Состав руды, загружаемой в печь (%)

Размер кусков, мм	F _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Fe _{общ}
20—30	Нет	2,74	84,76	3,52	2,99	1,00	0,78	0,122	61,47
5—10	»	5,99	77,57	8,12	4,85	1,42	0,61	0,085	58,95
Мелочь	»	2,87	69,34	7,64	4,98	1,37	0,61	0,151	50,77
Среднее	Нет	3,83	77,22	6,43	4,27	1,26	0,66	0,117	57,06

Все пробы руд показывают, что уже на верхнем горизонте происходит восстановление руды и появляется даже некоторое количество металлического железа и довольно значительное количество закиси железа (табл. 6).

Химический состав проб руды с первого горизонта

(верхняя строчка указывает состав пробы при взятии, а нижняя — состав, пересчитанный на 100% после исключения углерода)

№ пробы	Расстояние от кладки, м.м.	Х и м и ч е с к и й с о с т а в, %												Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по количеству отнату кислорода, %		
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	C	P	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃			
Исходная руда 103	—	—	57,06	—	3,83	77,33	6,43	4,27	1,26	0,66	0,12	—	—	—	—	—	—	—	—
	0	—	—	2,84	39,80	20,30	11,40	8,0	5,50	1,50	6,90	4,02	0,23	—	—	—	—	—	—
		15,44	49,47	2,94	41,45	21,02	11,60	8,35	5,70	1,55	7,15	—	0,24	5,9	64,5	29,6	26,9	2,4	
111	500	22,80	54,98	Следы	7,41	70,37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
112	500	20,95	58,21	1,51	19,25	59,40	—	—	—	—	—	—	—	2,59	25,79	71,62	10,1	—	
110	650	—	—	2,55	40,33	35,25	7,60	4,30	2,40	2,30	6,90	3,34	0,12	—	—	—	—	—	—
		19,13	57,61	2,51	39,53	34,70	7,48	4,24	2,36	2,27	6,30	0,0	0,11	4,35	53,40	42,25	22,4	—	
105	1000	—	—	1,70	26,40	18,50	22,60	12,30	5,00	1,80	3,50	7,00	0,16	—	—	—	—	—	—
		12,33	38,35	1,85	28,70	20,13	24,60	13,35	5,44	1,96	3,80	0,0	0,17	4,82	57,40	37,78	23,5	—	
114	1000	25,97	62,37	0,0	6,50	81,84	5,04	—	—	—	—	—	—	0,0	8,14	91,86	1,5	—	
Куски 114	1000	21,68	55,97	0,75	17,21	59,69	7,10	—	—	—	—	—	—	1,34	24,00	74,66	8,4	—	
Мелочь 118	1500	20,40	49,23	0,0	6,11	63,52	9,16	—	—	—	—	—	—	0,0	9,68	90,32	2,1	—	
Куски 118	1500	—	—	0,75	18,12	57,28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Мелочь 109	1500	22,26	57,78	0,79	19,05	60,20	—	—	—	—	—	—	—	1,37	25,26	73,37	8,8	—	
Куски 110	1700	13,47	44,12	1,74	40,70	15,15	21,73	11,28	1,64	1,02	6,33	0,0	0,41	3,94	71,75	24,31	27,5	—	
Мелочь 1700	1700	—	—	3,69	49,20	12,10	11,40	13,80	6,00	1,55	3,00	—	0,13	—	—	—	—	—	—
		16,10	48,27	3,67	48,70	12,00	11,31	13,70	5,94	1,55	3,00	—	0,13	7,61	77,65	14,74	33,1	—	
Средний состав руды	...	19,07	52,60	1,43	24,96	45,28	—	—	—	—	—	—	—	2,7	37,0	60,3	13,8	—	

На рис. 5 приведен средний состав руды на первом горизонте. Из средних данных видно, что у периферии восстановление руд протекало в большей степени, чем в средней части, на

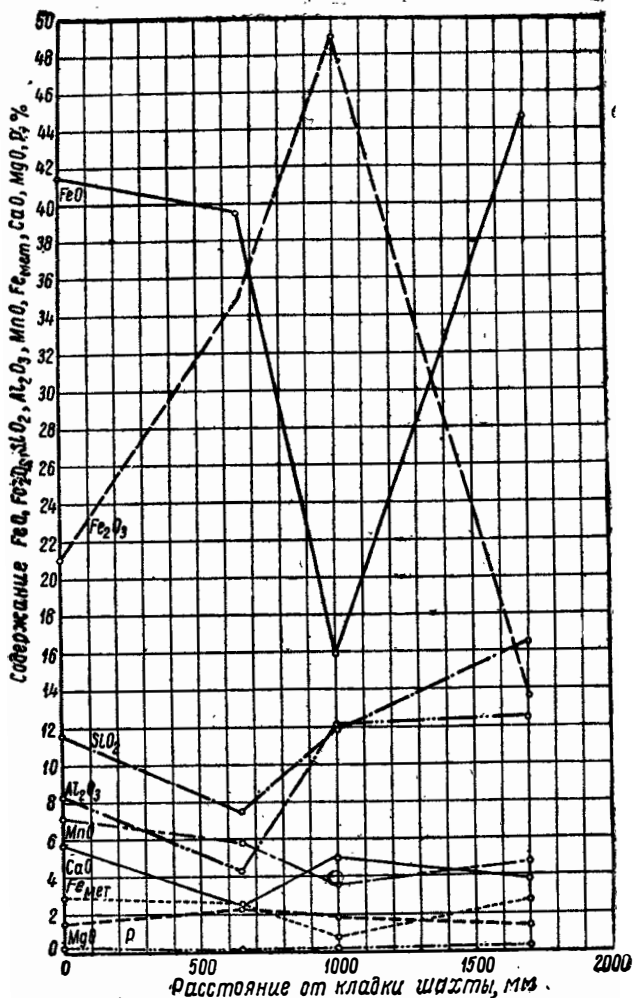


Рис. 5. Средний состав руды на первом горизонте

которую приходилось наибольшее количество руды; на расстоянии 1000 мм от кладки печи содержание закиси железа в рудах было минимальным, а окиси железа — максимальным. При температуре 275° (на расстоянии 1000 мм от кладки) в сред-

нем в пробах руды было 0,78% Fe_{мет}, 15,89% FeO и 48,93% Fe₂O₃, степень восстановления по отнятому кислороду составляла 8,4%. В отдельных пробах, взятых на этом расстоянии, степень восстановления колебалась от 1,5% (проба № 114) до 23,5% (проба № 105). Таким образом, можно считать установленным, что в доменной печи процесс восстановления начинается при температурах ниже 270°.

В периферийной части, где температура достигает 620°, процессы восстановления развиты в значительно большей степени. В пробе № 103 степень восстановления достигает 26,9%, в этой пробе Fe_{мет} — 5,9%, FeO уже 64,5% и Fe₂O₃ только 29,6%.

В среднем на первом горизонте находится (в %):

Железо металлическое	1,43
Закись железа	24,96
Окись железа	45,28
Железо общее	52,60

Относительное содержание железа (в %):

Металлическое	2,7
Закисное	37,0
Окисное	60,3

Степень восстановления по отнятому кислороду на первом горизонте составляет 13,8%.

При извлечении проб материалов в трубку попадала и рудная мелочь и куски руды; рудная мелочь, как это видно из анализов, в большей степени восстановлена, чем крупные куски.

В табл. 7 приведен состав кокса на первом горизонте, а в табл. 8 — состав известняка (по четырем горизонтам).

Таблица 7

Состав проб кокса

№ пробы	Расстояние от кладки шахты, м.м	Химический состав, %			
		зола	сера	летучие	углерод
102	0	16,70	0,55	2,35	80,95
113	500	17,80	—	—	—
101	650	16,95	0,31	0,80	80,95
116	1000	13,90	0,52	1,05	83,40
120	1500	13,15	0,58	0,50	84,60
107	1700	36,00	0,36	1,26	63,70
Средний анализ		19,08	0,46	1,19	78,36

Таблица 8

Состав проб известняка

№ пробы	Расстояние от кладки шахты, мм	Химический состав, %	
		потеря при прокаливании	сера
Первый горизонт			
106	1000	36,30	0,109
108	1700	31,90	0,033
Второй горизонт			
212	200	19,90	0,126
213	200	25,92	0,084
253	500	22,50	0,104
268	1000	23,26	0,220
Третий горизонт			
920	0,0	20,20	0,210
Четвертый горизонт—распар			
323	0,0	10,00	0,126
330	0,0	14,00	—

По содержанию серы в коксе можно отметить уже на первом горизонте некоторое удаление ее из кокса. Известняк в верхней части шахты подвергся частичному разложению.

Второй горизонт

Большой интерес, по сравнению с первым горизонтом, для изучения хода восстановления руды представляет второй горизонт, соответствующий середине высоты шахты, на котором также отбирались пробы газов и материалов и измерялись температуры. В табл. 9 приведен средний состав газа и в табл. 10 — средняя температура его на втором горизонте.

Таблица 9

Состав газа на втором горизонте с северной стороны

Расстояние от кладки шахты, мм	Содержание, %	
	CO ₂	CO
0	5,4	33,7
100	9,9	27,1
200	10,0	29,7
400	12,0	27,8
600	13,3	27,3
800	14,3	26,5
1000	17,6	23,6
1200	16,0	23,0
1500	15,0	24,0

Таблица 10

Температура газа на втором горизонте с северной стороны

Расстояние от кладки шахты, мм	Температура °С	Расстояние от кладки шахты, мм	Температура °С
0	980	350	840
50	995	450	835
100	925	550	770
150	925	750	760
250	920	950	750
300	860	1150	700

По этим данным были вычерчены кривые состава и температуры газа (рис. 6).

На втором горизонте, так же как и на первом, содержание углекислоты в газе у периферии было минимальным, всего лишь 5,4%, затем на расстоянии 200 мм от кладки оно увеличивалось до 10% и на расстоянии 1000 мм — до 17,6%. Далее,

по направлению к оси печи, количество углекислоты в газе уменьшалось.

В соответствии с кривой содержания углекислоты находится и кривая содержания окиси углерода в газе. Так, у перифе-

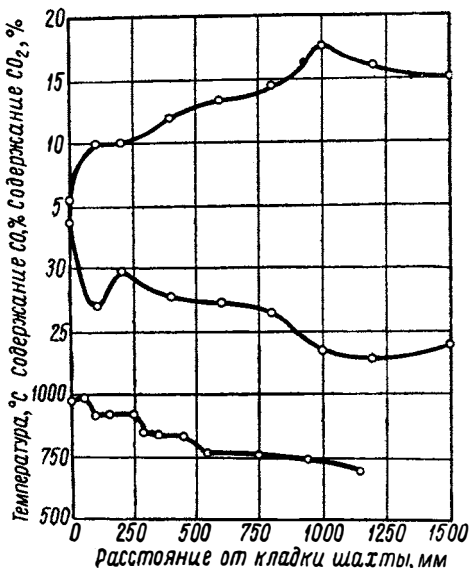


Рис. 6. Состав и температура газа на втором горизонте с северной стороны

рии количество окиси углерода максимальное — 33,7%, на расстоянии 1200 мм минимальное — 23,0%.

В нижней части рис. 6 приведены средние температуры на втором горизонте.

У периферии температура была максимальной и достигала 1000°, затем по направлению к оси печи на расстоянии 1150 мм уменьшалась до 700°.

На втором горизонте температуры оказались настолько высокими (700—1000°), что восстановление руды происходило, как видно из табл. 11, довольно интенсивно.

Степень восстановления руд была высокой, но весьма неравномерной.

Как правило, рудная мелочь оказывалась более восстановленной, чем руда в кусках; куски руды в разных частях были восстановлены различно.

Таблица 11

Химический состав руды со второго горизонта

№ пробы	Расстояние от клада шахты м.м.	Химический состав, %												Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по отношению к кислороду, %
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P	Сумма	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	
200	0	6,50	40,53	18,28	26,61	2,14	26,44	13,28	4,49	1,74	6,89	0,13	100,0	45,1	51,2	3,7	62,0
208	0	5,70	76,11	55,69	26,12	—	—	—	2,12	—	—	—	—	73,4	26,6	—	82,25
291	0	11,62	83,37	44,42	44,13	6,49	2,20	—	—	—	—	—	—	23,25	41,31	5,44	67,0
292	0	24,52	57,95	0,25	25,86	67,90	8,24	—	—	—	—	—	—	0,37	29,78	69,85	9,4
286	150	9,7	54,1	21,60	37,20	5,00	17,25	6,64	4,0	1,79	6,52	—	100,0	39,84	53,53	6,73	57,5
287	150	9,19	66,29	33,60	41,15	0,73	13,45	—	—	—	—	—	—	50,78	48,45	0,77	67,0
211	200	6,01	69,94	48,66	27,29	Нет	—	—	5,95	—	—	—	—	69,7	30,3	Нет	79,80
806	200	8,69	85,78	54,96	39,52	»	—	—	—	—	—	—	—	64,00	36,00	»	76,0
813	200	17,05	68,13	7,81	40,08	37,29	7,00	—	—	—	—	—	—	11,45	45,90	42,65	26,0
232a	400	10,39	44,70	9,08	42,55	3,46	17,74	8,34	7,49	2,54	8,80	—	100,0	20,30	74,30	5,40	44,9
233	500	11,98	82,74	40,34	54,38	Нет	2,56	—	—	—	—	—	—	48,70	51,30	Нет	65,76
234	500	11,76	76,75	34,89	53,61	»	5,98	—	—	—	—	—	—	45,49	54,51	»	63,68
245	500	22,49	69,30	Следы	62,60	29,19	—	—	—	—	—	—	—	Следы	70,5	29,5	23,1
247	500	19,28	67,39	3,51	70,47	12,69	6,04	—	—	—	—	—	—	5,22	81,6	13,18	22,10
214	500	10,64	71,47	34,59	45,15	2,37	8,27	—	—	—	—	—	—	48,60	49,40	2,00	65,0
217	500	8,72	69,43	39,33	36,36	2,46	5,26	—	—	—	—	—	—	56,58	40,80	2,62	70,10
219	500	9,21	50,92	19,16	38,59	2,38	10,56	—	—	—	—	—	—	37,7	59,1	3,2	57,3
221	500	19,98	72,02	8,47	65,10	18,43	3,70	2,30	0,30	0,20	1,00	—	100,0	11,78	70,5	17,72	37,44
220-I	500	22,72	64,17	1,65	35,87	49,40	11,00	—	1,82	0,21	0,05	—	100,0	2,57	43,58	53,65	16,5
220-III	500	25,58	60,08	Следы	1,46	84,20	9,46	3,14	1,56	0,16	0,02	—	100,0	Нет	1,89	98,11	0,0
221-I	500	19,49	74,71	9,97	71,73	12,50	2,10	1,30	0,40	0,20	1,80	—	100,0	13,32	75,0	11,68	38,2
221-II	500	26,74	70,52	Следы	31,36	65,90	1,42	—	1,04	0,16	0,12	—	100,0	Следы	34,70	65,30	10,5
222	500	6,67	88,70	64,90	30,47	—	—	—	—	—	—	—	—	73,00	27,00	—	82,0

№ пробы	Расстояние от впадины шахты м.м.	Химический состав, %												Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по количеству кислорода, %
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P	Сумма	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	
223	500	15,49	73,32	20,57	61,94	6,30	5,79	3,46	1,46	0,35	0,13	—	100,0	27,10	65,97	6,93	49,00
224	500	20,75	64,02	15,77	Не опр.	69,00	9,72	—	4,81	0,25	0,45	—	100,0	24,67	—	75,33	23,7
225	500	17,33	66,11	12,11	51,50	19,83	7,85	4,10	1,93	0,26	2,42	—	100,0	18,3	60,7	21,00	38,25
226	500	17,06	61,90	8,53	49,82	20,61	11,37	4,59	3,55	0,37	1,16	—	100,0	13,8	63,00	23,20	34,5
228	500	20,58	68,07	5,06	56,39	27,90	5,86	4,10	1,20	0,12	0,97	—	100,0	7,45	64,55	28,0	29,6
229	500	3,65	12,93	Следы	16,54	0,04	46,68	—	—	—	—	—	—	Следы	99,77	0,23	34,4
230	500	22,54	71,7	2,77	60,64	30,83	2,88	—	—	—	—	—	—	3,86	66,00	30,14	25,6
250	500	15,20	75,56	23,60	62,34	4,82	5,06	2,00	1,53	0,56	0,09	—	—	31,20	64,48	4,32	53,8
252	500	18,50	65,6	Следы	84,10	Нет	7,00	—	—	—	—	—	—	Следы	100,0	Нет	33,34
254	500	26,57	62,45	0,50	26,19	62,33	5,40	—	—	—	—	0,12	—	0,80	32,68	66,52	10,9
255	500	11,84	80,46	38,80	53,50	Нет	4,61	—	—	—	—	—	—	48,2	51,8	Нет	65,43
258	500	11,08	86,53	47,65	49,30	0,66	4,12	—	—	—	—	—	—	55,25	44,50	0,25	71,10
290	500	12,07	44,32	1,76	26,52	28,11	19,40	—	—	—	—	—	—	3,88	46,70	49,42	18,78
299	500	7,92	55,27	28,24	32,36	2,59	15,28	—	—	—	—	—	—	51,15	45,60	3,25	66,00
802	500	18,48	71,71	13,89	55,69	20,61	4,48	—	—	—	—	—	—	19,40	60,5	20,1	39,3
804	500	19,87	72,28	4,79	79,52	7,84	3,18	—	—	—	—	—	—	6,63	85,78	7,59	38,10
808	500	13,80	81,16	32,56	62,4	Нет	4,95	—	—	—	—	—	—	40,2	59,8	Нет	60,05
811	500	19,66	49,72	3,78	Не опр.	65,62	12,52	—	—	—	—	—	—	7,60	—	92,40	5,5
819	500	22,69	65,30	0,70	44,34	42,96	7,40	3,50	1,22	0,56	0,02	—	100,0	1,07	53,00	45,93	18,1
240	800	9,26	80,64	48,35	40,05	1,50	5,20	3,00	0,80	0,10	1,00	—	100,0	59,95	38,80	1,25	70,57
240	800	9,93	78,41	44,44	40,81	3,09	5,98	4,26	1,25	0,14	0,03	—	100,0	56,7	40,65	2,65	70,18
243	800	19,72	60,20	Нет	42,99	36,93	8,92	—	—	—	—	—	—	Нет	57,0	43,0	18,4
204	1000	11,18	58,08	20,74	41,70	6,82	14,39	6,64	4,98	1,27	3,32	0,14	100,0	35,63	56,07	8,30	30,6
235	1000	9,66	64,58	30,76	43,48	Нет	6,12	—	—	—	—	—	—	47,55	52,45	Нет	65,00

Продолжение

№ пробы	Расстояние от гряды шахты м.	Химический состав, %											Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по количеству кислорода, %	
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P	Сумма	Fe _{мет}	FeO		Fe ₂ O ₃
237	1000	12,87	70,51	30,51	37,39	15,48	—	—	—	—	—	—	—	43,30	41,4	15,30	56,9
262	1000	13,78	71,79	23,53	60,32	1,72	3,94	—	—	—	—	—	—	32,62	65,70	1,68	54,5
262	1000	22,04	65,00	1,50	45,36	40,18	4,32	—	—	—	—	—	—	2,31	54,5	43,29	19,9
265	1000	18,55	60,44	3,23	51,74	24,02	6,72	—	—	—	—	—	—	5,35	67,00	27,65	27,3
267	1000	6,19	70,11	48,13	23,17	Нет	4,96	—	—	—	—	—	—	68,90	31,10	Нет	68,5
284	1000	13,36	55,12	10,08	52,91	5,49	12,80	—	—	—	—	—	—	19,6	74,85	5,55	44,5
235	1000	19,76	68,89	7,31	58,96	22,38	8,28	—	—	—	—	—	—	10,62	66,85	22,53	32,6
285	1000	20,61	64,83	2,01	55,24	28,19	6,64	—	—	—	—	—	—	3,10	66,65	30,25	20,0
801	1000	16,16	77,25	20,98	71,47	0,96	2,08	—	—	—	—	—	—	27,12	72,01	0,87	51,1
816	1000	27,40	67,66	Следы	14,59	80,47	—	—	—	—	—	—	—	Следы	16,80	83,20	4,5
817	1000	20,43	55,64	Нет	30,58	45,49	—	—	—	—	—	—	—	Нет	42,85	57,15	13,5
280	1300	10,86	62,92	26,88	39,67	7,23	8,32	—	—	—	—	—	—	42,75	49,10	8,05	59,1
282	1300	15,88	53,87	4,72	33,05	31,98	12,39	—	—	—	—	—	—	8,70	49,80	41,50	24,9
274	1400	19,93	53,10	Нет	25,33	47,70	11,64	6,82	4,11	1,53	2,87	—	100,0	Нет	37,2	62,8	11,4
275	1400	18,18	49,79	»	28,06	39,1	11,05	—	—	—	—	—	—	»	44,85	55,15	13,90
271	1500	14,95	65,42	13,11	66,39	0,87	9,36	—	—	—	—	—	—	20,00	78,97	0,93	46,4
277	1500	11,64	63,23	22,90	50,43	1,54	10,53	—	—	—	—	—	—	36,90	62,09	1,71	56,8
278	1500	12,36	63,64	21,94	49,44	4,62	13,81	—	—	—	—	—	—	34,43	60,47	5,10	54,5
Среднее по горизонту		15,90	67,55	18,47	45,56	19,42	—	—	—	—	—	—	—	27,37	52,55	20,08	44,6

В отдельных пробах руд металлического железа не было, в других же пробах содержание его доходило до 64,9%. Содержание закиси железа в пробах изменялось от 1,5 до 84,0%, а окиси железа — от 0 до 80%.

Наконец, необходимо отметить, что на втором горизонте наблюдалось частичное спекание рудной мелочи. Правда, спекшиеся частицы руды после извлечения представляли собой непрочную массу и легко раздавливались даже пальцами. Вос-

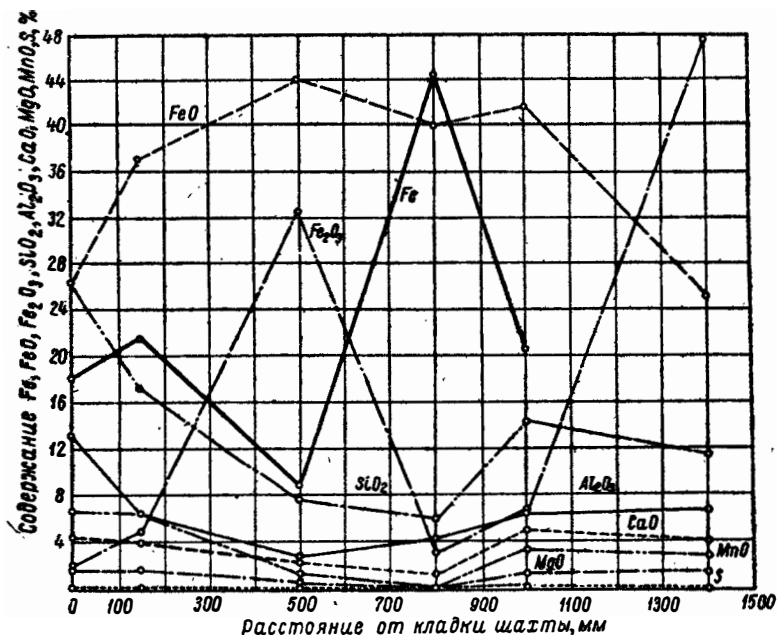


Рис. 7. Средний состав руды на втором горизонте

становление руды шло с поверхности куска в глубину. Анализы отдельных составных частей одного и того же куска руды подтверждают это.

На рис. 7 приведен средний состав руды на втором горизонте.

Количество металлического железа в руде в зависимости от расстояния от периферии изменялось от 0 до 44,5%, закиси железа — от 25,0 до 44,0% и окиси железа — от 2,0 до 32%.

В соответствии с содержанием металлического железа, закиси и окиси железа в рудах находятся и кривые состава пустой породы в них. Анализы руд на втором горизонте указаны в табл. 11.

На рис. 8 и в табл. 12 приведен средний состав руды на втором горизонте только по железу, закиси железа, окиси железа и общему содержанию железа.

Как видно из приведенных данных, количество железа в пробах руд различно и колеблется в пределах 52—78%. Это

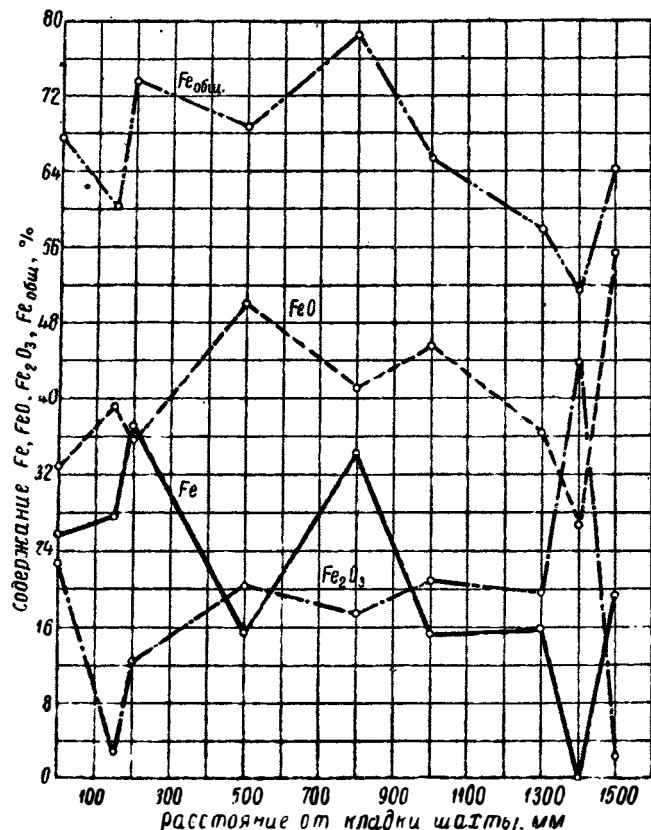


Рис. 8. Средний состав руды на втором горизонте только по Fe, FeO и Fe₂O₃.

объясняется как различным физическим состоянием и химическим составом руды (более богатая или более бедная), так и различной степенью восстановления этих руд в печи.

На увеличении содержания железа в пробах руд отражается также и процесс плавления и шлакообразования, начавшийся уже на втором горизонте.

Таблица 12

Средний состав руды на втором горизонте

Расстояние от кладки шахты м.м	Состав пробы без С						Fe _{общ} %	O ₂ %	Относительное содержание, %			Степень восстанов- ления по количест- ву огня- того кис- лорода, %
	колич. проб	средний % Fe	колич. проб	средний % FeO	колич. проб	средний % Fe ₂ O ₃			Fe _{мет}	Fe _{зак}	Fe _{ок}	
0	5	25,79	5	33,03	4	22,75	67,46	14,11	38,22	38,18	23,60	50,70
150	2	27,60	2	39,17	2	2,87	60,21	9,43	45,84	50,75	3,41	62,72
200	3	37,14	3	35,63	3	12,42	73,62	11,57	50,37	37,85	11,78	60,75
500	36	15,45	34	49,93	35	20,33	68,63	17,11	22,47	56,80	20,73	41,10
800	5	34,25	4	41,13	4	17,38	78,48	14,28	43,68	40,81	15,51	57,10
1000	13	15,29	13	45,53	13	20,86	65,35	16,33	23,42	54,20	22,38	41,15
1300	2	15,80	2	36,36	2	19,60	57,89	13,89	27,34	48,96	23,70	43,4
1400	2	Нет	2	23,69	2	43,80	51,49	19,00	Нет	40,45	59,55	12,5
1500	3	19,32	3	55,41	3	2,34	64,18	12,89	30,08	67,36	2,56	52,5
	71	18,47	68	45,56	68	19,42	67,55	15,90	27,37	52,55	20,08	44,6

В периферийной части печи при максимальных температурах (980—925°) степень восстановления руд была наибольшей; так, например, на расстоянии 200 мм от кладки печи содержа-

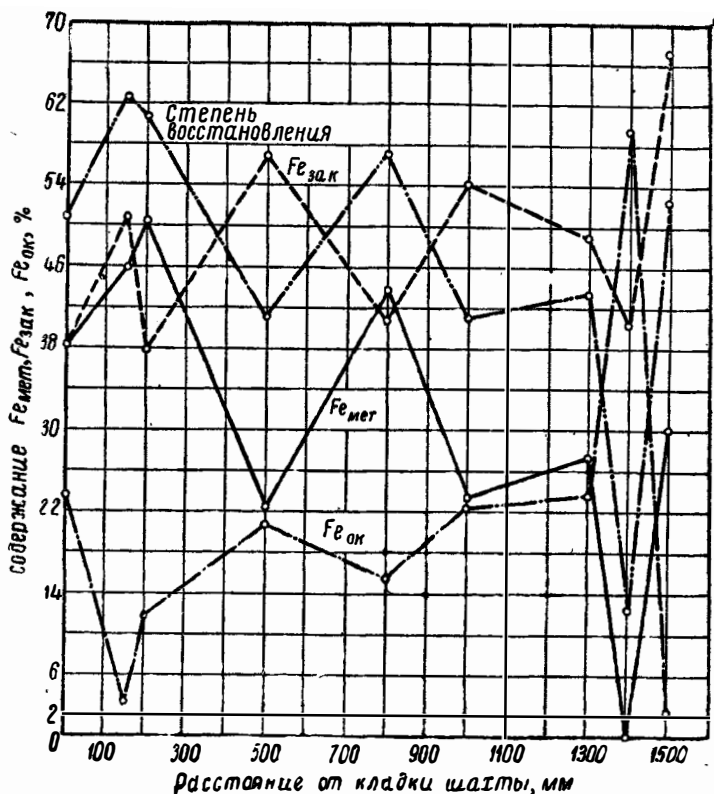


Рис. 9. Относительное содержание железа в процентах в виде $Fe_{мет}$ $Fe_{зак}$ $Fe_{ок}$ и степень восстановления по кислороду на втором горизонте

ние металлического железа достигало 37%, а закиси желе. 36%, тогда как окиси железа только 12%. В пробах руд, взятых на расстояниях, более удаленных от периферии, содержа металлических железа, закиси и окиси железа в рудах хотя и сильно колебалось, но указывало на довольно высокую степень восстановления, что видно из табл. 12.

На рис. 9 приведено относительное содержание железа в различных степенях окисления и степень восстановления по кислороду.

Как видно из рисунка, содержание металлического железа в пробах руд на втором горизонте у периферии было довольно значительным; например, на расстоянии 200 мм от кладки шахты относительное содержание металлического железа достигало 50%, закисного — 38%, а окисного — только 12%. В этой части печи и степень восстановления находилась в пределах 61—62%.

Далее по направлению к оси печи в соотношениях между содержанием металлического, закисного и окисного железа наблюдались довольно значительные колебания, но все же за исключением проб с расстояния 1400 мм, где было обнаружено минимальное количество металлического железа и максимальное — окисного, в остальных точках содержание металлического железа в рудах было не ниже 22%, количество закисного железа в среднем 40%, при содержании окисного не выше 22%.

В среднем на втором горизонте (табл. 12) имеем (%):

Железо металлическое	18,47
Закись железа	45,56
Окись железа	19,42
Железо общее	67,55

Относительное содержание железа (%):

Металлическое	27,37
Закисное	52,55
Окисное	20,08

Степень восстановления по кислороду на втором горизонте составляет 44,6%.

Таким образом, до середины шахты руда была восстановлена почти наполовину.

На втором горизонте — и даже несколько выше его — уже начинается процесс шлакообразования. Почти во всех пробах злекаемых материалов были видны на отдельных кусочках ды или попадавшей пустой породы следы шлака. В большинстве случаев это выражалось отдельными каплями шлака, входившего в момент забора проб в жидком состоянии; тогда встречались и отдельные кусочки шлака. К сожалению, большого количества шлака набрать на втором горизонте для анализов не удалось, поэтому в табл. 13 приведены лишь анализы немногих проб шлаков, причем в среднем шлак на втором горизонте содержал 18,95% закиси железа и 3,65% окиси железа.

В отдельных шлаках количество закиси железа колебалось от 8,25 до 37,58% и окиси железа — от 1,52 до 4,94%.

Состав первичных шлаков второго горизонта (%)

№ пробы	Расстояние от кладки шахты, м.м.	Шлак	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	FeO	Fe ₂ O ₃	Сумма
818	0	Темносерого цвета, плотный	34,41	14,11	20,62	2,38	12,90	0,11	10,98	4,49	100,0
		Тот же без FeO и Fe ₂ O ₃	40,28	16,82	24,59	2,84	15,34	0,13	—	—	100,0
		Тот же в пересчете на SiO ₂ , Al ₂ O ₃ и CaO	48,2	20,6	31,2	—	—	—	—	—	100,0
800	1000	Темносерый, ноздреватый	23,30	8,70	33,06	16,33	8,83	—	8,25	1,52	100,0
		Тот же без FeO и Fe ₂ O ₃	25,59	9,65	36,78	18,16	9,82	—	—	—	100,0
		Тот же в пересчете на SiO ₂ , Al ₂ O ₃ и CaO	35,5	13,4	51,1	—	—	—	—	—	100,0
271	1500	Без FeO и Fe ₂ O ₃	24,00	11,82	4,38	1,55	15,69	0,04	37,58	4,94	100,0
		Тот же в пересчете на SiO ₂ , Al ₂ O ₃ и CaO	41,77	20,58	7,62	2,70	27,26	0,07	—	—	100,0
		Тот же в пересчете на SiO ₂ , Al ₂ O ₃ и CaO	—	—	10,2	—	—	—	—	—	100,0

Средний состав шлака на втором горизонте (без закиси и окиси железа) был следующим (в %):

Кремнезем	35,88
Глинозем	15,68
Известь	23,00
Магнезия	7,90
Закись марганца	17,47
Сера	0,07

Из этих цифр видно, что на втором горизонте закиси марганца было во много раз больше, чем в конечном шлаке; в этом шлаке уже присутствовала сера; глинозема и извести содержалось меньше, чем в конечном шлаке из горна.

По внешнему виду шлаки второго горизонта были темносерыми, плотными, камневидными, хотя попадались и ноздреватые. На рис. 40 ясно видны капельки шлака на куске извлеченной руды.

На втором горизонте известняк в значительной мере уже разложился. В пробах извлекаемых материалов куски известняка почти никогда не попадались, зато между кусками материалов присутствовала в мелко раздробленном состоянии известь: налеты были видны как на кусках руды, так и на кусках кокса.

Отдельные кусочки извести, извлекавшиеся вместе с пробами, легко раздавливались пальцами. Это позволяет заключить, что известняк только в верхней части шахты до разложения находится в прочном состоянии, а затем, перейдя в известь, в мелко раздробленном состоянии распыляется между проплавленными материалами. Часть извести уже на втором горизонте участвует в шлакообразовании.

Количество серы в извести на втором горизонте было довольно значительным и колебалось от 0,082 до 0,22%, что свидетельствует о поглощении известью серы из газа. Что же касается кокса, то, как видно из анализов (табл. 14), содержание углерода в нем значительно колебалось, что свидетельствует об израсходовании некоторой части углерода.

Серы в коксе в большинстве проб было меньше, чем в коксе, загружаемом в печь; это говорит о том, что сера из кокса на втором горизонте в значительной части уже удалена; хотя во многих пробах количество ее здесь оставалось почти таким же, как и в загружаемом коксе.

Наряду с химическими анализами извлекаемых кусков руды производился и микроскопический анализ их.

Таблица 14

Состав кокса со второго горизонта
(среднее по расстояниям)

№ пробы	Расстояние от кланки шахты м.м.	Состав кокса, %		Состав золы кокса, %													
		летучие	зола	C	Fe _{мет}	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	SO ₂	P ₂ O ₅			
294	0	0,25	12,80	—	Следы	0,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
288	150	1,40	14,80	—	»	0,56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
805	200	0,40	13,45	85,05	Нет	0,58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
820	500	0,76	16,75	80,85	»	0,46	43,90	24,91	22,15	1,36	0,72	1,27	0,28	—	—	—	—
242	800	0,40	14,65	—	»	0,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
815	1000	1,54	12,60	82,55	»	0,50	40,52	27,05	22,10	0,91	0,85	2,01	0,82	—	—	—	—
281	1300	0,60	14,60	—	»	0,52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
273	1400	2,00	18,75	—	»	0,52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
276	1500	1,15	15,70	—	»	0,57	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Образец № 220. Образец, внешний вид которого приведен на рис. 10, имеет различную степень восстановления с поверхности в глубину. Отдельные концентрические поля ясно видны простым глазом. Образец представляет собой не полностью восстановленную маргитовую руду, центральная часть его — полумартит — черту дает красноватую. На рис. 11 приведен микроснимок этой части образца. Остальная область имеет вид черной каймы с металлическим блеском и дает черную черту. Под микроскопом (рис. 12 и 13) минералогически эта часть образца представляется розово-красноватым магнетитом с включениями мартита. Ближе к периферии маргитовые включения в магнетите совершенно исчезают.

Таким образом, часть образца за пределами центральной части представляет собой руду, восстановленную до магнитной окиси.

Периферийная часть образца (рис. 10) представляет собой черную матовую поверхность и дает блестящую металлическую черту. На рис. 14 видно металлическое железо в виде мелких зерен в контакте с мелкозерни-

Образец № 220



Рис. 10. Внешний вид образца № 220 руды, извлеченной из второго горизонта



Рис. 11. Микроснимок шлифа из зоны I

Образец № 220

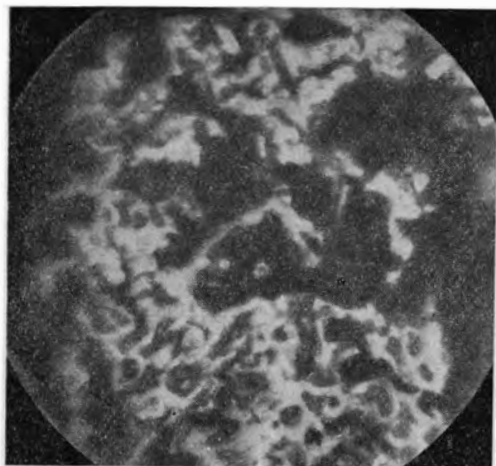


Рис. 12. Микроснимок шлифа
из зоны II

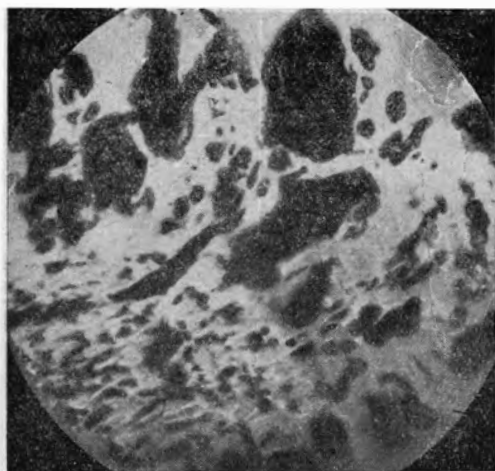


Рис. 13. Микроснимок шлифа
из зоны II

Образец № 220

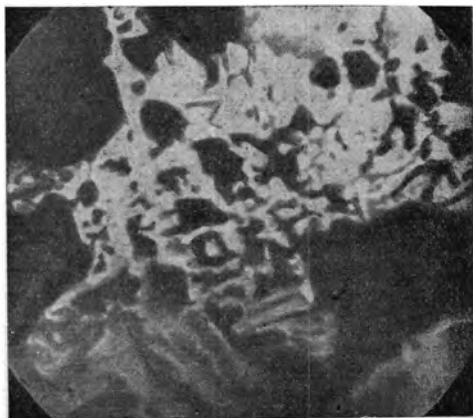


Рис. 14. Микроснимок шлифа
из зоны III

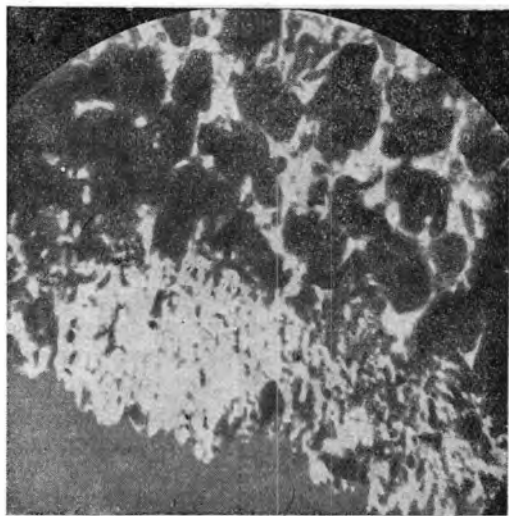


Рис. 15. Микроснимок периферийной зоны

стым магнетитом розовато-серой окраски, середина слегка оплавлена и погружена в силикатный расплав (шлак).

Наряду с этим, железо в виде очень мелких зерен (рис. 15) окружает магнетитовую часть образца.

Образец № 245. На рис. 16 представлен внешний вид этого образца. Цифрой *I* обозначена его внутренняя часть и цифрой *II* — периферийная часть, имеющие различную степень восстановления. В нем мартитовая руда частично восстановлена в магнетит. Под микроскопом видно, что центральная часть мартитовая, а по краям — магнетитовая (железо — черного цвета) в форме октаэдров.

Блестящие белые пятна, видные на снимке, — плоскости октаэдров мартита и магнетита. Середина центральной части образца — полумартитовая, периферийная часть — магнетитовая. На микроснимках шлифов (рис. 17 и 18) видно постепенное замещение мартита магнетитом.

Образец № 250. На рис. 19 приведен внешний вид образца. Центральная часть его представляет низшую степень восстановления по сравнению с окружающей ее периферийной частью. Цифрой *I* отмечена центральная часть образца, *II* — средняя и *III* — периферийная. Центральная часть представляет мартит, переходящий в магнетит. Ближе к участку, обозначенному цифрой *II*, количество магнетита постепенно увеличивается. Часть, обозначенная цифрой *II*, — магнетитовая. Периферийная часть представляет собой очень тонкую пленку металлического железа.

Как видно на рис. 20, центральная часть состоит из зерен мартита, частично восстановленных в магнетит.

На рис. 21 показан контакт полумартитовой центральной части с магнетитовой периферией.

Образец № 254. На рис. 22 показан внешний вид образца мартитовой руды, восстановленной в магнетит. Центральная часть образца — полумартилит красноватого цвета с характерной красноватой чертой. Периферийная магнетитовая часть черная, с черной характерной чертой. Переход мартитовой части в магнетитовую постепенный. На рис. 23 краевая часть образца представлена магнетитом, в котором имеются мелкие включения железа.

Образец № 240. Образец (рис. 24) представляет руду, восстановленную до магнетита. Середина образца имеет грязновато-зеленый цвет, наружная часть синевато-черная с черной металлической чертой. Микрошлиф (рис. 25) представляет темнозеленоватую магнетитовую массу однородного состава.

Образец № 230. Образец (рис. 26) представляет руду, восстановленную до магнетита. Цвет черный, черта — черная,

Образец № 245

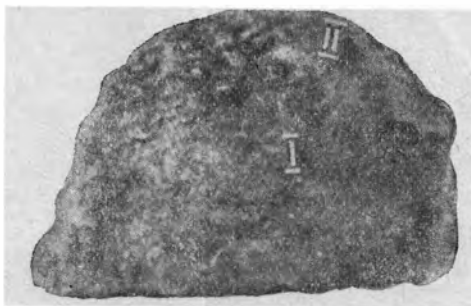


Рис. 16. Внешний вид образца № 245 руды, извлеченной из второго горизонта

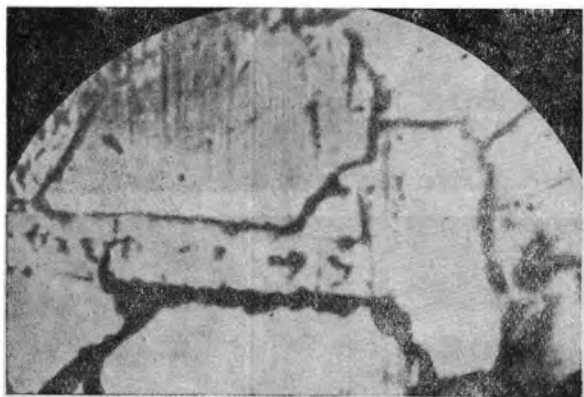


Рис. 17. Микроснимок шлифа

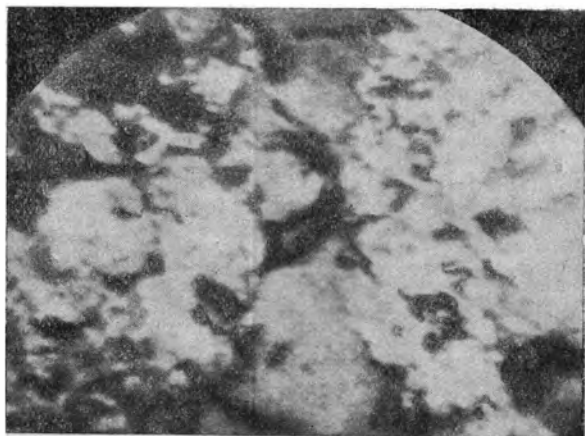


Рис. 18. Микроснимок шлифа переходной области

Образец № 250

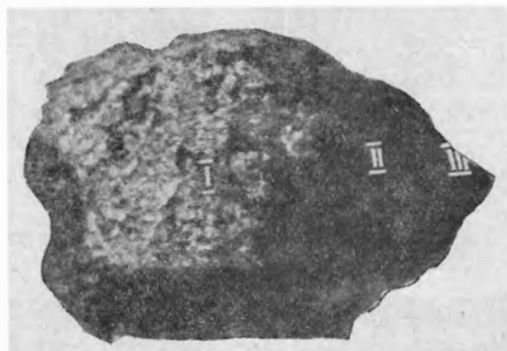


Рис. 19. Внешний вид образца № 250 руды, извлеченной из второго горизонта.

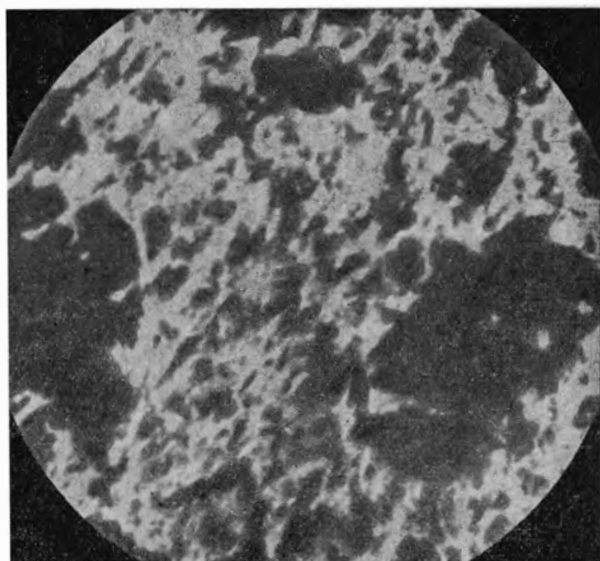


Рис. 20. Микроснимок шлифа из зоны I

Образец № 250

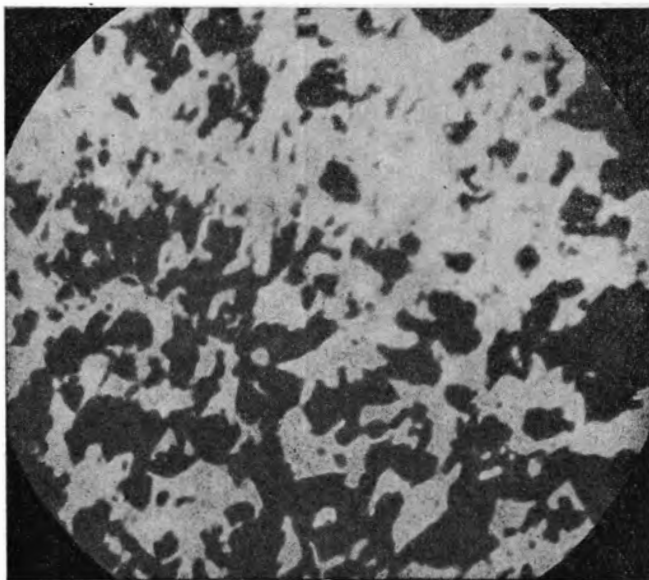


Рис. 21. Микроснимок шлифа из контактной зоны I и II.

Образец № 254



Рис. 22. Внешний вид образца № 254 руды, извлеченной из второго горизонта

Образец № 254

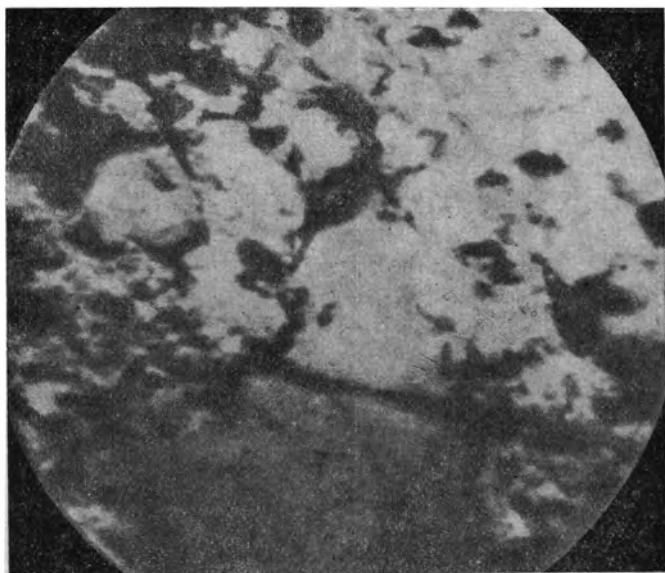


Рис. 23. Микроснимок шлифа

Образец № 240



Рис. 24. Внешний вид.
образца № 240 руды,
извлеченной из второго
горизонта

Образец № 240

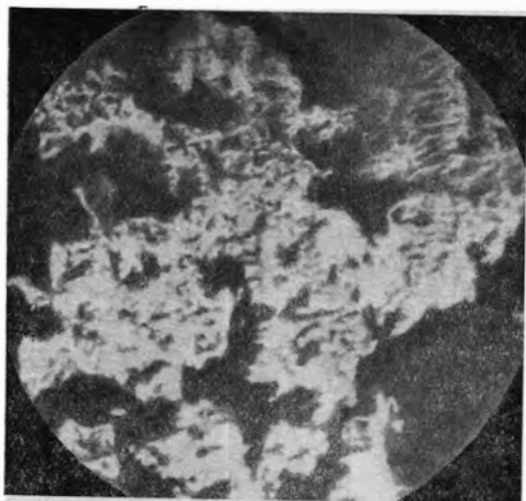


Рис. 25. Микроснимок шлифа

Образец № 230



Рис. 26. Внешний вид образца № 230 руды, извлеченной из второго горизонта

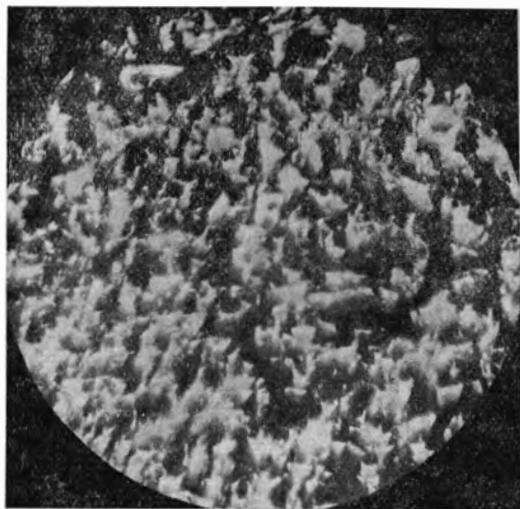


Рис. 27. Микроснимок шлифа

строение — зернистое, хорошо различимы октаэдры магнетита. Действует на магнитную стрелку. На микроснимке (рис. 27) видна темнозернистая магнетитовая масса.

Образец № 222. Представляет руду, полностью восстановленную, синевато-черноватого цвета с металлическим блеском. На рис. 28 дан общий вид образца с блестящей металлической чертой. Под микроскопом (рис. 29) видно очень тонкозернистое строение железа, магнетит отсутствует.

Образец № 242. Представляет руду, полностью восстановленную. Середина образца — зернистая, с грязновато-зеленым налетом, периферийная часть — с металлическим блеском и блестящей черной чертой, образец магнитен.

На образце (рис. 30) ясно видно резкое различие между периферийной и центральной частью. Периферийная часть, состоящая из чистого железа (рис. 31), имеет тонкозернистую структуру.

Образец № 291. Представляет руду, восстановленную в чистое железо, в образце (рис. 32) видна зональность, середина черная с синеватой побегалостью, по краям буровато-черные налеты, черта — черная, блеск — металлический.

На микроснимке (рис. 33) видна мелкозернистая однородная масса, состоящая из железа, изредка встречаются остатки магнетита, но они на этом снимке не заметны, так как различимы только при увеличении в 700 раз.

Образец № 267. Представляет руду, восстановленную в чистое железо, железосерого цвета, с сильным металлическим блеском (рис. 34). Образец магнитен. На микроснимке шлифа (рис. 35) видна мелкозернистая масса металлического железа.

Образец № 286. Представляет смесь железа и руды (рис. 36). Микрошлиф образца (рис. 37) обнаруживает сплавленную массу, состоящую из зерен металлического железа магнетита и силикатного расплава (шлака). Зерна мартита разрознены и окружены силикатным расплавом. Включения металлического железа неправильной формы распределены в беспорядке в магнетито-силикатной массе. Возможно, имеются частицы кокса. На микроснимке видно железо, магнетит и шлак.

Образец № 261. Представляет восстановленную руду железосерого цвета с сильно металлическим блеском (рис. 38). Образец магнитен.

Образец № 264. На рис. 39 представлен микрошлиф этого образца, в структуре — феррит (неправильное очертание ферритовых участков, отсутствие границ зерен).

Образец № 222



Рис. 28. Внешний вид образца № 222 руды, извлеченной из второго горизонта

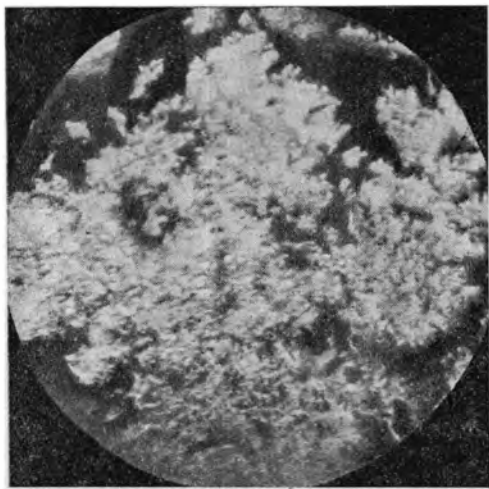


Рис. 29. Микроснимок шлифа
Образец № 242



Рис. 30. Внешний вид образца № 242 руды, извлеченной из второго горизонта.

Образец № 242

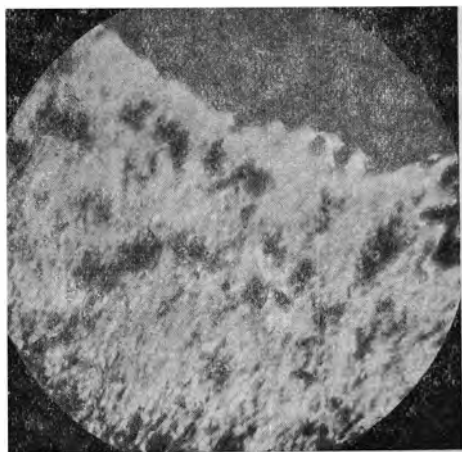


Рис. 31. Микроснимок шлифа

Образец № 291



Рис. 32. Внешний вид образца № 291 руды, извлеченной из второго горизонта

Образец № 291

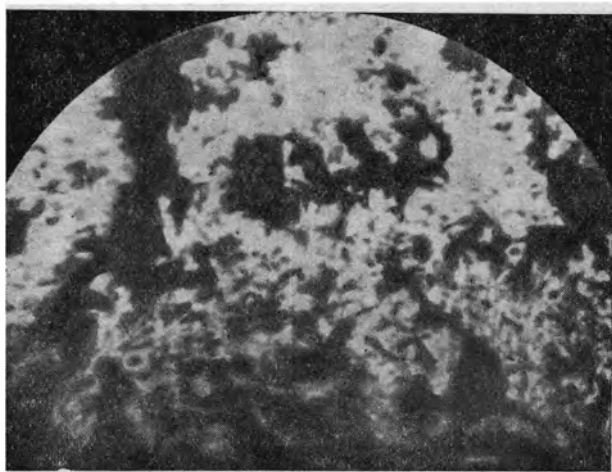


Рис. 33. Микроснимок шлифа

Образец № 267



Рис. 34. Внешний вид образца № 267 руды, извлеченной из второго горизонта

Образец № 267

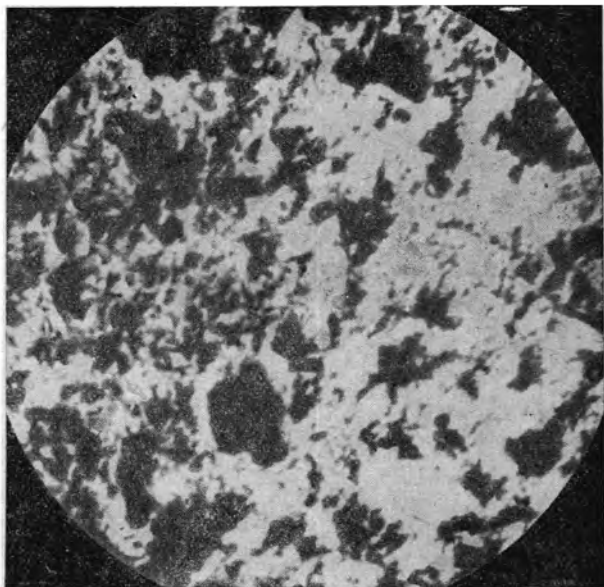


Рис. 35. Микроснимок шлифа.

Образец № 286

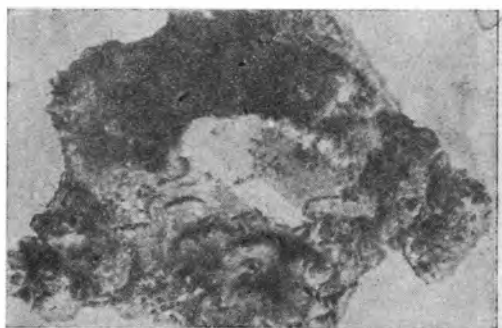


Рис. 36. Внешний вид образца № 286 руды, извлеченной из второго горизонта,

Образец № 286

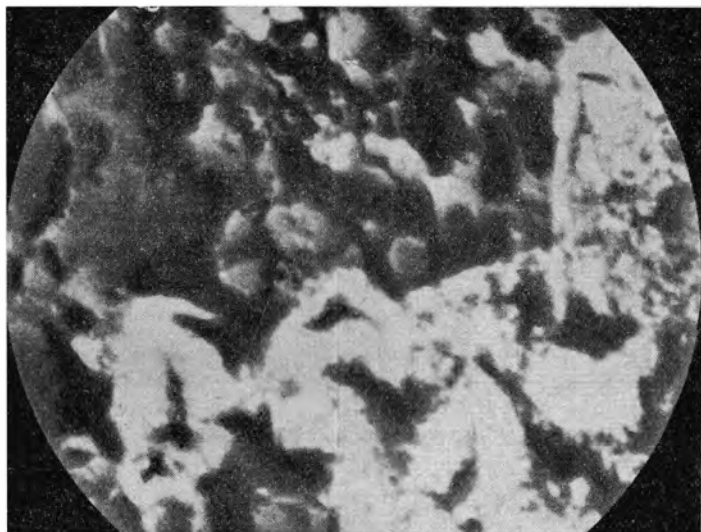


Рис. 37. Микроснимок шлифа

Образец № 261



Рис. 38. Внешний вид образца № 261

Образец № 264

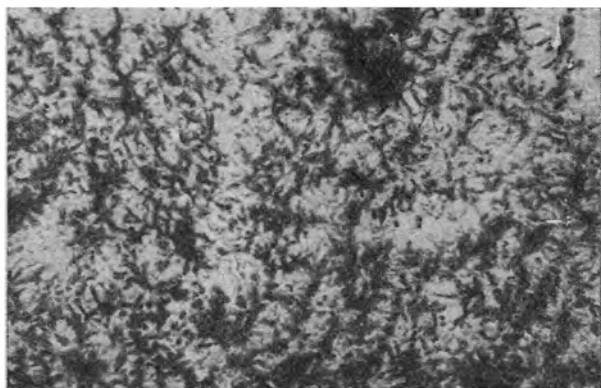


Рис. 39. Микроснимок шлифа образца № 264

Образец первичного шлака



Рис. 40. Первичный шлак на куске извлеченной руды.

Образцы первичного шлака

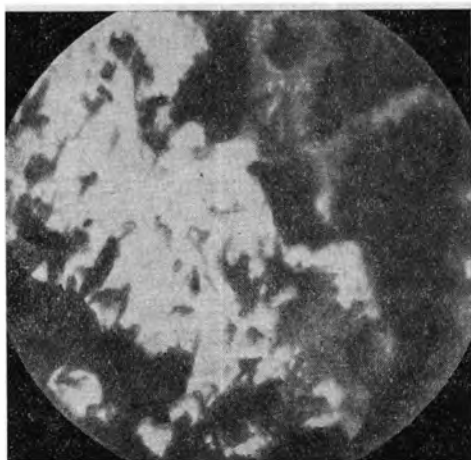
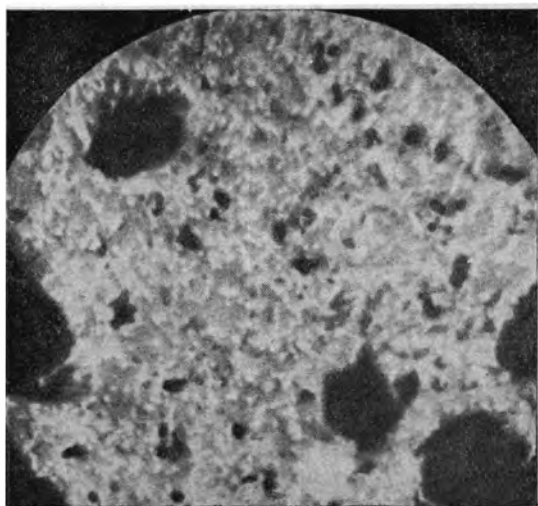


Рис. 41—42. Микроснимки шлифов образцов первичного шлака, извлеченного из второго горизонта

Образцы первичного шлака. Первичный шлак встречается преимущественно в виде капель на кусках руды. Образец такого шлака приведен на рис. 40. Рис. 41 представляет микрошлиф образца, состоящего из смеси зерен магнетита и металлического железа, сцементированных силикатным расплавом (шлаком), в котором включены зародыши кристаллов магнетита. Последние выделялись из расплава в процессе его остывания. Встречаются редкие зерна металлического железа.

На рис. 42 представлен снимок микрошлифа силикатного расплава (шлака) с включением зерен магнетита и металлического железа.

Третий горизонт

На третьем горизонте, в нижней части шахты, пробы материалов извлекались только с периферии, так как было очень трудно пробить отверстия в кладке шахты, которые заплывались с внутренней стороны печи смесью шлака и металла. На ходу печи пробить отверстия было невозможно, так как бур не проходил через вязкую металлическую массу. Только при остановке печи можно было прожечь металл кислородом, что и было сделано в конце исследований.

Наряду с забором проб материалов на третьем горизонте измерялись и температуры у периферии. Таких измерений было сделано немного; они показывают, что у периферии в нижней части шахты господствуют температуры порядка 1050—1150°.

Извлекавшиеся пробы материалов состояли из шлака, извести и смеси железа с недовосстановленной рудой. Основная часть проб материалов представляла собой металлическую массу.

Пробы, состоящие из металла, шлака и руд, были извлечены в жидком состоянии, и поэтому отделить металл от недовосстановленной руды было трудно, шлак же легко отделялся от металлической массы.

В табл. 15 приведен анализ металлической части проб. К сожалению, вследствие того, что наряду с чистым металлом в жидком состоянии была и плавленая руда, трудно судить, какое именно количество углерода, кремния и марганца содержали пробы металла в нижней части шахты. Вероятно, в металлической массе кремния и марганца еще не было. Анализ показывает, что эти составляющие чугуна, повидимому, попали из пустой породы плавленой руды.

Таблица 15

Химический состав проб металла с третьего горизонта

№ пробы	Расстояние от кладки, мм	С о с т а в, %							Окислительное содержание Fe в виде Fe _{мет} , %	Примечание
		Fe _{мет}	Fe _{общ}	C	Si	Mn	S	P		
906	0	52,39	88,16	0,47	—	—	0,041	0,193	60,0	Большой кусок дает металлическую черту
909	0	64,90	89,44	0,29	—	—	—	—	72,0	
919	0	65,93	80,24	0,10	—	—	—	0,063	82,0	—
925	0	52,13	76,41	0,28	—	—	—	—	68,0	Кусок размером 20×30 мм, хорошо куется, мягкий
926	0	50,80	59,80	0,38	—	—	—	—	84,0	
926а	0	39,61	59,80	—	—	—	—	—	66,0	То же
929	0	84,84	90,71	0,60	—	0,19	—	0,071	87,0	Кусок темносерого цвета
929а	0	77,16	90,71	—	—	—	—	—	85,0	
930	0	69,00	81,01	0,37	—	—	—	—	85,0	Кусок темносерого цвета
931	0	60,05	70,23	0,64	—	—	—	0,090	86,0	Мелкие кусочки
932	0	99,66	99,66	0,36	Следы	—	—	—	100,0	Плотный кусок, куется
938	0	72,32	93,02	0,14	—	0,19	—	0,062	78,0	Хорошо куется
949	0	99,92	99,92	0,03	Следы	Следы	—	0,082	100,0	Большой кусок, в изломе крупнокристаллический
Среднее		68,36	83,00	—	—	—	—	—	81,0	
912	200	65,93	85,10	0,28	—	—	—	—	78,0	Кусок размером 20×30 мм, хорошо куется, мягкий
913	200	64,13	85,60	0,20	—	—	—	0,065	76,0	

Продолжение

№ пробы	Расстояние от кладки, мм	С о с т а в, %							Относительное содержание Fe в виде Fe _{мет} , %	Примечание
		Fe _{мет}	Fe _{общ}	C	Si	Mn	S	P		
914	200	60,05	85,60	0,30	—	—	—	0,077	70,0	Мелкие кусочки То же
914a	200	64,65	88,16	0,09	—	—	—	0,071	74,0	
940	200	99,15	99,15	0,07	Следы	Следы	—	0,120	100,0	
941	200	93,05	95,93	—	—	—	—	—	97,0	Большой кусок, крупные кристаллы в изломе Аналогичен 940, размером меньше и мелкие кристаллы в изломе
950	200	85,66	92,10	1,13	—	—	—	0,122	93,0	
Среднее		76,09	89,28	—	—	—	—	—	84,0	
900	300	37,82	81,52	0,75	—	—	—	0,080	46,0	Большой кусок, снаружи металл, внутри еще не- довосстановлен- ный
901	300	58,00	92,23	0,37	—	0,11	—	0,090	63,0	
921a	300	63,83	78,31	0,19	—	—	—	0,101	82,0	Небольшой кусок, матовый в изломе Мелкие кусочки Мелкие кусочки металла с рудой
902	300	63,38	85,35	0,28	—	—	—	0,122	74,0	
903	300	39,86	76,15	0,83	—	—	—	0,083	52,0	
922	300	69,00	89,18	0,67	—	0,15	—	0,078	78,0	
Среднее		55,32	83,79	—	—	—	—	—	65,16	
Среднее по горизонту		67,43	85,14	—	—	—	—	—	79,2	

При рассмотрении металлической части проб материалов с этого горизонта представляет интерес содержание в пробах общего, металлического и закисного железа. Окись железа на третьем горизонте не встречалась. Непосредственно у кладки печи содержание железа в среднем составляло 83,0%, а металлического железа 68,36% (относительное содержание железа в виде металлического было 81,0% и в виде закисного 19,0%).

На расстоянии 200 мм от кладки содержание общего железа было в среднем 89,28%, а металлического — 76,09% (относительное содержание железа в виде металлического — 84% и в виде закисного — 16%).

На расстоянии 300 мм от кладки общее содержание железа было в среднем 83,79%, а металлического — 55,32% (относительное содержание железа в виде металлического — 65,16% и в виде закисного — 34,84%). По всему горизонту среднее содержание общего железа — 85,14% и металлического — 67,43% (относительное содержание железа в виде закисного — 20,8%).

Наряду с металлической частью проб встречались и пробы недовосстановленной руды различной степени восстановления.

На третьем горизонте шлак встречался в большом количестве в виде плотных кусков темносерого, светлосерого, шоколадного и коричневого цветов. Встречались и шлаки, которые имели очень много закиси железа (до 54,5%), и наряду с этим шлаки, которые содержали закиси железа только 1,35%. В среднем шлак на третьем горизонте содержал: 29,26% закиси железа и 8,42% окиси железа. Шлак после пересчета (без закиси и окиси железа) содержал: кремнезема 42,50%, глинозема 24,35%, извести 22,46%, магнезии 3,51%, закиси марганца 6,67% и серы 0,51%.

Как видно из приведенного состава, шлак в нижней части шахты значительно отличается от конечного шлака из горна. Так, кремнезема значительно больше, а извести значительно меньше, чем в конечном шлаке. По сравнению со шлаком с второго горизонта, шлак с третьего горизонта содержит значительно меньше закиси марганца. Состав шлака на третьем горизонте показывает, что известь только частично участвует в нижней части шахты в процессе шлакообразования, а окончательное растворение ее в шлаке происходит ниже. Подробный состав шлаков на третьем горизонте приведен в табл. 16.

Процесс восстановления в нижней части шахты идет так же неравномерно, как на первом и особенно на втором горизонте.

Химический состав проб шлака с третьего горизонта (‰)

№ пробы	Расстояние от кладки м.м	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	C	Примечание
908	0	1,89	3,15	4,3	44,9	41,9	2,40	0,45	1,20	—	—	Пустая порода, ошлакованная с поверхности
908	0	—	3,22	4,40	45,52	42,75	2,46	0,46	1,23	—	—	Без Fe _{мет} и C
908	0	—	—	—	49,05	46,45	2,67	0,50	1,33	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
924	0	0,75	53,7	14,8	16,3	9,3	1,40	1,0	1,90	—	0,17	Большой плотный кусок темно-серого цвета
924	0	—	54,53	15,05	16,6	9,46	1,42	1,01	1,93	—	—	Без Fe _{мет} и C
924	0	—	—	—	54,56	31,10	4,67	3,32	6,35	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
933	0	Нет	Нет	23,50	42,45	30,50	2,40	1,60	—	0,10	0,3	Пустая порода, ошлакованная с поверхности
933	0	—	—	23,34	42,23	30,33	2,40	1,60	—	0,10	—	Без Fe _{мет} и C
933	0	—	—	—	54,79	39,58	3,13	2,36	—	0,14	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
944	0	Следы	1,35	8,70	36,05	14,0	27,35	4,20	7,95	0,45	0,85	Плотный кусок шоколадного цвета
944	0	—	1,35	8,70	36,00	14,00	27,35	4,20	7,95	0,45	—	Без Fe _{мет} и C
944	0	—	—	—	40,04	15,55	30,43	4,66	8,82	0,50	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
944a	0	13,82	43,8	7,9	15,9	9,9	3,0	0,8	2,10	—	0,38	Плотный, тяжелый
944a	0	—	52,46	9,49	19,10	11,88	3,60	0,96	2,51	—	—	Без Fe _{мет} и C
944a	0	—	—	—	50,20	31,15	9,5	2,53	6,62	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
952	0	Нет	43,8	27,9	12,15	7,45	7,05	1,30	3,10	0,15	—	Черный, тяжелый
952	0	—	42,61	27,02	11,80	7,25	6,84	1,23	3,07	0,15	—	Без Fe _{мет} и C
952	0	—	—	—	38,73	23,95	22,58	4,15	10,10	0,49	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃

№ пробы	Расстояние от кладки м.м.	F _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	C	Примечание
953	0	3,02	17,0	6,0	31,8	19,12	15,60	1,45	3,60	—	0,41	Светлый, легкий
953	0	—	18,01	6,35	33,6	20,2	16,5	1,53	3,81	—	—	Без Fe _{мет} и C
953	0	—	—	—	44,26	26,78	21,90	2,02	5,04	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
917	200	0,56	19,8	7,6	31,8	21,4	17,40	0,15	1,20	—	—	
917	200	—	19,93	7,65	32,00	21,54	17,53	0,15	1,20	—	—	Без Fe _{мет} и C
917	200	—	—	—	44,25	29,68	24,2	0,21	1,66	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
936	200	0,37	1,80	1,5	35,0	18,0	29,0	4,7	7,9	—	0,56	Большой, легкий кусок чистого шлака коричневого цвета
936	200	—	1,84	1,53	35,39	18,75	29,63	4,80	8,06	—	—	Без Fe _{мет} и C
936	200	—	—	—	36,47	19,4	30,80	4,97	8,36	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
942	200	20,05	28,70	Нет	19,65	11,10	8,85	2,50	3,25	0,20	2,15	Плотный, шоколадного цвета
942	200	—	38,85	—	26,58	15,10	11,52	3,38	4,4	0,27	—	Без Fe _{мет} и C
942	200	—	—	—	43,37	24,62	18,83	5,54	7,20	0,44	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
943	200	11,35	27,25	Нет	24,15	16,05	11,40	2,10	4,05	0,35	1,90	Темносерый плотный
943	200	—	31,95	—	28,30	18,79	13,35	2,46	4,74	0,40	—	Без Fe _{мет} и C
943	200	—	—	—	41,73	27,67	19,62	3,63	6,75	0,60	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
923	300	Нет	Нет	5,45	52,10	31,95	0,75	1,60	Нет	0,10	8,55	Ошлакованная с поверхности пустая порода
923	300	—	—	5,93	56,62	34,78	0,82	1,74	—	0,11	—	Без Fe _{мет} и C
923	300	—	—	—	60,16	37,00	0,87	1,85	—	0,12	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
Средние по горизонту без Fe _{мет} и C		Нет	29,26	8,42	26,49	15,12	14,05	2,19	4,15	0,32	—	
То же при пересчете без FeO и Fe ₂ O ₃		—	—	—	42,50	24,35	22,46	3,51	6,67	0,51	—	

Наряду с пробами металла, который представляет собой более или менее науглероженное железо, встречаются еще недовосстановленные куски руды.

Что касается серы в коксе на третьем горизонте (табл. 17), то можно считать, что она на одну треть уже удалена.

Таблица 17

Состав кокса с третьего горизонта (%)

№ пробы	Расстояние от кладки мм	Летучие	Зола	C	S	Fe _{мет}
907	0,00	1,60	21,50	76,70	0,57	Следы
918	0,00	0,70	20,00	78,90	0,51	0,25
927	0,00	Нет	16,50	—	0,54	Следы
945	0,00	1,00	20,80	—	0,35	Нет
947	0,00	0,10	12,60	—	0,52	»
Среднее		0,85	18,28	77,80	0,50	0,25
910	200,0	0,30	15,95	82,70	0,52	0,25
934	200,0	0,90	22,15	—	0,44	Нет
937	200,0	0,80	19,45	—	0,48	»
954	200,0	0,10	12,75	—	0,39	Следы
Среднее		0,52	17,58	82,70	0,46	0,25
905	300,0	0,50	19,00	79,85	0,55	0,51
921	300,0	Нет	14,55	83,35	0,40	Нет
Среднее		0,50	16,77	81,60	0,47	0,51

Известь на третьем горизонте встречается в сильно раздробленном состоянии, но часть ее еще не участвует в процессе шлакообразования и в свободном состоянии опускается ниже в распар.

Образцы металла с третьего горизонта подвергались микроскопическому анализу.

Образец № 900 (рис. 43). В образце около 40% шлака и около 60% металлической массы, представляющей собой до-

Образец № 900

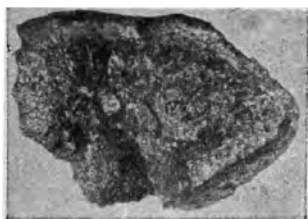


Рис. 43. Внешний вид образца № 900 металла, извлеченного из третьего горизонта

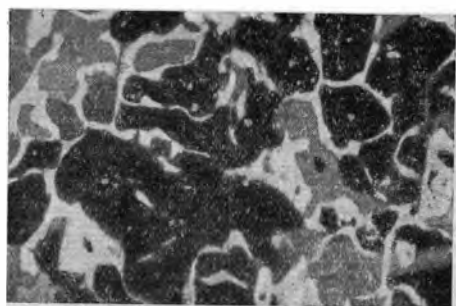


Рис. 44. Микроснимок шлифа

Образец № 901

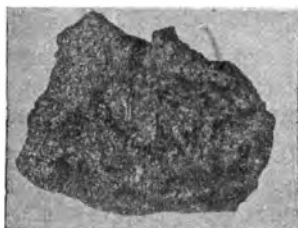


Рис. 45. Внешний вид образца № 901 металла, извлеченного из третьего горизонта

эвтектоидную мягкую сталь (около 0,2% С) с большим количеством третичного цементита.

На рис. 44 заснято место, богатое шлаками, для выявления двух типов шлака, встречающихся в этом образце, — темно-серого и совершенно темного.

Образец № 901 (рис. 45). Заключает около 30% шлака и около 70% металла. На снимке (рис. 46) металлическая масса имеет структуру доэвтектоидной стали с содержанием приблизительно 0,2% С. Снимок указывает на присутствие помимо феррита и перлита довольно значительного количества третичного цементита; перлит — пластинчатый.

Образец № 906 (рис. 47). Структура образца аналогична структуре предыдущих образцов, как это видно на рис. 48; шлаковых включений здесь несколько меньше и они имеют более округленную форму; также немного меньше перлита; шлака около 30%, металла около 70%.

Образец № 912 (рис. 49). Имеет около 60% металла и около 40% шлака. На снимке (рис. 50) металлическая масса представляет почти чистый феррит и, возможно, третичный цементит. Шлаковые включения округленные.

Образец № 925 (рис. 51). В нем часть шлаковых включений — мелкие и представляют собой как бы одно целое со структурой металлической массы, а часть — в виде крупных посторонних включений. Соотношение между шлаком и металлом — 45 : 55.

Как видно на рис. 52, основная металлическая масса — феррит с очень небольшим количеством перлита и третичного цементита.

Образец № 926 (рис. 53). Структура (рис. 54) приблизительно такая же, как и в предыдущем образце, но шлаковые включения распределены более равномерно.

Образец № 929 (рис. 55). Структура — близкая к предыдущей (рис. 56). На другом микроснимке (рис. 57) видно, что феррит преобладает и шлаковых включений меньше.

Образец № 930 (рис. 58). Попадаетея разнообразная структура. Как видно на рис. 59, крупные округленные шлаковые включения встречаются наряду с металлической массой, которая состоит из феррита и сорбита.

Образец № 940 (рис. 60). Представляет собой почти чистое железо (рис. 61), в котором кое-где видны запутавшиеся шлаки.

Образец № 949 (рис. 62). Состоит из еще более чистого железа (рис. 63) с мелкими окисными включениями.

Образец № 901

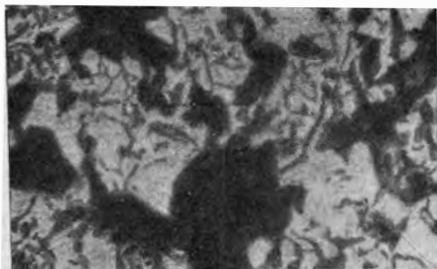


Рис. 46. Микроснимок шлифа

Образец № 906



Рис. 47. Внешний вид образца № 906
металла, извлеченного из третьего
горизонта

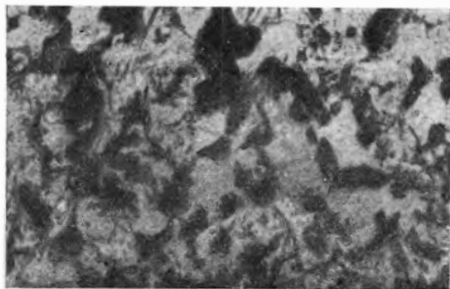


Рис. 48. Микроснимок шлифа

Образец № 912



Рис. 49. Внешний вид образца № 912 металла, извлеченного из третьего горизонта

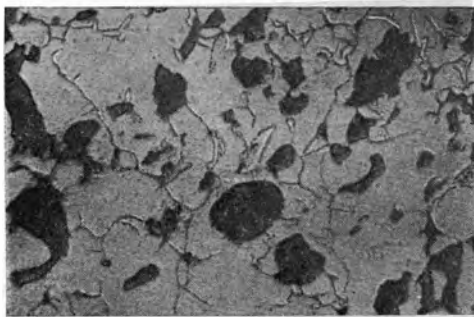


Рис. 50. Микроснимок шлифа

Образец № 925

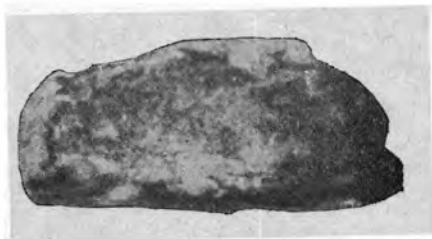


Рис. 51. Внешний вид образца № 925 металла, извлеченного из третьего горизонта

Образец № 925

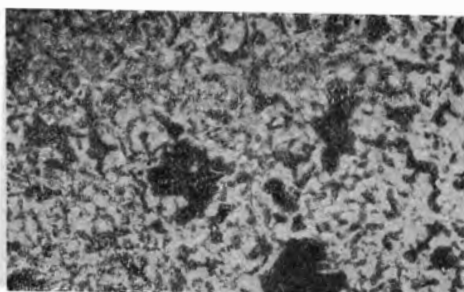


Рис. 52. Микроснимок шлифа

Образец № 926



Рис. 53. Внешний вид образца № 926 металла, извлеченного из третьего горизонта

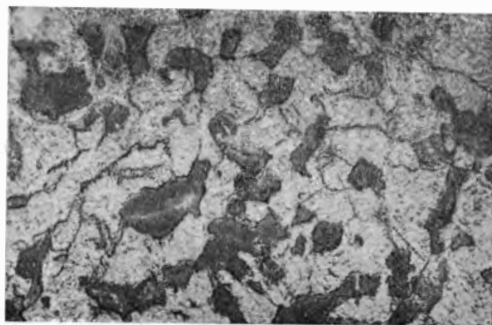


Рис. 54. Микроснимок шлифа

Образец № 929



Рис. 55. Внешний вид образца № 929 металла, извлеченного из третьего горизонта

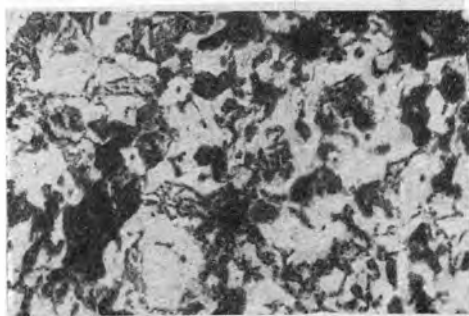


Рис. 56. Микроснимок шлифа

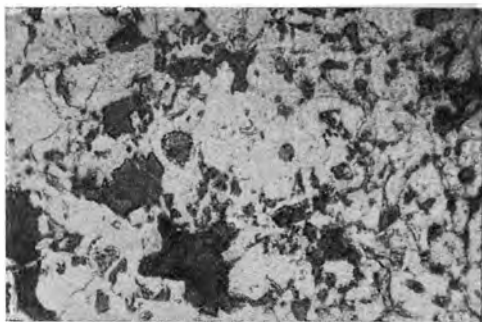


Рис. 57. Микроснимок шлифа

Образец № 930

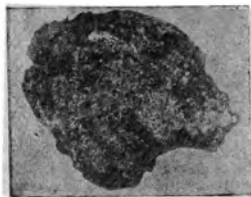


Рис. 58. Внешний вид образца № 930 металла, извлеченного из третьего горизонта.

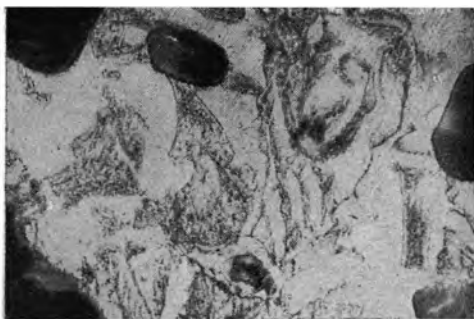


Рис. 59. Микроснимок шлифа.

Образец № 940

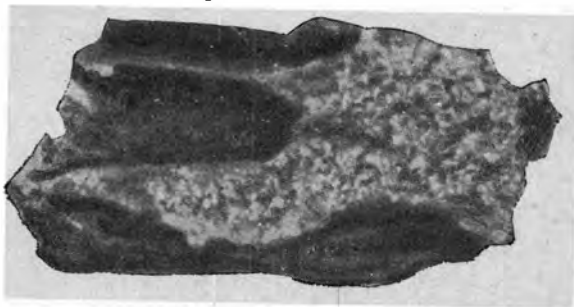


Рис. 60. Внешний вид образца № 940 металла, извлеченного из третьего горизонта.

Образец № 940

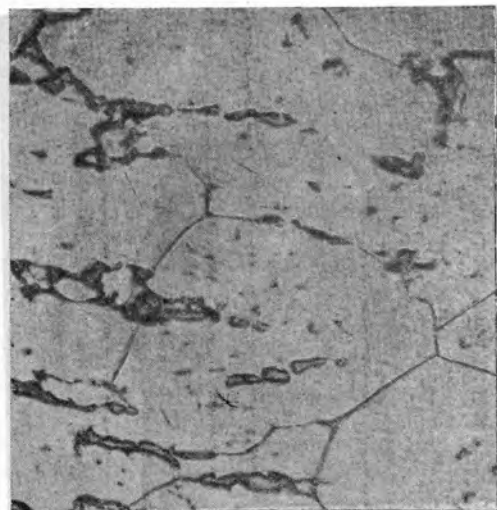


Рис. 61. Микроснимок шлифа

Образец № 949

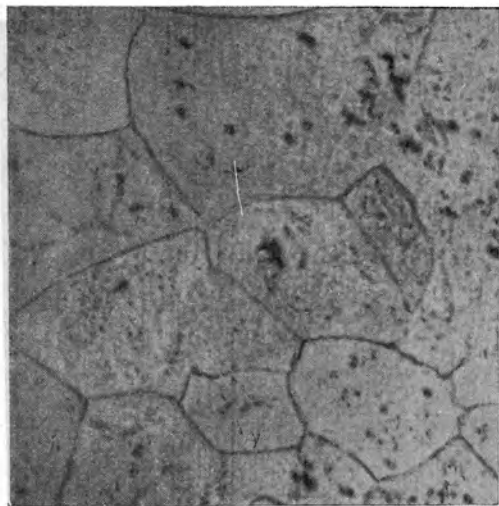


Рис. 63. Микроснимок шлифа

Образец № 949



Рис. 62. Внешний вид
образца № 949 металла,
извлеченного из третье-
го горизонта

Распар

В распаре исследования проводились с двух сторон: с северной и южной. Извлекавшиеся пробы материалов состояли из чугуна, шлака, кокса и извести. В табл. 18—20 приведены подробные анализы чугуна, шлака и кокса.

Средний состав чугуна в распаре с северной стороны: 1,57% С, 0,26% Si, 0,98% Mn, 0,022% S, 0,052% P. Чугун с южной стороны в распаре содержал: 2,64% С, 0,34% Si, 1,18% Mn, 0,036% S, 0,149% P. Большое количество углерода, кремния и марганца в чугуне с южной стороны, по сравнению с северной, объясняется тем, что печь работала неравномерно.

Таблица 1
Химический состав чугуна из распара (%)

№ пробы	Расстояние от кладки мм	С	Si	Mn	S	P
С южной стороны						
317	0	0,74	0,36	0,52	0,023	0,144
320	0	0,94	1,30	0,59	0,029	0,092
321	0	3,64	0,04	1,37	0,043	0,181
321a	0	3,54	0,04	1,41	0,004	0,197
322	0	3,37	0,20	1,61	0,039	0,136
326	0	3,99	0,15	1,54	0,036	0,151
327	0	3,27	0,05	1,62	0,038	0,164
328	0	0,65	0,93	0,56	0,047	0,071
333	0	3,64	0,03	1,40	0,035	0,207
Среднее		2,64	0,34	1,18	0,036	0,149
С северной стороны						
306	0	0,95	0,05	0,56	0,022	0,052
359	0	1,13	0,89	0,34	—	—
304	400	0,95	0,05	0,56	0,022	0,052
Среднее		1,57	0,26	0,98	0,022	0,052
Средний состав из распара		2,10	0,30	1,08	0,029	0,10

Химический состав шлака из распара (%)

№ пробы	Расстояние от кладки мм	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	C	Примечание
С северной стороны												
305	0	0,28	7,50	4,60	28,50	11,20	31,20	5,20	9,50	—	1,52	Выдуло при разделке отверстия
305	0	—	7,68	4,71	29,20	11,45	31,85	5,41	9,70	—	—	Без Fe _{мет} и С
305	0	—	—	—	33,08	13,05	36,40	6,38	11,09	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
310	0	4,53	4,00	2,70	34,80	14,70	26,00	4,30	7,80	—	—	Плотный, светлый
310	0	—	4,24	2,86	36,90	15,60	27,60	4,56	8,24	—	—	Без Fe _{мет} и С
310	0	—	—	—	39,61	16,80	29,76	4,93	8,90	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
311а	0	2,77	31,55	3,56	22,64	10,36	19,79	3,58	4,40	—	0,70	Плотный, темный
311а	0	—	32,93	3,70	23,61	10,81	20,62	3,74	4,59	—	—	Без Fe _{мет} и С
311а	0	—	—	—	37,40	17,10	32,67	5,90	6,93	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
311	0	4,0	4,53	2,70	34,80	14,70	26,00	4,30	7,80	—	—	Плотный, светлый
311	0	—	4,77	2,84	36,60	15,48	27,38	4,52	8,41	—	—	Без Fe _{мет} и С
311	0	—	—	—	39,58	16,78	29,60	4,90	9,14	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
312	0	4,3	9,18	Нет	33,50	15,10	24,71	5,03	6,84	—	—	Губчатый темный снаружи, светлый в изломе
312	0	—	9,74	»	35,50	16,00	26,20	5,33	7,23	—	—	Без Fe _{мет} и С
312	0	—	—	—	39,25	17,75	29,10	5,90	8,00	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
336	0	Нет	1,65	4,10	36,80	17,70	27,10	4,60	8,90	0,45	—	
336	0	—	1,67	4,13	37,06	15,81	27,29	4,63	8,96	0,45	—	Без Fe _{мет} и С
336	0	—	—	—	39,23	16,81	29,02	4,92	9,54	0,48	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
346	0	0,25	4,50	6,50	36,00	20,10	22,40	5,15	4,40	0,40	0,30	
346	0	—	4,53	6,54	36,20	20,21	22,52	5,18	4,41	0,41	—	Без Fe _{мет} и С
346	0	—	—	—	40,76	22,70	25,30	5,81	4,97	0,46	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
347	0	Следы	1,40	7,55	34,90	16,80	27,65	6,35	4,75	0,50	0,30	
347	0	—	1,40	7,55	34,95	16,80	27,70	6,35	4,75	0,50	—	Без Fe _{мет} и С
347	0	—	—	—	37,36	18,44	30,42	7,98	5,25	0,55	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃

№ пробы	Расстояние от кладки м.м	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	C	Примечание
349	0	0,37	2,05	3,55	37,85	20,10	20,55	4,55	3,50	0,40	0,15	
349	0	—	2,21	3,84	41,09	21,75	21,98	4,92	3,78	0,43	—	Без Fe _{мет} и C
349	0	—	—	—	43,68	23,20	23,40	5,24	4,02	0,46	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
351	0	Нет	2,55	8,35	33,45	18,60	21,85	6,55	6,75	0,45	0,65	Светлокоричневый
351	0	—	2,59	8,47	33,98	18,88	22,20	6,63	6,85	0,46	—	Без Fe _{мет} и C
351	0	—	—	—	38,15	21,22	24,95	7,46	7,70	0,52	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
358	0	Нет	8,75	2,65	21,45	6,40	32,90	18,45	5,80	0,15	1,10	
358	0	—	8,97	2,75	22,28	6,63	34,10	19,12	6,00	0,15	—	Без Fe _{мет} и C
358	0	—	—	—	24,86	7,55	38,91	21,70	6,81	0,17	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
360	0	7,90	12,40	Нет	31,80	18,35	15,80	4,40	4,15	—	0,75	
360	0	—	14,17	»	36,60	21,18	18,20	5,08	4,77	—	—	Без Fe _{мет} и C
360	0	—	—	—	42,72	24,61	21,20	5,89	5,58	—	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
344	200	Нет	2,50	4,20	35,10	16,80	25,80	4,50	7,55	0,50	2,55	
344	200	—	2,57	4,34	36,20	17,30	26,62	4,65	7,80	0,52	—	Без Fe _{мет} и C
344	200	—	—	—	38,84	18,60	28,72	4,88	8,40	0,56	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
344a	200	Следы	1,35	8,70	36,05	14,00	27,35	4,20	7,95	0,45	0,85	
344a	200	—	1,35	8,70	36,00	14,00	27,35	4,20	7,95	0,45	—	Без Fe _{мет} и C
344a	200	—	—	—	40,08	15,58	30,30	4,67	8,87	0,50	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
337	500	Следы	1,95	7,25	33,05	16,40	27,05	4,40	7,05	0,45	3,40	
337	500	—	1,98	7,40	33,75	16,68	28,04	4,49	7,20	0,46	—	Без Fe _{мет} и C
337	500	—	—	—	37,35	18,22	31,00	4,97	7,95	0,51	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
342	600	Нет	1,35	4,75	31,50	12,60	28,95	5,55	6,10	0,50	8,10	
342	600	—	1,43	5,22	34,50	13,82	31,57	6,10	6,70	0,55	—	Без Fe _{мет} и C
342	600	—	—	—	36,58	14,93	34,10	6,58	7,22	0,59	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃
343	600	Нет	3,15	4,85	33,80	16,30	29,50	5,25	7,75	0,45	0,85	
343	600	—	3,08	4,75	34,05	16,00	28,90	5,13	7,65	0,44	—	Без Fe _{мет} и C
343	600	—	—	—	36,96	17,18	31,45	5,61	8,31	0,49	—	Без FeO и Fe ₂ O ₃

№ пробы	Расстояние от кладки, мм	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	C	Примечание
/ С южной стороны												
313	0	Нет	22,89	2,71	27,16	10,18	23,70	3,22	3,58	—	0,18	Сумма 94%, присутствуют щелочи Без Fe _{мет} и C Без FeO и Fe ₂ O ₃
313	0	—	24,00	2,92	29,23	10,93	25,64	3,46	3,82	—	—	
313	0	—	—	—	39,72	15,08	35,20	4,75	5,25	—	—	
318	0	Нет	23,28	2,64	27,04	10,12	23,83	3,22	3,58	—	0,18	Сумма 94%, присутствуют щелочи Без Fe _{мет} и C Без FeO и Fe ₂ O ₃
318	0	—	25,02	2,80	28,75	10,83	25,35	3,44	3,81	—	—	
318	0	—	—	—	39,78	15,05	35,10	4,78	5,29	—	—	
325	0	Нет	4,90	Нет	31,30	14,00	37,32	6,58	5,86	—	—	Светлый Без Fe _{мет} и C Без FeO и Fe ₂ O ₃
325	0	—	4,90	»	31,31	14,00	37,36	6,58	5,86	—	—	
325	0	—	—	—	33,00	14,70	39,30	6,82	6,18	—	—	
329	0	0,25	6,18	1,08	31,06	13,90	36,06	—	5,75	—	4,88	Светлый Без Fe _{мет} и C Без FeO и Fe ₂ O ₃
329	0	—	6,45	1,14	32,78	14,83	38,80	—	6,00	—	—	
329	0	—	—	—	35,10	16,98	41,40	—	6,52	—	—	
332	0	Нет	23,09	1,48	27,40	10,96	23,83	3,47	3,90	—	0,18	Сумма 94%, присутствуют щелочи Без Fe _{мет} и C Без FeO и Fe ₂ O ₃
332	0	—	24,46	1,50	29,15	11,70	25,35	3,69	4,15	—	—	
332	0	—	—	—	39,45	15,80	34,15	5,00	5,60	—	—	
335	0	Нет	2,60	4,55	26,70	9,50	41,65	7,10	7,00	0,60	0,80	Без Fe _{мет} и C Без FeO и Fe ₂ O ₃
335	0	—	2,60	4,55	26,85	9,50	41,80	7,10	7,00	0,60	—	
335	0	—	—	—	29,10	10,10	45,00	7,63	7,52	0,65	—	

Средний состав шлака из распара

С северной стороны	—	6,19	4,58	34,03	15,79	26,47	5,89	6,77	0,28	—	—	Без Fe _{мет} и C Без FeO и Fe ₂ O ₃
	—	—	—	38,20	17,75	29,80	6,32	7,62	0,31	—	—	
С южной стороны	—	14,54	2,15	29,42	11,83	32,00	5,01	4,95	0,10	—	—	Без Fe _{мет} и C Без FeO и Fe ₂ O ₃
	—	—	—	35,79	14,27	38,02	5,87	5,94	0,11	—	—	

Таблица 20

Химический состав кокса из распара (%)

Дата	№ пробы	Расстояние от кладки мм	Легучие	Зола	С	Fe мет	S
С северной стороны							
17/IX	300	0	—	—	74,00	0,25	—
26/IX	309	0	2,40	13,70	82,10	Нет	0,75
2/X	338	500	1,05	16,75	80,30	0,51	0,51
13/X	348	0	0,45	18,80	—	0,68	0,53
15/X	350	0	0,85	18,30	—	Нет	0,55
16/X	356	200	1,40	14,60	—	»	0,50
26/X	361	0	0,45	22,10	—	0,50	0,41
Среднее			1,10	17,37	78,80	0,49	0,54
С южной стороны							
28/IX	316	0	0,20	18,16	79,90	0,75	0,59
28/IX	319	0	1,35	25,80	74,76	0,25	0,50
29/IX	324	0	1,20	21,65	79,15	0,25	0,40
29/IX	331	0	0,50	20,40	80,45	Следы	0,58
29/IX	334	0	1,50	22,65	77,65	0,37	0,51
Среднее			0,95	21,73	78,38	0,4	0,51

номерно и с северной стороны руды приходилось больше, чем с южной; кроме того, как было установлено исследованиями прошлых лет, — температура с южной стороны была несколько выше, чем с северной. При настоящем исследовании температура в распаре не измерялась, так как в него нельзя было проникнуть; отверстия в кладке заплывали либо шлаком, либо смесью шлака с чугуном и пробивать их было чрезвычайно трудно.

По этой же причине не забирались и пробы газов из распара.

Пробы материалов с южной стороны забирались только у периферии, с северной же стороны — на расстоянии до 600 мм от кладки печи.

Чугун встречался в распаре в большом количестве и хорошо отделившийся от шлака.

На рис. 64 показан наружный вид чугуна из распара. Чугун — белый, пористый, в пустотах черные налеты. На рис. 65 представлен микроснимок этого чугуна.

На рис. 66 показан внешний вид пробы чугуна № 321. Чугун белый, пористый, в пустотах — черные налеты. Из микроснимка шлифа на рис. 67 видно, что чугун неоднородного состава.

Рис. 68 представляет микроснимок образца чугуна № 340, состоящего из металлической части (80%) с включениями шлака (20%).

Структура металлической части напоминает структуру заэвтектидной стали, но иглы цементита слишком крупны и многочисленны даже для стали предельного состава (1,7% С).

Снимок на рис. 69 относится к образцу чугуна № 345. Структура напоминает структуру предыдущих образцов, но шлака несколько больше и структура металлической части значительно мельче (рис. 70), остальное поле занято металлической массой со сравнительно небольшим количеством округленных шлаковых включений.

Структура отвечает мягкому железу; металла около 85%, шлака около 15%.

На рис. 71 заснят образец № 342. Очень крупный участок шлифа занят неметаллическими включениями. На рис. 72 помимо неметаллических участков видно остальное поле — металлическая масса со сравнительно небольшим количеством округленных шлаковых включений.

Структура (рис. 73) отвечает мягкому железу: шлака 15%, металла 85%.

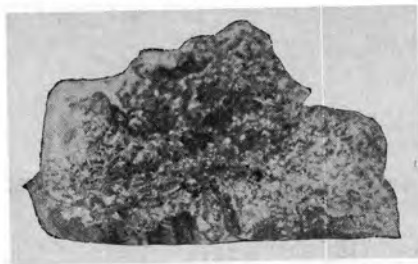


Рис. 64. Внешний вид образца
чугуна, извлеченного из распара



Рис. 65. Микроснимок шлифа

Образец № 321

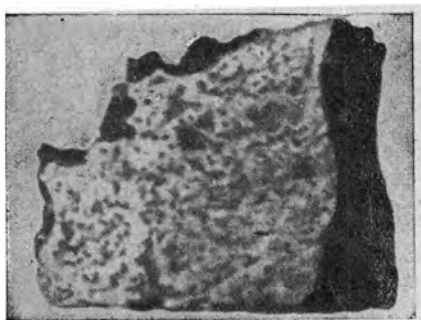


Рис. 66. Внешний вид образца
№ 321 чугуна, извлеченного
из распара

Образец № 321



Рис. 67. Микроснимок шлифа

Образец № 340

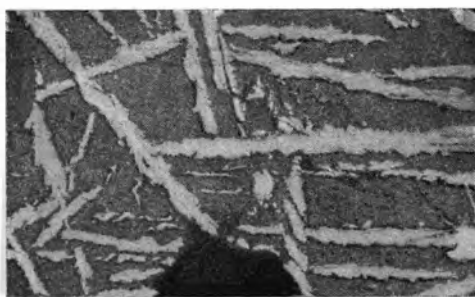


Рис. 68. Образец № 340 чугуна, извлеченного из распара. Микроснимок шлифа

Образец № 345

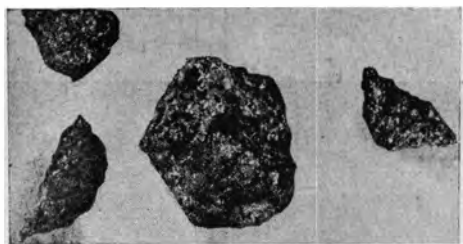


Рис. 69. Внешний вид образца № 345
чугуна, извлеченного из распара

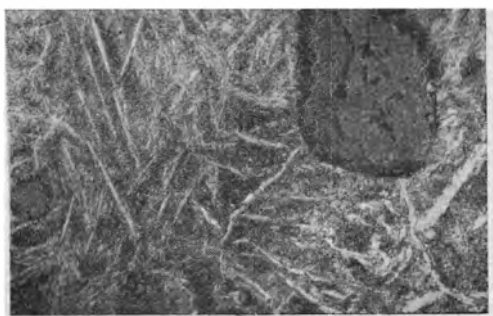


Рис. 70. Микроснимок шлифа.

Образец № 342



Рис. 71. Внешний вид образца
№ 342 чугуна, извлеченного
из распара

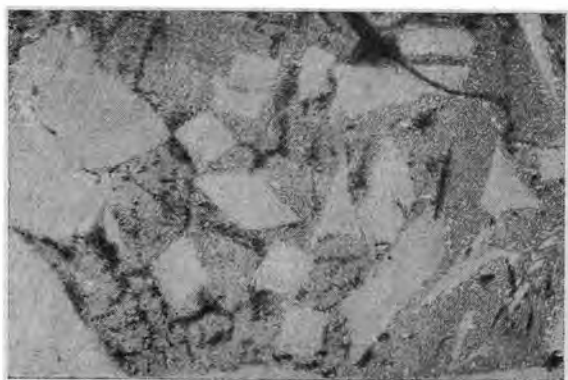


Рис. 72. Микроснимок шлифа с неметаллическими включениями.

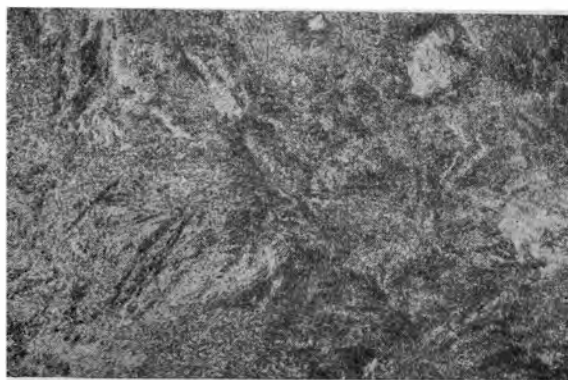


Рис. 73. Микроснимок шлифа мягкого железа.

Кремния и марганца в чугунах из распара было значительно меньше, чем в чугунах из горна. Что касается серы, то в конечном чугунах из горна ее в два раза больше, чем в чугунах из распара (табл. 21).

Таблица 21

Состав чугуна из распара и из горна (%)

	C	Si	Mn	S	P
Чугун из распара:					
с северной стороны	1,57	0,26	0,98	0,022	0,052
с южной стороны	2,64	0,34	1,18	0,036	0,149
Чугун из горна	—	1,14	2,21	0,059	—

На первом горизонте в верхней части шахты восстановление руды находится в начальной стадии; в средней части шахты процесс восстановления идет довольно интенсивно и в нижней части шахты почти заканчивается. В распаре имеется уже обуглероженное железо с некоторым количеством кремния и марганца.

На рис. 74 приведено содержание металлического железа, закиси и окиси железа, а также степень восстановления руды по кислороду на первом, втором и третьем горизонтах и в распаре. Как видно из диаграммы, металлического железа на первом горизонте — 1,43%, на втором — уже 18,47%, на третьем — 67,43% и в распаре — 96,5%, т. е. все железо руды в распаре полностью восстановилось, так как остальное (до 100%) составляет углерод, кремний и марганец.

Закиси железа на первом горизонте — 24,96%, на втором значительно больше — 45,56%, на третьем, вследствие того,

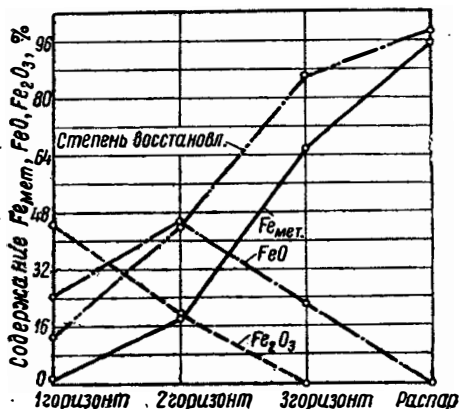


Рис. 74. Среднее содержание Fe_{мет.}, FeO, Fe₂O₃ и степень восстановления (по кислороду) для образцов руд, извлеченных с первого, второго и третьего горизонтов и из распара

что процесс восстановления руды почти заканчивается, — только 22,7%, а в распаре закиси железа уже нет.

Что касается окиси железа, то на первом горизонте ее 45,28%, на втором — только 19,42% и на третьем — так же, как и в распаре, окиси железа нет.

Степень восстановления на первом горизонте — 13,80%, на втором — 44,40%, на третьем — 86,20% и в распаре — 100%.

Приведенные цифры относятся только к руде. Некоторое количество закиси и окиси железа находится в распаре в шлаке. В среднем шлак в распаре с северной стороны содержал 6,19% FeO и 4,58% Fe₂O₃ и с южной стороны — 14,54% FeO и 2,15% Fe₂O₃.

Как показывают анализы, шлак в шахте и в распаре встречается двух видов: маложелезистый и сильножелезистый. Количество того и другого шлака учесть невозможно, так же, как и общее количество его, поэтому выяснить количество железа, находящегося в виде окислов в шлаке, не представляется возможным. Вследствие этого определение степени восстановления ведется только по отнятому кислороду для проб руд, извлекавшихся на различных горизонтах доменной печи.

Таким образом, на первом и втором горизонтах происходит восстановление руды от окиси железа до магнитной окиси и закиси железа, с одновременным восстановлением, хотя и в небольшой части, до металлического железа.

Как показывают анализы проб руд и микроснимки шлифов их, процессы восстановления протекают как в кусках руд, так и в мелочи таким образом, что одновременно присутствуют все степени окисления от Fe₂O₃ до Fe. Строгая последовательность в переходе от низшего окисла к высшему не соблюдается. В кусках руд последовательность сохраняется в том отношении, что у поверхности руда больше восстановлена, а в центре меньше. Микроснимки шлифов показывают, что в любом микроучастке образца руды находится железо одновременно в различных видах окисления. Таким образом, процессы восстановления из окиси железа в магнитную окись, магнитной окиси в закись и закиси железа в металлическое железо протекают одновременно, но на различных горизонтах в различной степени, в зависимости от температурных условий, следовательно, и от состава газовой фазы.

На рис. 75 представлено относительное содержание железа в виде металлического, закисного и окисного и степень восстановления на первом, втором и третьем горизонтах и в распаре.

На первом горизонте относительное содержание металлического железа — 2,7%, закисного — 37%, окисного — 60,3%. На втором горизонте металлического железа уже 27,37%; количест-

во закисного железа здесь также значительно возрастает по сравнению с первым горизонтом и достигает 52,55%. Поэтому окисного железа на втором горизонте меньше — всего лишь 20,08%.

На третьем горизонте металлического железа уже 79,2%, поэтому закисного железа здесь значительно меньше, чем на втором горизонте, и даже меньше, чем на первом горизонте, — всего лишь 20,8%. Окисного железа на третьем горизонте нет. В распаре присутствует только металлическое железо.

Шлаки из распара — как с северной, так и с южной стороны — извлекались в большом количестве, причем по внешнему виду они в большинстве очень мало отличались от конечного шлака из горна.

Наряду со шлаками, содержащими много закиси железа (до 32%), находились шлаки, которые содержали ее только 1,3%.

Полные анализы шлаков приведены в табл. 19. Шлаки по внешнему виду — плотные, светлосерые и темносерые. В периферийной части закиси железа несколько больше и окиси железа несколько меньше, чем в остальных точках за периферией по направлению к оси печи.

Для сравнения (табл. 22) приведен средний состав шлака из распара с северной и южной сторон и конечного шлака из горна без окислов железа. Изменения в составе шлака из распара по радиусу незначительны, и шлак близок к конечному шлаку из горна. Только кремнезема в шлаках из распара несколько больше и, в соответствии с этим, извести и глинозема меньше, чем в шлаке из горна. Что касается магнелии и закиси марганца, то их в шлаке из распара больше, чем в конечном шлаке. Наконец, серы в шлаке из распара меньше, чем в конечном шлаке.

Шлак из распара с южной стороны несколько отличается от шлака из распара с северной стороны, в нем меньше кремнезема и значительно больше извести.

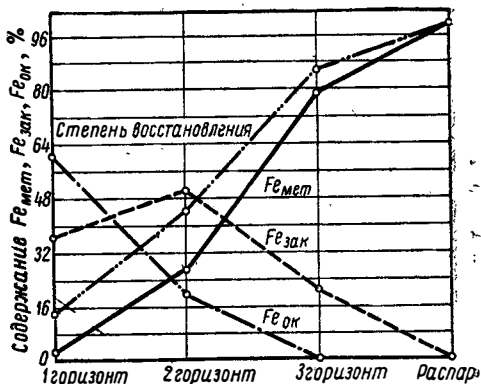


Рис. 75. Среднее относительное содержание металлического, закисного и окисного железа, а также степень восстановления (по кислороду) для образцов руд, извлеченных с первого, второго и третьего горизонтов и из распара.

Таблица 22

Средний состав шлака из распара и из горна (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S
Шлак из распара:						
с северной стороны	38,20	17,75	29,80	6,32	7,62	0,31
с южной стороны	35,79	14,27	38,02	5,87	5,94	0,11
Шлак из горна . . .	36,4	19,65	35,1	4,70	3,21	0,91

В соответствии с этим распределяются и другие составляющие.

На рис. 76 указан средний состав шлака (без закиси и окиси железа) со второго и с третьего горизонтов, из распара (северной стороны) и из горна. Из сопоставления состава шлаков на различных горизонтах видно, что первичный шлак на втором горизонте по содержанию кремнезема очень мало отличается от конечного шлака из горна. Несколько больше, но также незначительно, отличается этот шлак по содержанию глинозема — всего лишь в пределах 4%. Что же касается извести, то первичный шлак резко отличается от конечного шлака из горна. Так, если в первичных шлаках извести только 23%, то в конечном шлаке из горна извести 35,12%, т. е. в полтора раза больше.

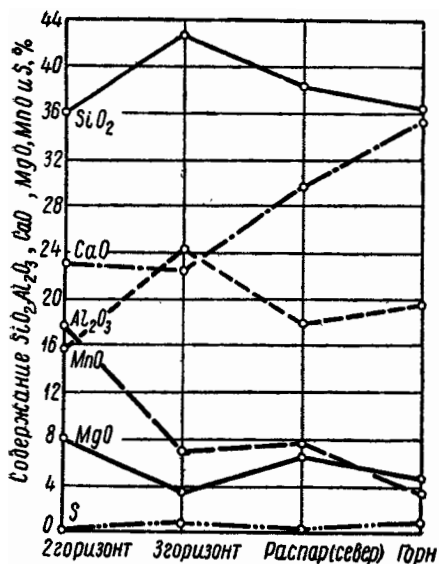


Рис. 76. Средний состав шлака (после исключения FeO и Fe₂O₃) из второго и третьего горизонтов, распара и горна

Содержание магнeзии в первичном шлаке несколько отличается от конечного шлака: в первичном шлаке магнeзии почти в два раза больше, чем в конечном, — 7,9% против 4,69%.

Резко отличен первичный шлак от конечного и по содержанию марганца. Так, если в первичном шлаке закиси марганца 17,47%, то в конечном шлаке в пять с лишним раз меньше —

только 3,25%. Что же касается серы, то в первичном шлаке ее только 0,07%, а в конечном шлаке — 0,91%.

Из сопоставления состава первичных и конечных шлаков видно, что первичные шлаки более кислы, чем конечные, и содержат по сравнению с конечными во много раз больше закиси марганца.

Шлак на третьем горизонте значительно отличается от шлака второго горизонта главным образом тем, что в нем резко изменилось количество закиси марганца. Но, как ни странно, количество извести в шлаке в связи с этим не увеличилось, а даже несколько уменьшилось и, вследствие этого, шлак на третьем горизонте стал еще больше кислым, чем на втором горизонте.

Шлак из распара по своему составу приближается к конечному шлаку и является промежуточным между шлаком с третьего горизонта и конечным шлаком из горна.

Наличие среди первичных шлаков как железистых, так и маложелезистых находится в некотором противоречии с установившимся взглядом, по которому первичные шлаки, т. е. шлаки, образующиеся в шахте и распаре доменной печи, должны быть сильно железистыми, так как такие шлаки и представляются наиболее легкоплавкими и жидкотекучими. Существуют легкоплавкие шлаки примерно кислые, которые могут плавиться при температуре 1165° [57], но они, даже при значительно более высокой температуре, не обладают текучестью.

Силикаты железа, как наиболее легкоплавкие и жидкотекучие, плавятся при температурах, близких к 1300°. Так, чистый fayalit ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) плавится при температуре 1350° [58], а эвтектика его с SiO_2 — при 1260° и эвтектика с FeO — при 1240°.

Вязкость натуральных магнитогорских доменных шлаков была исследована И. П. Семиком [59], установившим, что конечные шлаки Магнитогорского завода при температуре 1300° либо мало текучи, либо совершенно не текучи. Увеличение содержания как закиси марганца, так и магнезии, согласно исследованиям И. П. Семика, приводит к резкому понижению вязкости магнитогорских шлаков. Высоким содержанием марганца и повышенным магнезии и объясняется подвижность маложелезистых магнитогорских первичных шлаков, более кислых, чем конечные шлаки.

М. Я. Остроухов [60] исследовал вязкость первичных доменных шлаков Магнитогорского завода и пришел к выводу, что добавка магнезии оказывает разжижающее действие на глиноземистые шлаки, добавка 10% закиси железа уменьшает вязкость их в 2—3 раза, подобным же образом действует и закись марганца.

В первичных доменных шлаках, как показывают анализы, присутствуют окись железа, некоторое количество углерода

и металлическое железо; все они в сильной степени изменяют вязкость шлаков. Продувка газами, идущими снизу вверх, также оказывает свое действие. Поэтому лабораторные исследования вязкости шлака, не учитывающие влияния этих факторов, могут дать лишь весьма отдаленный ответ о вязкости натуральных первичных шлаков, образующихся в шахте и распере доменной печи.

В заключение необходимо еще раз отметить, что первичные шлаки могут быть и маложелезистыми и вполне подвижными, и стадия образования в доменной печи первичных легкоплавких и жидкотекучих шлаков, содержащих силикаты железа, — не обязательна.

Процессы восстановления, как показали исследования доменной печи № 1 Магнитогорского завода, могут происходить в куске руды, включая и стадию восстановления FeO до Fe . Пустая порода руды, плавясь и образуя шлак, своевременно отделяющийся от недовосстановленной еще руды, способствует нормальному протеканию процессов восстановления.

ГЛАВА 5

ИЗУЧЕНИЕ ХОДА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 3 КОМБИНАТА ЗАПОРОЖСТАЛЬ

Доменная печь № 3 комбината Запорожсталь, задутая 1 мая 1938 г., в период исследований была самой большой по полезному объему печью в мире (1300 м³). Исследование такой сверхмощной доменной печи представляло большой теоретический и практический интерес. Оно заключалось в определении состава газа и измерении температуры и давления его с одновременным изучением хода процессов восстановления на различных горизонтах от колошника до горна. Для проведения всех научно-исследовательских работ в период строительства доменной печи были запроектированы и сделаны отверстия в кожухе и кладке и установлены площадки на различных горизонтах в шахте и в распаре. На рис. 77 приведены профиль и размеры печи и расположение площадок для исследований. Отверстия сделаны на пяти горизонтах.

Нулевой горизонт — два отверстия над уровнем засыпи со стороны подъемника и пылеуловителя под углом в $28^{\circ}10'7''$ к ним, на 410 мм ниже нижнего положения конуса или на 26 990 мм выше оси чугунной летки.

Первый горизонт — три отверстия под уровнем засыпи в верхней части шахты: со стороны подъемника, чугунной летки и пылеуловителя. Все три отверстия — на 24 150 мм выше оси чугунной летки.

Второй горизонт — два отверстия в средней части шахты: со стороны подъемника и пылеуловителя, на 18 090 мм выше оси чугунной летки.

Третий горизонт — три отверстия в нижней части шахты: со стороны подъемника, чугунной летки и пылеуловителя, на 12 150 мм выше оси чугунной летки.

Четвертый горизонт — два отверстия в распаре: под подъемником и со стороны пылеуловителя, на 7160 мм выше оси чугунной летки.

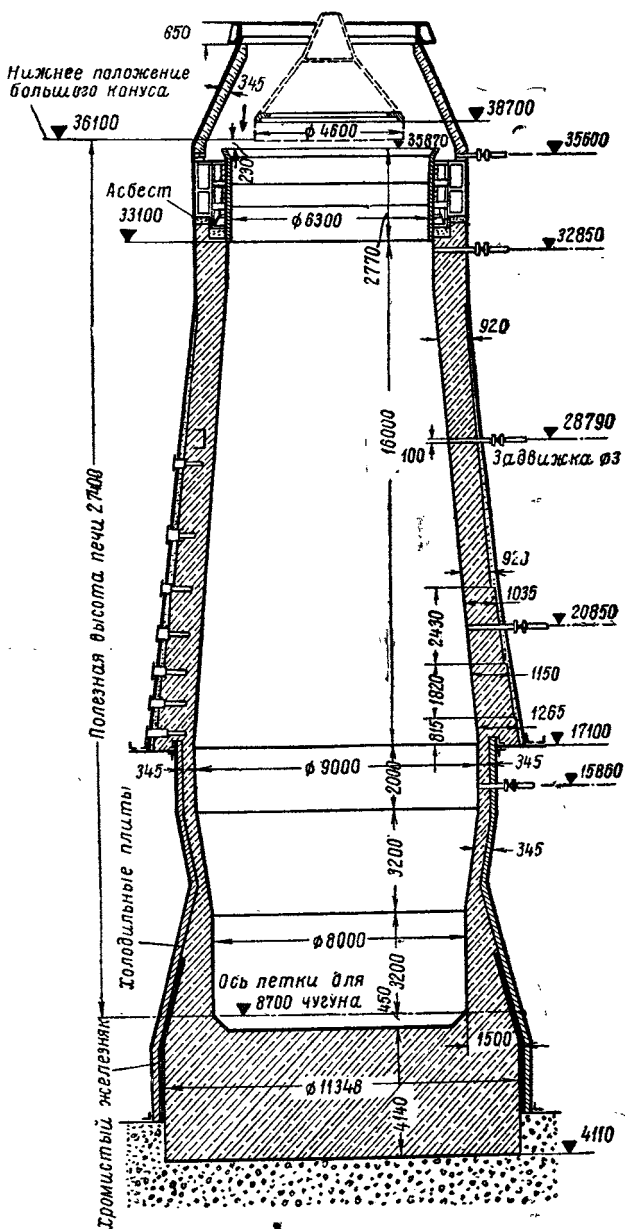


Рис. 77. Профиль и размеры доменной печи
 № 3 Запорожстали и расположение площадок
 для исследований

Исследования в горне велись через форму № 7, расположенную по отношению к чугунной летке под углом в $146^{\circ}10'$, а по отношению к оси подъяемника в $135^{\circ}10'7''$.

Руда, подававшаяся в печь № 3, была повышенной кусковатости и с меньшим процентом мелочи, чем подававшаяся в печи № 1 и 2. По мере поступления на рудный двор руда сортировалась на категории: грохоченая, 1, 2, 3 и 4-го сорта. Каждый сорт руды различался по процентному соотношению кусков и мелочи. В табл. 23 приводятся средние результаты анализа руды, проплавленной в доменной печи № 3 в период исследований.

Таблица 23

Средние результаты анализа руды, %

Состав руды	Анализ руд								
	1-й сорт			2-й сорт			Грохоченая		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Fe _{общ}	61,12	61,35	59,60	53,68	59,43	58,93	56,75	58,06	57,40
FeO	4,71	4,75	2,29	4,29	0,32	0,86	0,63	1,03	0,83
Fe ₂ O ₃	81,70	82,13	82,51	71,99	84,34	83,25	80,35	81,60	80,97
SiO ₂	10,64	10,25	13,20	14,12	—	11,91	8,26	10,70	9,48
Al ₂ O ₃	2,07	2,41	1,25	—	—	3,34	—	6,06	—
CaO	Следы	Следы	Следы	—	—	Следы	—	Следы	—
MgO	0,31	0,08	0,12	—	—	0,25	—	0,25	—
MnO	0,22	0,14	0,34	—	—	0,14	—	0,12	—
P ₂ O ₅	0,09	0,09	0,17	—	—	0,19	—	0,18	—

Анализ грохоченой руды показывает значительно большее содержание глинозема в ней, чем в остальных сортах; объясняется это загрязнением пробы глиноземистой породой.

В шихту на передельный чугун, который выплавляла доменная печь № 3, в качестве добавок давали марганцевую руду и мартеновский шлак. Состав марганцевой руды приводится в табл. 24.

Состав мартеновского шлака был следующий: 20,40% SiO₂; 16,80% Al₂O₃; 15,67% Fe₂O₃; 15,75% Mn₃O₄; 25,0% CaO; 1,58% P₂O₅; 0,58% SO₃; 4,78% MgO.

В качестве флюса применялся известняк, содержащий 54—55% CaO; 0,6—0,7% MgO; 0,4—1,3 SiO₂; 43—44% CO₂.

Т а б л и ц а 24

Состав марганцевой руды

Составляющие	Анализ, %		
	I	II	III
Mn	48,58	48,59	50,78
Fe	0,14	0,14	0,14
FeO	0,95	0,12	0,18
Fe ₂ O ₃	8,53	7,64	8,24
SiO ₂	19,42	20,70	17,11
Al ₂ O ₃	2,08	1,42	1,66
CaO	3,92	4,87	4,88
MgO	1,80	2,03	1,91
MnO	62,29	62,30	65,10
P ₂ O ₅	0,87	0,78	0,78

Известняк, как видно по химическим анализам, был хорошего качества. Недостатком его являлось наличие крупных кусков (до 150—200 мм в диаметре), попадавшихся наряду с мелкими кусками вследствие того, что вовсе не применялось дробление. При образовании глубоких воронок на колошнике крупные куски известняка во время загрузки скатываются к оси печи, создавая неравномерное распределение флюса по сечению колошника и несколько увеличивая количество углекислоты в колошниковом газе у осевой части печи:

Кокс, загружавшийся в доменную печь, в основном был удовлетворительного качества. Замусоривания горна, а также расстройств хода в доменной печи из-за качества кокса за все время исследований не наблюдалось. Куски кокса до 40 мм в поперечнике отсеивались на гризли и в доменную печь не попадали. Состав кокса характеризуется данными табл. 25.

Т а б л и ц а 25

Состав кокса (%)

Составляющие	Анализ		
	I	II	III
Зола	9,50	8,10	8,90
Летучие	1,90	2,24	1,85
Сера	1,33	1,21	1,30

Состав золы кокса приведен в табл. 26.

Таблица 26

Состав золы кокса (%)

Анализ	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	S	P ₂ O ₅
I	39,85	28,64	23,70	0,65	3,03	2,05	1,45	0,31
II	38,47	28,34	24,13	0,65	3,90	2,00	1,30	0,33

Состав шихты при работе на передельный чугун (октябрь 1938 г.) указан в табл. 27.

Таблица 27

Состав шихты (кг)

Руда железная, 1-й сорт	Руда железная, 2-й сорт	Руда железная грохоч.	Руда марганцевая	Марте-новский шлак	Известняк	Скрап	Кокс
10 000—11 000	5500	2000	1200	1500—2000	5200—6200	1500	10 000

Нагрев дутья, как правило, держался около 700—750°, изредка опускаясь до 650°, а в отдельных случаях поднимался до 800°. Количество дутья по показаниям приборов перед воздухонагревателями достигало 2300—2500 м³/мин, реже—2100—2200 м³/мин. Давление дутья менялось в пределах 1,25—1,3 ати, иногда доходило до 1,4 ати. Печь за весь период исследований работала исключительно ровно, было лишь несколько случаев подвисаний и один раз давление дутья поднялось до 1,9 ати.

Содержание кремния в чугуне, как правило, колебалось в пределах 0,5—0,9%, марганца—2,0—3,0%, серы—0,04—0,08%. Только в октябре 1938 г. был период, когда кремния в чугуне было 0,2—0,3% при нормальном содержании марганца и серы, причем чугуны с таким низким содержанием кремния были все же настолько физически горячими, что при выпуске не было никаких осложнений и закосление канав и ковшей было не больше обычного. Если бы доменная печь все время устойчиво выплавляла чугуны с пониженным содержанием кремния (около 0,2—

0,3%) и нормальным содержанием серы (до 0,08%), то можно было бы считать ее работу вполне совершенной.

Шлаки при работе на передельный чугун по содержанию основных составляющих — кремнезема и извести — были весьма постоянны; содержание кремнезема в них колебалось в пределах 36—39%, а извести — 39—42%.

Состав шлаков характеризуется табл. 28.

Состав шлаков (%)

Таблица 28

Анализ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	FeO	S
I	39,30	13,89	39,81	1,87	5,00	0,60	2,00
II	38,80	13,68	38,50	—	6,16	0,45	1,98
III	37,60	—	40,32	—	—	—	—
IV	36,20	—	40,00	—	—	—	—
V	38,10	—	39,25	—	—	—	—

После задувки доменной печи № 3 довольно быстро был достигнут нормальный расход кокса, при пониженной производительности печи. В табл. 29 приведены данные о среднесуточной производительности и расходе кокса по месяцам за период исследований.

Таблица 29

Показатели	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь (15 дней)
Производительность, т	1078	1278	1210	1235	1111,4	1236
Расход кокса т/т чугуна . .	0,879	0,84	0,83	0,824	0,821	0,889

Если по расходу кокса работу доменной печи можно считать удовлетворительной, то производительность ее была значительно меньше возможной. За исключением июня, не выполнялся даже значительно заниженный план (1260 т/сутки). Пониженная производительность не зависела от печи или механизмов, непосредственно ее обслуживающих. Простои, как правило, были совершенно незначительны. Производительность печи ограничивали недостаток ковшей для уборки чугуна и шлака и главным образом плохая организация ковшевого и разливочного хозяйства. Были случаи, когда от выпуска до выпуска

проходило до четырнадцати часов, вместо нормальных четырех. В те дни, когда ничто не мешало работе печи, свободно выплавлялось 1500 т чугуна в сутки.

Необходимо отметить, что благодаря ровному ходу печи вынос пыли очень часто составлял 3—4% от веса загружаемой руды, редко повышаясь до 10—15%. Расход руды и вынос пыли на единицу чугуна характеризуются показателями, приведенными в табл. 30.

Таблица 30

Расход руды и вынос пыли (на единицу чугуна)

	Май	Июнь	Июль	Сентябрь
Васход руды	1,754	1,750	1,709	1,716
Вынос пыли	0,112	0,136	0,114	0,082

Состав газа по газоотводам

Сразу же после задувки печи регулярно забирались пробы колошниковога газа из каждого из четырех газоотводов. С июля брались, кроме того, пробы газа из пылеуловителя. При этом сразу было замечено, что газ из пылеуловителя всегда содержал на 1—2% углекислоты больше, чем из газоотводов; водорода также было несколько больше. Повышенное содержание углекислоты объясняется присутствием паров воды в колошниковом газе и ходом восстановительных реакций с рудной пылью на пути из колошника в пылеуловитель.

В табл. 31 приведены данные о составе колошниковога газа за отдельные месяцы.

Таблица 31

Состав колошниковога газа (%)

Газоотводы	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	Темпера- тура, °С					
						CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	Темпера- тура, °С
	Июль					Август				
1	12,5	28,6	2,4	0,34	215	11,0	28,6	2,2	0,34	207
2	13,6	26,7	2,5	0,30	180	13,8	26,2	2,2	0,31	200
3	13,1	27,7	2,4	0,30	195	12,6	27,4	2,3	0,31	230
4	13,2	28,1	2,5	0,31	220	13,1	28,3	2,3	0,36	230
Пылеу- ловитель	13,9	27,0	2,4	0,26	—	14,0	27,0	2,2	0,28	—

Продолжение табл. 31

Газоотводы	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	Температура, °C	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	Температура, °C
Сентябрь					Октябрь					
1	13,3	27,7	2,0	0,29	205	11,0	30,0	1,7	0,2	245
2	13,7	27,0	2,0	0,28	175	11,0	29,4	1,8	0,2	200
3	13,8	27,1	2,0	0,30	165	12,0	28,9	1,9	0,2	35
4	13,6	17,5	2,0	0,28	190	11,6	29,8	1,8	0,2	245
Пылеуловитель	—	26,0	2,2	0,27	—	12,9	28,6	2,0	0,2	—

Среднее

Газоотводы	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	Температура, °C
1	11,7	28,85	2,10	0,30	210
2	13,0	27,60	2,16	0,28	180
3	12,8	27,85	2,16	0,28	190
4	12,4	28,70	2,16	0,29	220
Пылеуловитель	13,0	27,10	2,20	0,25	—

Необходимо отметить, что содержание углекислоты из пылеуловителя за сентябрь в таблице не приведено. Оно составляло 16%, что объясняется неисправностью вентиля, пропускавшего пар в газоотвод.

В первые дни после задувки в колошниковом газе было около 5—6% углекислоты. Содержание ее к 10 мая поднялось до 8—9%, а в отдельных случаях достигало даже 10—11%, к 15 мая — увеличилось в большинстве проб до 12% и лишь в немногих — до 10—11%, к 20 мая — поднялось до 13—14%. Так как обычно при работе доменных печей на криворожских рудах в колошниковом газе бывает не больше 12% углекислоты, то 13—14% ее на 20 мая, т. е. спустя 20 дней после задувки, свидетельствует о хорошей работе газов в доменной печи. Действительно, расход кокса сразу же после задувки стал резко снижаться и к указанному времени был равен 0,85. В июне, июле, августе и сентябре содержание углекислоты в колошниковом газе колебалось в пределах 13—14%. Лишь в октябре

оно уменьшилось до 10—12%, что объясняется ухудшением работы печи и несколько повышенным расходом кокса в результате начавшегося разгара кладки.

Колебания в содержании углекислоты по газоотводам, как правило, составляли 1—2 и редко 3%. Установить в этом отношении какую-либо закономерность трудно. Колебания в сторону максимума и минимума наблюдались по всем газоотводам, причем в газе из первого и четвертого газоотводов, между которыми находится чугунная летка, почти всегда содержалось на 0,5—1% CO_2 меньше, чем в газе из третьего и второго газоотводов. Содержание водорода в колошниковом газе колебалось в пределах 2—2,2%.

Первый горизонт

Первый горизонт расположен в верхней части шахты непосредственно под уровнем засыпи, на 24-150 мм выше оси чугунной летки. Исследования на первом горизонте, как и на остальных двух, в шахте, равно как и в распаре, производились со стороны пылеуловителя, расположенного против подъемника.

На первом горизонте были взяты пробы газа по радиусу от периферии к оси печи (табл. 32), измерены температуры и давление газов (табл. 33 и 34) и взяты пробы материалов. Полные анализы материалов приведены в табл. 35. По выведенным средним показателям вычерчены кривые содержания CO_2 и CO в различных точках от периферии к оси печи (рис. 78). Для сравнения здесь же тонкими линиями приведены аналогичные данные по доменной печи № 1 Магнитогорского завода. Минимум углекислоты (6,4%) находится у стен шахты, затем по направлению к оси печи содержание ее непрерывно увеличивается, но с разной скоростью: на расстоянии первого метра — от 6,4 до 14,5% — почти в 2,5 раза, далее к оси печи — 1—2% на каждый метр. Максимум содержания углекислоты (18,7%) находится у оси печи, на расстоянии 3500 мм от кладки шахты.

Столь большая разница в содержании углекислоты на периферии (6,4%) и у оси (18,7%) свидетельствует о том, что поток газов идет главным образом в периферийной зоне печи и что у оси движение газов замедлено. Вместе с тем в периферийной зоне происходит и наиболее быстрое опускание материалов. Все это вызывается тем, что периферия колошника в доменной печи № 3 (как и во всякой большой печи) находится над окислительной зоной горна. Кроме того, при значительном количестве кусковых материалов в рудной колоше и до-

Таблица 33

Температура газов на первом горизонте

Расстояние от кладки мм	Температура, °С	Средняя, °С
0	580; 560; 500; 520; 550	540
100	520; 640; 630; 540	580
250	550; 540; 500; 510; 530; 620; 610	555
350	510; 520	515
500	500; 490; 470; 480; 500; 560; 580	510
600	500; 510	505
750	460; 450; 450; 460; 470; 410; 430	445
1000	390; 400; 420; 430; 400; 320; 340	385
1250	380; 370; 400; 410; 280; 300	355
1500	350; 360; 380; 390; 240; 230	325
1750	320; 330; 360; 350; 210; 220; 380	310
2000	300; 290; 350; 340; 370; 230; 240; 320	305
2250	280; 300; 310; 300	300
2500	300; 280; 290; 290; 310	295
2750	320; 280; 290	295
3000	300; 290; 280; 280; 320; 300	295

мелочь ложится преимущественно у периферии, но значительная часть попадает в зону, расположенную у оси печи. В результате скопления некоторого количества руды у оси печи и медленного движения газов содержание углекислоты в газе этой зоны (18,7%) в три раза больше, чем у стен шахты.

Таблица 34

Давление дутья перед воздухонагревателями и давление газов на первом горизонте

Расстояние от кладки мм	Давление дутья перед воздухонагревателями, <i>ати</i> и мм рт. ст.										Среднее, <i>ати</i> и мм рт. ст.	Давление газов на первом горизонте, мм рт. ст. и % от давления дутья перед воздухонагревателями										Среднее, мм рт. ст. и % от давлени- я дутья перед возду- хонагревателями
	1,31 968	1,36 1000	1,31 963	1,36 1000	1,32 970	1,35 993	1,35 993	1,22 897	1,40 1029			150 15,6	160 16,0	150 16,3	155 15,5	140 14,8	130 13,1	140 14,1	120 14,5	150 14,5		
0	1,31 968	1,36 1000	1,31 963	1,36 1000	1,32 970	1,35 993	1,35 993	1,22 897	1,40 1029		1,33 977	150 15,6	160 16,0	150 16,3	155 15,5	140 14,8	130 13,1	140 14,1	120 14,5	150 14,5		144 14,9
250	1,31 963	1,37 1007	1,31 963	1,36 1000	1,32 970	1,35 993	1,35 993	1,22 897	1,42 1045		1,335 980	140 14,6	150 15,4	150 16,3	155 15,5	135 13,9	135 13,6	135 13,6	120 14,5	160 15,3		143 14,7
500	1,30 955	1,37 1007	1,31 963	1,38 1015	1,32 970	1,34 985	1,37 1007	1,22 897	1,40 1029		1,33 977	135 14,2	155 15,4	150 16,3	170 16,6	130 13,4	150 15,2	150 14,9	120 14,5	155 15,0		146 15,1
750	1,29 948	1,37 1007	1,31 963	1,38 1015	1,33 977	1,34 985	1,37 1007	1,24 911	1,40 1029		1,33 977	150 18,0	155 15,4	140 14,2	170 16,6	125 12,8	145 14,7	150 14,9	130 14,3	155 15,0		147 15,1
1000	1,28 941	1,36 1000	1,32 970	1,40 1029	1,33 977	1,33 977	1,37 1007	1,25 918	1,40 1029		1,335 980	145 15,4	155 15,5	130 13,1	180 17,5	120 12,4	140 14,4	150 14,9	135 14,7	155 15,0		146 14,8
1250	1,28 941	1,35 993	1,32 970	1,42 1045	1,32 970	1,32 970	1,40 1029	1,26 926	1,42 1045		1,34 985	145 15,4	150 15,1	130 13,1	200 19,1	120 12,5	170 17,5	180 17,5	150 16,2	160 15,3		155 15,7
1500	1,27 933	1,33 977	1,32 970	1,42 1045	1,32 970	1,33 977	1,39 1022	1,26 926	1,42 1045		1,335 980	140 15,0	145 14,8	125 12,5	200 19,1	120 12,5	190 19,4	170 16,7	150 16,2	160 15,3		155 15,7
1750	1,28 941	1,33 970	1,34 985	1,42 1045	1,34 985	1,33 977	1,38 1015	1,26 926	1,42 1045		1,34 985	165 17,5	170 17,4	125 12,4	200 19,1	150 15,2	145 14,8	160 15,8	150 16,2	160 15,3		158 15,9

Расстояние от кладки мм	Давление дутья перед воздухонагревателями атм и мм рт. ст.										Среднее, ати и мм рт. ст.	Давление газов на первом горизонте, мм рт. ст. и % от давления дутья перед воздухонагревателями										Среднее, мм рт. ст. и % от дав- ления дутья перед возду- хонагревате- лями
2000	1,28 941	1,31 964	1,34 985	1,42 1045	1,34 985	1,34 985	1,39 1022	1,28 941	1,48 1088	1,345 990	165 17,5	155 16,1	120 12,0	200 19,1	160 16,3	155 15,7	185 18,1	190 20,2	205 18,8	170 17,1		
2250	1,28 941	1,29 948	1,36 1000	1,42 1045		1,34 985	1,40 1029	1,28 941	1,47 1080	1,35 993	170 18,1	155 16,3	170 16,6	200 19,1		145 14,7	190 18,4	185 19,6	200 18,5	177 17,7		
2500	1,28 941	1,29 948	1,36 1000			1,32 993	1,40 1029	1,26 926	1,49 1095	1,34 985	175 18,6	165 17,4	170 16,6		150 15,1	190 18,4	160 17,3	215 19,6	175 17,7			
2750	1,28 941	1,29 948	1,37 1007		1,33 977			1,26 926	1,48 1088	1,34 985	190 20,2	170 17,9	175 17,0	140 14,8				160 17,3	210 19,3	174 17,7		
3000		1,27 933	1,35 933					1,26 926		1,32 970		170 18,4	175 17,0					150 16,2	165 17,2			
3250		1,27 933	1,34 985					1,26 926		1,29 941		165 17,7	175 17,0					150 16,2	163 17,0			
3500		1,28 941						1,26 926		1,27 934		170 18,0						150 16,2	160 17,2			
3750		1,28 941								1,28 941		16,5 17,4							16,5 17,4			

Таблица 35

Состав руды на первом горизонте

№ пробы	Расстояние от кладки мм	Химический состав, % после пересчета на 100 и исключения С												Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по количеству окисленного железа, %
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P ₂ O ₅	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	
500	0—300	17,25	62,98	9,55	51,50	19,18	11,01	4,43	2,34	0,29	1,26	0,28	0,16	15,3	68,7	21,2	36,4
503	0—300	20,42	59,26	2,36	35,39	42,03	11,54	5,93	1,24	0,35	0,73	0,26	0,17	4,0	46,5	49,5	19,0
504	0—300	13,67	57,51	12,91	51,98	5,79	13,54	5,70	4,33	0,70	4,44	0,40	0,21	22,4	70,5	7,1	46,5
505	0—300	18,20	49,59	1,49	20,79	45,51	15,28	5,68	5,58	0,76	4,16	0,54	0,21	3,0	32,7	64,3	13,2
506	0—300	11,41	30,84	0,12	14,46	27,77	—	—	—	—	—	—	—	0,4	36,5	63,1	11,7
507	0—300	11,95	44,47	3,75	49,35	3,32	18,10	6,45	13,63	0,87	3,90	0,45	0,18	8,3	86,5	5,2	37,8
508	0—300	22,64	60,00	1,77	19,60	61,34	7,79	5,73	2,11	0,34	0,83	0,25	0,24	2,95	25,5	71,55	10,8
510	500—800	21,81	54,14	0,12	12,37	63,46	9,93	6,13	3,38	0,45	3,63	0,34	0,19	0,2	17,8	82,0	4,9
511	500—800	13,47	54,10	2,70	32,87	37,00	13,94	5,10	3,44	0,60	3,84	0,30	0,21	5,0	47,2	47,8	20,4
513	500—800	27,52	66,60	0,22	8,60	85,30	4,24	0,54	0,25	0,33	0,19	0,14	0,19	0,3	10,0	89,7	2,4
514	500—800	17,78	60,47	5,37	48,20	24,68	14,03	2,44	3,52	0,57	0,64	0,31	0,24	8,9	62,5	28,6	29,8
515	500—800	16,85	58,77	6,10	50,20	19,32	13,34	3,02	4,40	0,69	2,44	—	—	10,4	66,6	23,0	32,8
516	1000—1300	10,54	62,25	27,83	38,10	6,86	12,68	3,43	7,62	0,59	2,42	0,24	0,23	44,6	47,7	7,7	60,7
518	1000—1300	18,40	59,33	8,13	32,80	36,80	14,86	2,29	2,84	0,37	1,49	0,21	0,21	13,6	43,1	43,3	27,7
520	0—300	20,20	63,88	4,98	44,90	35,00	9,18	4,73	Следы	1,06	0,79	—	0,16	7,8	53,8	38,4	25,5
521	0—300	18,67	65,83	7,13	56,81	20,56	9,51	2,04	»	1,70	2,09	—	0,16	10,9	67,2	21,9	33,6
Среднее по горизонту		18,22	58,66	6,29	36,84	33,75	11,93	4,24	3,64	0,64	2,19	0,30	0,18	10,7	49,0	40,3	26,9

В магнитогорских доменных печах (рис. 78, тонкие линии) при любой величине колоши нельзя было заметить явления, подобно наблюдавшемуся на доменной печи № 3 Запорожстали. Максимум содержания углекислоты всегда приходится на промежуточную часть между периферией и осью колошника.

Магнитогорская руда — сильно глиноземистая, влажная и малоподвижная (где упадет, там и лежит), тогда как криворожская, по сравнению с магнитогорской, — сухая, сыпучая, подвижная. Считать, что в больших доменных печах при любых обстоятельствах руда не может попасть к оси широкого колошника, — значит совершенно не учитывать условий работы этих печей на различных рудах. Кривой, характеризующей содержание углекислоты в газе магнитогорских печей, соответствует кривая содержания окиси углерода; она является почти зеркальным отражением первой кривой, что подтверждает все изложенное.

Как видно из рис. 78, максимальная температура газов у периферии печи № 3 доходила до 580°. В области первого горизонта наблюдалась в шахте небольшая насталь. По направлению к оси печи температура понижалась по довольно плавной кривой и на расстоянии 3000 мм от кладки печи доходила до 295°. Распределение температур находится в полном соответствии с составом газа: максимальные температуры там, где минимум углекислоты, где сосредоточивается газовый поток и где происходит неполное использование химической и физической энергии газов; минимальные температуры там, где максимум углекислоты.

На рис. 78 показана и кривая давления газов в процентах от давления дутья перед воздухонагревателями. Кривая эта для всех горизонтов представлена в процентах потому, что абсолютные величины давлений дутья перед воздухонагревателями

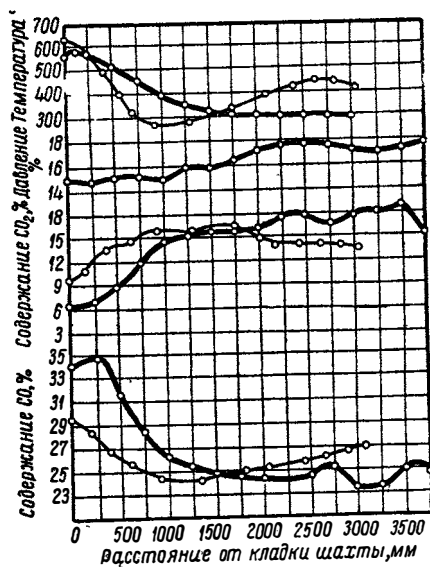


Рис. 78. Состав, давление и температура газа на первом горизонте доменной печи № 3 Запорожстали (тонкие линии — то же для печи № 1 Магнитогорского завода).

и давлений газов в шахте значительно изменяются иногда во время одного измерения, в зависимости от сопротивления столба материалов в каждый отдельный момент. Выраженная же в процентах кривая дает устойчивую картину падения давления газов на их пути до того места, где производились измерения. У стен шахты давление составляет 14,9%, постепенно повышаясь к оси до 17%. Колебания в давлении в отдельных точках по радиусу объясняются неоднородностью столба опускающихся материалов.

Наряду с отбором проб газа, измерением температур и давлений, производился отбор проб материалов на первом горизонте. На рис. 79 даны кривые изменения состава руды по мере опускания ее от колошника до распара. На рис. 80 приведены для большей наглядности те же данные, пересчитанные без пустой породы руды, — по изменению содержания металлического железа, закиси и окиси железа, а также степень восстановления по кислороду.

Из этих рисунков видно, что сырая руда, загружаемая в доменную печь (она обозначена на нулевом горизонте рис. 79 и 80), содержит: 0,10% $Fe_{мет}$ (величина, которой можно пренебречь), 2,18% FeO , 80,99% Fe_2O_3 при 58,4% $Fe_{общ}$. Пустая порода содержит: 10,95% SiO_2 , 5,05% Al_2O_3 , следы CaO , 0,42% MgO , 0,15% MnO и 0,16% P_2O_5 . Таким образом, пустая порода состоит, практически, из кремнезема (11%) и глинозема (5%).

Состав проб руд, взятых на первом горизонте (табл. 35), показывает, что почти сразу же после загрузки начинается процесс восстановления. Первый горизонт расположен всего лишь на 1,5—2 м ниже уровня засыпи. Температуры (300—600°) на этом горизонте и состав газовой фазы таковы, что процессы восстановления железной руды идут в начальной стадии. Преимущественно идет восстановление от окиси железа до магнитной окиси, хотя частично восстановление доходит и до металлического железа. Как видно из кривых состава руды, на первом горизонте в среднем содержится 6,29% металлического железа, 36,84% закиси, 33,75% окиси железа. Пустая порода здесь несколько изменилась вследствие появления извести и закиси марганца (вероятно из мартеновского шлака).

Рассматривая отдельные пробы руд, мы видим, что процесс восстановления идет очень неравномерно. Так, наряду с пробами, в которых восстановления железа почти нет, имеются пробы, в которых восстановление уже сильно развито даже на первом горизонте. В отдельных пробах руд степень восстановления составляет только 2,4%: при 66,6% $Fe_{общ}$, 85,30% Fe_2O_3 , 0,22% $Fe_{мет}$ и 8,60% FeO . Наоборот, в одной пробе

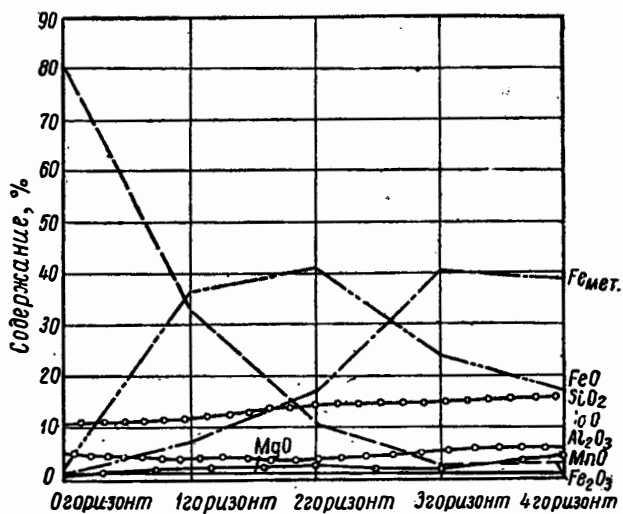


Рис. 79. Изменение состава руды от колошника до распара.

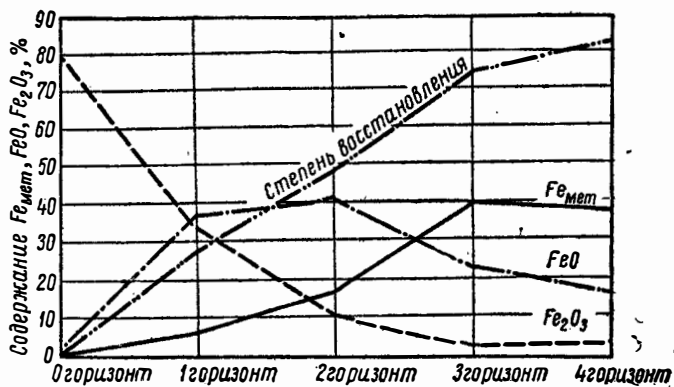


Рис. 80. Изменение содержания в пробах руд (без пустой породы) $Fe_{мет}$, FeO , Fe_2O_3 от колошника до распара.

руды степень восстановления доходит даже до 60,7%; при 62,25% $Fe_{общ}$ только 6,86% Fe_2O_3 , 27,83% $Fe_{мет}$ и 38,10% FeO .

В большинстве проб руд не было обнаружено такой высокой степени восстановимости; она находится в пределах 20—30%; наблюдается главным образом стадия перехода от окиси к магнитной окиси с небольшим содержанием металлического железа. Как правило, мелочь восстанавливалась в большей мере, чем куски руды. Так, например, в одной и той же пробе в кусках находится только 0,22% $Fe_{мет}$ и 8,60% FeO , тогда как в рудной мелочи 5,37% $Fe_{мет}$ и 48,20% FeO . В другом случае в кусках 0,12% $Fe_{мет}$, 12,37% FeO , а в рудной мелочи — 2,70% $Fe_{мет}$ и 32,87% FeO .

На рис. 81 представлены кривые относительного содержания железа в виде железа металлического, закисного и окисного и

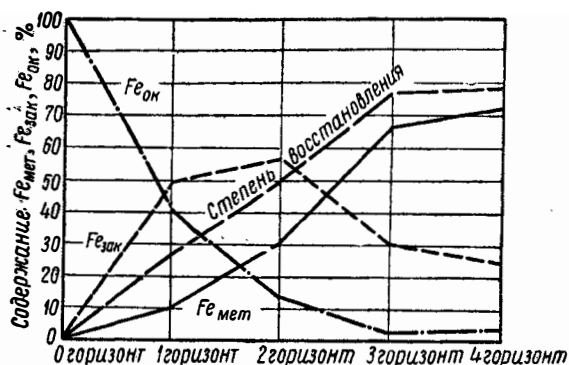


Рис. 81. Относительное содержание в руде железа в виде $Fe_{мет}$, $Fe_{зак}$ и $Fe_{ок}$, а также степень восстановления по кислороду на различных горизонтах в шахте и распаре доменной печи № 3 Запорожстали.

степени восстановления по кислороду. Кривые здесь вычерчены по тем же данным, что и на рис. 79 и 80, только для большей ясности изображения хода восстановительного процесса вместо абсолютных приведены относительные (в процентах) значения к общему содержанию железа во всех степенях окисления, принятому за 100. Степень восстановления по кислороду выведена также в процентах. При этом принято, что в сырой руде на 100 частей железа приходится 42,4 части кислорода.

Как пример, приводим подсчет степени восстановления рудной пробы № 504. В ней было 57,51% $Fe_{общ}$, 12,91% $Fe_{мет}$, 51,98% FeO , 5,79% Fe_2O_3 . Деля железо металлическое, закисное и окисное отдельно на железо общее, получаем соответственно относительное содержание железа в виде: железа метал-

лического — 22,4%; железа закисного — 70,5% и железа окисного — 7,1%, всего 100%. Отношение кислорода к железу в FeO составляет 0,28, а в Fe₂O₃ — 0,43. Перемножая 70,5 на 0,28 и 7,1 на 0,43, получаем в сумме 22,7 части кислорода, приходящегося на 100 частей железа данной пробы руды; на 100 же частей железа загружаемой руды приходится 42,4 части кислорода. Деля 27,7 на 42,4, получаем, что осталось 53,5% кислорода в руде, следовательно, восстановлено: $100 - 53,5 = 46,5\%$. Отсюда степень восстановления 46,5%.

Из сравнения кривых, вычерченных по данным исследований доменной печи № 1 Магнитогорского завода и доменной печи № 3 Запорожстали видно, что процесс восстановления криво-рожских руд на верхнем горизонте шахты протекает более интенсивно, чем магнитогорских (табл. 36).

Таблица 36
Средний состав руды на первом горизонте (%)

	Доменная печь № 3 За- порожстали	Доменная печь № 1 Ма- гнитогорско- го завода
Железо металлическое	6,29	1,43
Закись железа	36,84	24,96
Окись железа	33,75	45,28
Железо общее	58,66	52,60
Относительное содержание железа в виде металла	10,7	2,7
То же в виде закиси	49,0	37,0
То же в виде окиси	40,3	60,3
Степень восстановления по кис- лороду	26,9	13,8

Известняк на верхнем горизонте подвергается лишь слабому изменению.

Второй горизонт

Второй горизонт расположен в средней части шахты, на 18 090 мм выше оси чугушной летки. Расстояние между первым и вторым горизонтом составляет 6060 мм. На втором горизонте так же, как и на первом, брались пробы газов, материалов, измерялись температура и давление газов (табл. 36 а — 39).

Таблица 37

Температура газов на втором горизонте

Расстояние от кладки мм	Температура, °С	Средняя, °С
0	950; 920; 900; 930; 910; 900; 950	925
100	900; 870; 890; 900; 870; 880; 910	890
250	900; 925; 845; 850; 860	875
350	860; 840; 840	845
500	870; 830; 810; 810	830
600	800; 820; 800; 820	810
700	800	800
750	800; 770; 750; 730	760
900	740; 750; 770	750
1000	760; 720; 710; 720; 710; 700; 720	720
1250	700; 610; 620; 650; 600; 620; 640	635
1500	580; 600; 620; 600; 625; 610; 560; 600	600
1750	550; 520; 580; 540; 550	550
2000	540; 520; 560; 540; 550	540

Таблица 38

Давление дутья перед воздухонагревателями
и давление газов на втором горизонте

Расстояние от кладки мм	Давление дутья перед воздухонагревателями ати и мм рт. ст.					Среднее, ати и мм рт. ст.	Давление газов. мм рт. ст. и % от давления дутья перед воздухонагревателями				Среднее, мм рт. ст. и % от давления дутья перед воздухонагревателями
	1,28	1,24	1,55	1,36	1,36		300	310	450	340	
0	941	912	1139	1000	1000	31,9	34,0	39,5	34,0	35,0	
	1,28	1,29	1,55	1,36	1,36	295	305	450	340	345	
250	941	912	1139	1000	1000	31,4	33,5	39,5	34,0	34,6	
	1,30	1,26	1,54	1,36	1,37	320	325	450	335	357	
500	955	926	1132	1000	1007	33,4	35,1	39,8	33,5	35,4	
	1,30	1,26	1,52	1,37	1,36	320	340	450	340	363	
750	956	926	1117	1067	1000	33,4	36,7	40,4	33,7	36,1	
	1,30	1,26	1,54	1,37	1,37	330	335	470	340	369	
1000	970	926	1132	1007	1007	34,0	36,2	41,5	33,7	363	
	1,32	1,25	1,54	1,37	1,37	325	350	460	340	369	
1250	970	918	1132	1007	1007	33,6	38,1	10,6	33,7	36,5	
	1,32	1,25	1,54	1,37	1,37	325	350	460	340	369	

Продолжение табл. 38

Расстояние от кладки мм	Давление дутья перед воздухонагревателями ати и мм рт. ст.					Среднее, ати и мм рт. ст.	Давление газов, мм рт. ст. и % от давления дутья перед воздухонагре- вателями				Среднее, мм рт. ст. и % от плавления дутья, воз- духонагревателями
	1,32	1,24	1,54	1,37	1,37		325	340	465	340	
1500	970	912	1132	1007	1007	33,6	37,3	41,1	33,7	36,5	
1750	970	904	1139	1007	1007	33,0	33,5	48,0	34,0	37,1	
2000	970	904	1139	1029	1010	39,0	37,1	42,2	33,7	37,0	
2250	970	904	1139	1029	1019	34,6	37,6	42,2	35,0	37,6	
2500	970	904	1176	1029	1019	34,6	38,2	42,6	35,0	37,7	
2750	977	904	1176	1029	1022	36,8	38,2	42,6	35,0	38,2	
3000	985	896	1139	1029	1015	36,5	37,4	42,1	35,9	38,0	
3250		896	1176	1029	1035		33,5	41,7	36,5	39,7	
3500		896		1029	963		37,4		35,5	38,3	
3750				1029	1029				36,4	36,4	
4000				1036	1036				38,0	38,0	
				1036					36,7	36,7	

Состав проб руды

№ пробы	Расстояние от кладки мм	Химический состав, % после					
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
600	0—300	9,40	61,85	28,90	41,30	1,05	11,72
603	500—800	22,65	59,05	1,45	19,10	61,15	7,95
604	500—800	9,69	61,17	27,59	41,30	1,97	13,50
607	500—800	9,80	53,33	21,19	36,60	5,34	18,40
608	500—800	14,37	50,80	0,64	62,35	2,18	15,22
609	500—800	14,43	62,17	14,65	53,49	8,46	14,83
612	500—800	6,87	58,23	35,90	23,64	5,56	16,70
613	1000—1300	11,06	53,16	15,72	43,02	5,48	19,91
614	1000—1300	13,54	54,59	9,38	50,95	7,80	15,28
Среднее по горизонту		12,35	57,22	17,27	41,30	11,00	14,83

На рис. 82 вычерчены по средним данным кривые содержания в газе CO_2 и CO на втором горизонте по радиусу от кладки к оси печи.

Минимум содержания CO_2 в газе (2,3%) находится у кладки шахты. Содержание углекислоты вначале постепенно, а затем более резко повышается к оси печи. У оси печи, на расстоянии 4000 мм от кладки шахты, содержание CO_2 достигает максимума в 17,8%.

В соответствии с кривой содержания CO_2 находится кривая содержания CO , являющаяся почти зеркальным отражением первой.

Состав газа на втором горизонте, так же, как и на первом, говорит о наличии периферийного хода, при котором основной поток газов направлен вдоль кладки печи; у оси проходит сравнительно мало газа с замедленной скоростью, так как осевая часть печи загружена значительным количеством руды. Помимо руды, на содержание CO_2 в газе из осевой части печи влияет еще на втором горизонте и разложение известняка. Выше было отмечено, что известняк, поступавший в доменную печь, совершенно не дробился, и наряду с мелкими кусками в печь шли куски до 200 мм в поперечнике. При загрузке крупные куски известняка откатываются преимущественно к оси печи. Так как сечение периферийной части по сравнению с осевой частью печи очень велико, то физическая и химическая

Таблица 39

со второго горизонта

пересчета на 100 и исключения С						Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по количеству отнятого кислорода, %
Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	S	P_2O_5	$\text{Fe}_{\text{мет}}$	FeO	Fe_2O_3	
7,43	6,81	0,54	1,63	0,40	0,22	46,70	52,10	1,20	65,4
8,48	1,04	0,23	0,19	0,22	0,19	2,5	25,20	72,3	10,1
5,20	5,70	0,65	3,32	0,59	0,18	45,1	52,6	2,3	63,1
2,12	10,70	1,15	3,74	0,50	0,26	39,6	53,4	7,0	57,6
2,25	11,52	1,15	3,89	0,57	0,23	1,3	95,7	3,0	33,5
4,20	1,44	0,58	1,81	0,29	0,25	23,5	67,0	9,5	46,0
2,52	10,40	1,12	3,39	0,41	0,36	61,6	31,6	6,8	72,2
2,13	9,04	1,16	2,94	0,36	0,24	29,6	63,2	7,2	51,0
3,32	8,42	1,14	3,08	0,39	0,24	17,2	72,8	10,0	41,8
4,18	7,23	0,87	2,67	0,41	0,24	30,2	56,3	13,5	48,9

энергия газа используется слабо. Наряду с этим, периферийный поток газов увлекает за собой много пыли и вызывает преждевременный разгар кладки печи.

По средним цифровым данным о температурах на втором горизонте вычерчена кривая

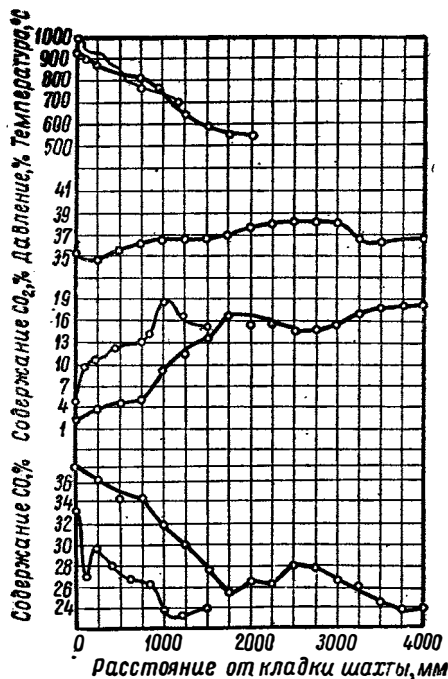


Рис. 82. Состав, давление и температура газа на втором горизонте доменных печей (утолщенные кривые — по печи № 3 Запорожстали, тонкие — по печи № 1 Магнитогорского завода).

изменения температур от периферии к оси печи (рис. 82). Температура у периферии максимальная — 925°; постепенно понижаясь к оси, она доходит до 540° на расстоянии 2000 мм от кладки шахты. Кривая температуры находится в полном соответствии с кривой состава газа и подтверждает наличие периферийного хода. Для сравнения на рис. 82 приведены кривые состава газа и температуры на втором горизонте доменной печи № 1 Магнитогорского завода.

На рис. 82 дана и кривая давления газов на втором горизонте. Давление у периферии составляет 35% от давления дутья перед воздухоагрегатами, повышаясь до максимума в 38,2% на расстоянии 2500 мм от кладки. К оси печи давление снижается до 36,7%.

Температуры на втором горизонте (от 540 до 925°) таковы, что процессы восстановления руд идут здесь чрезвычайно интенсивно. На пути между первым и вторым горизонтом руда восстанавливается из магнитной окиси в закись железа и в металлическое железо; но окись железа все же остается в руде. Процесс восстановления идет одновременно по ступеням: в каждом куске могут присутствовать и окись, и магнитная окись, и закись железа, и металлическое железо. Относительные количества их зависят от физического состояния руды (мелочь, крупные куски), температурных условий, меняющихся в одних и тех же точках (у периферии температура, как правило, на 200—300° выше, чем у оси), состава газовой фазы, которая

в одних и тех же точках бывает резко различна, а по направлению от стен к оси меняется еще больше. На рис. 79, 80 и 81 видно, что на втором горизонте, в среднем, металлического железа уже 17,27%, закиси железа 41,30%, а окиси железа только 11,00% при железе общем 57,22%. Степень восстановления — 48,9%. Относительное содержание железа в виде металлического — 30,2%, закисного — 56,3% и окисного — 13,5%. Степень восстановления руды на втором горизонте так же резко различна в разных кусках, как и на первом горизонте (табл. 39). Наряду с пробами руды, восстановленными на 72,2%, есть пробы, восстановленные только на 10,1%; соответственно в первом случае относительное содержание железа в виде металлического — 61,6%, закисного — 31,6% и окисного — 6,8%, а во втором случае железа в виде металлического — только 2,5%, закисного — 25,2% и окисного 72,3%.

В табл. 40 приведены для сопоставления средние данные о степени восстановления руды на втором горизонте доменных печей № 1 Магнитогорского завода и № 3 Запорожстали. Степень восстановления на втором горизонте в последней печи немного выше. Обращает внимание резкое увеличение содержания общего железа с 52,60% на первом горизонте до 67,55% на втором горизонте доменной печи № 1 Магнитогорского завода. Оно произошло в результате начавшегося в этом случае процесса шлакообразования, чего не было в печи Запорожстали

Таблица 40

Средний состав руды на втором горизонте (%)

	Доменная печь № 3 Запорожстали	Доменная печь № 1 Магнитогорского завода
Железо металлическое	17,27	18,47
Закись железа	41,30	45,56
Окись железа	11,00	19,42
Железо общее	57,22	67,55
Относительное содержание железа в виде металла	30,2	27,37
То же в виде закиси	56,3	52,55
То же в виде окиси	13,5	20,08
Степень восстановления по кислороду	48,9	44,6

Известняк на втором горизонте почти полностью разложился, превратившись в известь.

Третий горизонт

Третий горизонт расположен в нижней части шахты на 12 150 мм выше оси чугунной летки, на 12 000 мм ниже первого и на 5940 мм ниже второго горизонта. Как и на верхних двух горизонтах, на третьем производился отбор проб газа и материалов, измерение температур и давления газа (табл. 41—44).

Таблица 41

Состав газа на третьем горизонте

Расстояние от кладни мм	Состав газа	Содержание, %												Сред- нее %
		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	O ₂	Ar	He	Ne	NO	NO ₂	H ₂ O	
0	CO ₂	2,0	1,0	—	—	1,0	2,4	2,0	4,2	0,8	1,0	1,8	1,8	
	CO	37,0	37,2	—	40,6	37,0	33,6	36,6	34,8	39,0	36,4	39,2	37,1	
250	CO ₂	9,6	1,0	2,6	0,5	0,6	2,6	2,0	4,4	0,5	1,5	1,1	2,4	
	CO	30,4	37,2	36,4	39,2	37,6	33,8	37,2	33,6	39,5	36,1	38,9	36,4	
500	CO ₂	13,2	1,2	7,0	1,2	1,0	2,8	2,2	6,3	2,6	1,0	3,9	3,9	
	CO	28,2	37,0	34,4	39,3	37,0	33,4	37,4	32,8	37,8	36,6	36,5	35,5	
750	CO ₂	13,4	1,2	11,0	6,0	2,0	5,0	9,0	8,6	7,3	4,6	9,0	7,0	
	CO	27,4	37,0	30,6	34,5	36,6	32,2	31,0	30,0	32,9	32,8	32,4	32,5	
1000	CO ₂	11,4	9,2	11,6	8,5	8,8	9,1	12,0	11,4	5,9	9,0	11,2	9,2	
	CO	31,6	32,2	30,0	31,9	31,0	29,5	28,0	27,2	35,5	31,6	30,0	30,7	
1250	CO ₂	8,9	14,0	11,8	7,4	6,6	9,5	12,0	13,2	10,4	13,3	12,8	10,9	
	CO	32,2	30,2	28,8	30,0	32,2	29,1	28,0	25,8	31,8	28,1	28,5	29,3	
1500	CO ₂	7,0	—	12,8	8,4	—	9,0	12,2	11,1	11,0	17,4	14,1	11,4	
	CO	34,2	—	28,0	30,6	—	29,8	27,8	27,9	31,2	24,6	28,7	29,2	
1750	CO ₂	—	—	13,8	9,4	—	—	13,5	15,8	11,6	17,9	15,0	13,8	
	CO	—	—	29,4	31,0	—	—	27,4	24,6	30,4	24,3	29,4	28,0	
2000	CO ₂	—	—	—	10,6	—	—	17,8	16,5	11,9	17,3	15,6	14,1	
	CO	—	—	—	28,0	—	—	27,8	24,9	30,0	24,6	27,6	27,0	
2250	CO ₂	—	—	—	10,2	—	—	13,1	16,4	11,3	17,0	15,0	13,8	
	CO	—	—	—	28,8	—	—	28,3	26,8	30,7	24,6	28,4	27,9	
2500	CO ₂	—	—	—	10,4	—	—	14,6	17,4	12,2	13,1	15,6	13,9	
	CO	—	—	—	23,8	—	—	27,4	24,8	29,4	28,1	27,9	27,8	
2750	CO ₂	—	—	—	10,3	—	—	10,6	16,3	13,0	15,1	15,0	13,3	
	CO	—	—	—	29,1	—	—	30,8	28,8	27,6	27,0	25,6	28,0	
3000	CO ₂	—	—	—	—	—	—	10,8	16,7	13,6	17,2	13,2	14,2	
	CO	—	—	—	—	—	—	30,4	28,4	28,2	24,8	27,4	27,2	
3250	CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	14,3	—	—	—	14,3	
	CO	—	—	—	—	—	—	—	26,9	—	—	—	26,9	
3500	CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	14,6	—	—	—	14,6	
	CO	—	—	—	—	—	—	—	26,4	—	—	—	26,4	

Таблица 42

Температура газов на третьем горизонте

Расстояние от кладки мм	Температура, °С	Средняя, °С
0	1150; 1140;	1145
100	1080; 1100; 1140; 1120; 1140; 1140;	1120
350	1130; 1040; 1060; 1040; 1060; 1040; 1060; 1100; 1080;	1060
600	980; 1000; 1020; 1000; 1020; 1060; 1050; 1060; 1040;	1025
850	940; 960; 970; 980; 1030; 1010; 1080;	995
1000	940	940
1100	920; 950; 960; 940; 900; 910;	930
1250	890; 900; 880; 900	890
1350	890; 870	880
1500	870; 860; 840; 850	855
1600	900; 910; 800; 820	855
1750	850; 820; 830; 840	835
1850	820; 880; 800; 820	830
2000	820; 800; 800; 810; 840; 860	820
2250	810; 800; 800; 810; 800	805

По средним данным на рис. 83 вычерчены кривые содержания в газе CO_2 и CO на третьем горизонте по радиусу от стен к оси печи. Как и на первых двух горизонтах, на третьем минимум содержания углекислоты в газе находится у кладки шахты, а максимум — у оси печи. Содержание CO_2 с 1,8% у стен быстро увеличивается до 9,2% на расстоянии 1000 мм от кладки; дальше к оси содержание CO_2 увеличивается медленнее, доходя до 14,1% на расстоянии 2000 мм от кладки; таким оно остается до оси печи. На третьем горизонте нет такой резкой разницы, как на верхних двух, между содержанием CO_2 на участке, расположенном на расстоянии 1000 мм от кладки, и на участке у оси печи. Все же характер кривой в общем аналогичен характеру соответственных кривых для верхних горизонтов.

Состав газа и на третьем горизонте свидетельствует о наличии периферийного хода. Кривая содержания CO подтверждает изложенное выше.

На всех трех горизонтах в шахте сумма CO_2 и CO у периферии меньше, чем у оси.

На рис. 83 приведена также кривая температуры газа. Максимальные значения ее находятся у стен шахты (1145°) и постепенно понижаются к оси печи. Минимум температур

Давление дутья перед воздухонагревателями

Расстояние от кладки мм	Давление дутья перед воздухонагревателями, <i>ати</i> и мм рт. ст.								
0	1,60 1176	1,36 1000	1,34 985	1,25 919	1,28 941	1,20 882	1,40 1029	1,28 941	1,28 941
250	1,60 1176	1,36 1000	1,36 1000	1,24 911	1,28 941	1,30 955	1,40 1029	1,29 948	1,27 933
500	1,62 1190	1,35 993	1,36 1000	1,10 808	1,28 941	1,27 933	1,40 1029	1,29 948	1,26 926
750	1,62 1190	1,35 993	1,36 1000	1,15 846	1,28 941	1,20 882	1,40 1029	1,25 919	1,25 919
1000	1,62 1190	1,35 993	1,34 985	1,20 882	1,27 935	1,15 846	1,40 1029	1,27 933	1,25 919
1250	1,62 1190	1,36 1000	1,34 985	1,20 882	1,27 933	1,10 808	1,40 1029	1,27 933	1,26 926
1500	1,62 1190	1,36 1000	1,34 985	1,20 882	1,28 941	1,20 882	1,40 1029	1,27 933	— —
1750	1,64 1205	1,36 1000	1,34 985	1,22 896	1,29 948	— —	— —	— —	— —
2000	1,65 1212	1,36 1000	1,36 1000	1,23 903	1,29 948	— —	— —	— —	— —
2250	1,65 1212	1,37 1007	1,36 1000	1,25 919	1,30 955	— —	— —	— —	— —
2500	1,66 1220	1,38 1015	1,38 1015	1,25 919	1,30 955	— —	— —	— —	— —
2750	1,66 1220	1,38 1015	1,40 1029	1,25 919	1,32 970	— —	— —	— —	— —
3000	1,62 1176	1,39 1022	1,40 1029	— —	1,35 933	— —	— —	— —	— —
3250	— —	1,40 1029	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
3500	— —	1,40 1029	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
3750	—	0	—	—	—	—	—	—	—

Состав проб руды с третьего горизонта

№ пробы	Расстояние от кладки мм	Химический состав, % после пересчета на 100 и исключения С													Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по количеству отнятого кислорода, %
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P ₂ O ₅	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃		
		700	0	4,39	55,35	40,55	17,05	2,14	15,71	4,07	11,86	1,16	5,90	1,19	0,37	73,3	24,00	
701	0	3,49	53,89	38,30	15,28	3,80	15,78	5,45	12,42	1,34	5,84	1,35	0,34	71,0	22,20	6,80	78,50	
702	0—300	3,18	62,56	59,65	13,01	1,08	16,61	6,85	6,27	0,94	3,05	0,25	0,29	82,5	16,30	1,20	88,00	
703	0—300	3,32	62,69	52,05	10,84	3,12	16,70	6,63	6,10	0,74	3,03	0,45	0,34	83,0	13,50	3,50	87,55	
704	200—500	2,53	76,84	69,01	7,12	3,24	11,94	5,65	1,35	0,63	0,60	0,24	0,22	89,8	7,20	3,00	92,20	
705	200—500	2,84	77,22	68,40	8,16	3,50	12,20	4,68	1,56	0,49	0,58	0,22	0,21	88,6	8,20	3,20	91,34	
706	200—500	9,31	55,45	23,30	39,00	2,46	17,55	7,16	6,27	0,91	2,64	0,36	0,35	42,1	54,80	3,10	60,70	
707	200—500	9,23	56,05	24,95	35,83	4,50	17,80	5,97	6,60	0,92	2,72	0,37	0,34	44,5	49,90	5,60	61,30	
708	500—800	4,50	58,66	44,40	14,03	4,73	17,23	7,77	6,92	0,94	3,24	0,42	0,32	75,7	18,70	5,60	82,00	
708a	500—800	4,90	58,56	42,46	17,01	3,99	14,99	9,61	7,07	0,93	3,25	0,43	0,26	72,6	22,70	4,70	80,15	
709	500—800	6,71	46,34	23,40	28,13	1,52	22,28	6,13	11,75	1,38	4,18	0,93	0,30	50,50	47,20	2,30	66,50	
709a	500—800	5,63	47,50	28,65	22,19	2,29	22,25	6,12	11,76	1,52	4,13	0,80	0,29	60,23	36,46	3,40	75,50	
713	500—800	7,27	78,87	54,35	28,25	3,53	6,79	4,52	1,51	0,37	0,31	0,21	0,16	68,9	28,00	3,10	79,00	
714	500—800	7,79	80,74	54,96	29,43	4,14	6,23	2,76	1,37	0,40	0,31	0,22	0,18	68,1	28,30	3,60	77,70	
715	500—800	8,07	51,63	24,85	30,38	4,47	17,09	4,27	11,30	1,26	5,07	0,93	0,38	48,0	45,90	6,10	63,60	
716	500—800	7,66	48,33	23,01	27,42	5,47	17,68	7,49	11,51	1,22	4,94	0,93	0,33	47,6	44,20	8,20	62,60	

№ Л. пробы	Расстояние от кладни мм	Химический состав, % после пересчета на 100 и исключения С												Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по количеству отнитного кислорода, %
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P ₂ O ₅	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	
		720	500—800	4,38	67,42	52,90	15,90	3,00	16,29	6,38	2,84	0,49	1,60	0,21	0,39	78,5	
721	500—800	3,77	65,84	51,55	15,93	2,13	18,02	7,10	2,77	0,51	1,44	0,24	0,31	78,5	19,2	2,3	85,10
722	500—800	5,06	65,17	47,64	21,27	1,32	14,39	7,01	4,72	0,83	2,77	0,28	0,27	73,0	25,5	1,5	81,60
722a	500—800	7,11	65,55	42,01	26,08	4,59	14,94	4,50	4,48	0,82	2,04	0,26	0,28	64,1	31,0	4,9	74,80
723	500—800	7,74	58,0	32,30	30,20	3,24	17,00	5,54	6,96	1,15	2,99	0,33	0,29	55,7	40,7	3,6	69,00
723a	500—800	6,37	58,62	37,25	23,99	3,74	15,85	7,95	6,85	1,06	2,78	0,24	0,29	63,5	32,0	4,5	74,20
725	200—500	6,93	56,44	33,20	26,10	4,07	15,90	8,34	8,00	1,29	2,56	0,30	0,24	58,8	36,1	5,1	71,20
725a	200—500	6,55	58,52	37,75	21,22	6,10	15,88	7,28	7,79	1,27	2,18	0,29	0,24	64,7	28,2	7,1	74,00
727	500—800	8,22	51,37	23,38	33,15	3,06	16,07	5,25	12,34	1,66	3,58	1,30	0,21	45,5	50,3	4,2	62,50
727a	500—800	5,93	53,31	33,71	21,71	3,82	15,61	5,95	12,33	1,84	3,50	1,40	0,23	63,3	31,7	5,0	74,05
729	200—500	7,32	63,52	39,72	25,19	5,93	12,76	8,08	5,65	0,60	1,65	0,21	0,21	62,5	30,9	6,6	72,80
730	200—500	8,84	60,49	29,18	39,68	0,47	12,28	8,40	6,50	0,57	2,72	—	0,20	48,3	51,2	0,5	65,70
731	200—500	4,78	53,96	37,80	18,90	2,04	17,67	11,22	8,30	0,76	3,08	—	0,22	70,1	27,3	2,6	79,35
732	200—500	11,26	73,32	34,20	47,81	2,57	14,64	0,14	—	0,27	0,11	—	0,26	46,7	50,8	2,5	63,90
734	200—500	3,47	55,21	43,40	14,02	1,26	16,46	9,34	9,98	0,98	4,23	—	0,33	78,6	19,8	1,6	85,33
735	200—500	1,00	60,60	57,55	2,60	1,45	17,88	9,98	6,08	0,89	3,20	—	0,37	95,0	3,3	1,7	96,11
737	200—500	5,64	54,21	35,40	21,10	3,35	24,60	6,09	5,58	0,71	2,97	—	0,20	65,3	30,4	4,3	75,50
718	0	10,39	73,71	37,50	44,30	2,30	7,06	0,65	4,30	0,70	2,22	0,51	0,46	50,9	46,9	2,2	66,80
718a	0	1,65	76,43	39,51	44,90	2,67	5,00	0,95	3,18	0,55	2,18	0,61	0,45	51,7	45,8	2,5	67,27
Среднее по горизонту		6,21	61,43	40,44	24,02	3,18	15,32	5,85	6,68	0,92	2,77	0,53	0,29	65,8	30,6	3,6	76,1

(805°) находится на расстоянии 2250 мм от кладки. Температуры, так же как и состав газа, говорят о наличии периферийного хода.

На рис. 83 приведена и кривая давления газов по радиусу

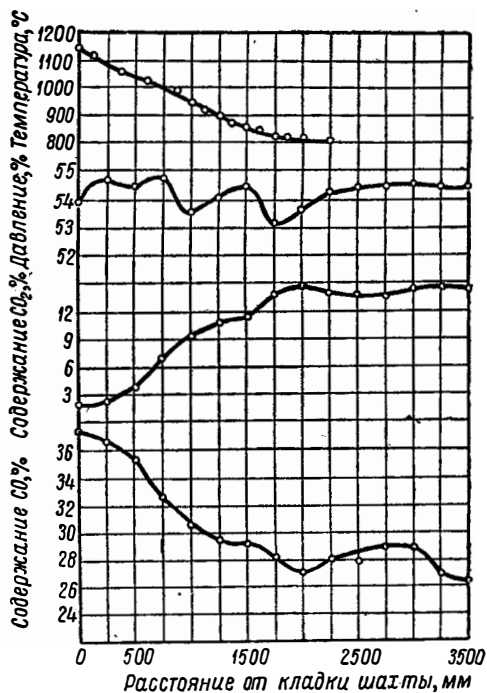


Рис. 83. Состав, давление и температура газов на третьем горизонте доменной печи № 3 Запорожстали

от стен к оси печи. Давление в нижней части шахты составляет 53—54% от давления дутья перед воздухонагревателями.

На третьем горизонте состав газовой фазы и температура (1145—805°) таковы, что процесс восстановления должен подходить к концу, притом — в стадии перехода от закиси железа к металлическому железу. Как видно по рис. 79, 80 и 81, в среднем в пробах руд содержится металлического железа 40,44%, закиси железа — 24,02% и окиси железа — только 3,18%. Относительное содержание железа в виде металлического составляет 65,8%, закисного — 30,6% и окисного — всего 3,6%.

Из приведенных средних данных (табл. 45) видно, что в основном в руде — железо металлическое и частично закись железа; окись железа практически почти отсутствует. Степень восстановления — 76,1%.

Необходимо отметить, что, несмотря на высокую степень восстановления и довольно высокие температуры у периферии, шлакообразования еще нет, в отличие от магнитогорской печи, где оно в сильной степени развито уже в нижней части шахты.

Таблица 45

Средний состав руды на третьем горизонте (%)

	Доменная печь № 3 Запорож- стали	Доменная печь № 1 Магнитогор- ского завода
Железо металлическое	40,44	67,43
Закись железа	20,02	22,70
Окись железа	3,18	0,00
Железо общее	61,43	85,14
Относительное содержание железа в виде металла	65,8	79,20
То же в виде закиси	30,6	20,80
То же в виде окиси	3,6	0,00
Степень восстановления по кислороду . .	76,1	86,20

На третьем горизонте так же, как и на верхних двух, неравномерность восстановления сохраняется (табл. 44). Так, например, в пробе руды № 735 при содержании железа общего в 60,60%, железа металлического имеется 57,55%, закиси железа только 2,60%, окиси железа еще меньше — 1,45%. Степень восстановления равна 96,11%.

В образце № 706 степень восстановления значительно меньше, — только 60,7% при содержании железа общего в 55,45%, железа металлического — 23,30%, закиси железа — 39,00% и окиси железа — 2,46%. Как правило, все кусковые пробы руд на третьем горизонте с поверхности восстановлены до металла; они хорошо куются и дают яркую металлическую черту, тогда как в сердцевине у них еще сохраняется мало измененная руда.

Содержание железа общего в криворожских рудах почти не изменяется на всех трех горизонтах, тогда как в магнитогорских рудах оно резко увеличивается. Объясняется это особенностью процесса шлакообразования при плавке магнитогорских руд. Поэтому восстановление криворожских руд в нижней части шахты замедляется, а магнитогорских увеличивается. Таким образом, на третьем горизонте, по сравнению с верхними двумя, где степень восстановления криворожских руд была выше, а магнитогорских ниже, — положение резко меняется.

Известь находящаяся в пробах материалов, мелко распылена среди кусков руды и кокса. Шлака на третьем горизонте не наблюдалось: только при связанном с ходом печи резком временном понижении температур дутья до 600° появлялся в незначительном количестве шлак в виде отдельных горошинок, образованных как будто всухую.

Нам удалось собрать небольшое количество шлака и произвести четыре полных анализа проб; оказалось, что их можно разделить на две группы. В одном случае шлак был темный, но легкий, основной, с температурой плавления около 1450° , в другом случае — светлый, с температурой плавления около 1280° .

Состав их указан в табл. 46 — с окислами железа и без них.

Таблица 46

Состав шлака (%)

	Железистый		Маложелезистый	
Fe _{мет}	0,06	—	0,06	—
FeO	28,74	—	4,70	—
Fe ₂ O ₃	4,26	—	1,06	—
SiO ₂	19,54	29,22	34,00	36,10
Al ₂ O ₃	9,40	14,04	12,38	13,15
CaO	28,40	42,48	32,52	34,63
MgO	1,40	2,10	5,68	6,03
MnO	7,08	10,58	8,11	8,51
S	0,88	1,32	1,33	1,41
P ₂ O ₅	0,24	0,36	0,16	0,17

Четвертый горизонт — распар

Четвертый горизонт, расположенный в распаре, на 7160 мм выше оси чугунной летки, находится на 16990 мм ниже первого горизонта, на 10930 мм ниже второго и на 4990 мм ниже третьего.

В распаре, так же как и в шахте, производился отбор проб материалов и газов и измерение температуры и давления (табл. 47—50) (стр. 149, 150, 152—154).

Таблица 47

Состав газа на четвертом горизонте — в распаре

Расстояние от кладки мм	Состав газа	Содержание, %										Среднее, %
0	CO ₂	1,9	0,4	0,8	1,6	1,4	1,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,8
	CO	36,6	38,4	36,4	38,0	38,6	38,1	40,2	32,1	41,4	41,6	38,9
250	CO ₂	2,6	0,2	3,6	1,1	1,1	2,4	0,0	1,3	0,0	2,4	1,5
	CO	36,4	37,4	33,4	37,7	38,3	36,6	38,6	38,0	40,4	41,4	37,8
500	CO ₂	3,0	3,6	4,8	1,1	2,3	2,7	0,4	1,9	0,0	4,0	2,4
	CO	35,0	33,4	32,4	37,6	34,0	36,0	39,6	37,0	40,8	37,0	36,3
750	CO ₂	4,6	4,6	4,2	1,0	3,9	—	0,8	2,4	1,0	4,2	3,0
	CO	33,6	32,8	30,8	37,8	34,1	—	38,2	35,6	39,0	38,4	35,6
1000	CO ₂	5,0	5,0	4,2	3,0	4,2	2,5	1,6	2,8	1,4	3,8	3,3
	CO	34,0	33,0	31,8	35,7	35,0	35,7	37,4	37,2	40,0	38,0	35,8
1250	CO ₂	—	5,0	1,8	3,8	2,5	3,0	1,1	2,1	2,6	—	2,7
	CO	—	32,2	33,8	36,1	35,0	36,7	38,9	36,9	38,8	—	36,1
1500	CO ₂	—	5,2	1,2	3,0	2,6	3,4	0,6	1,4	2,2	—	2,4
	CO	—	32,2	34,8	37,0	36,0	36,4	38,2	37,2	37,8	—	36,2
1750	CO ₂	—	4,0	2,2	2,6	2,9	—	0,2	1,6	3,2	—	2,4
	CO	—	33,6	33,4	36,2	36,0	—	39,9	37,2	35,8	—	36,0
2000	CO ₂	—	2,8	1,6	1,9	—	—	1,1	1,6	4,9	—	2,3
	CO	—	35,0	34,6	37,5	—	—	38,9	36,0	36,3	—	36,4
2250	CO ₂	—	—	1,6	0,3	—	—	0,8	0,8	4,6	—	1,6
	CO	—	—	34,8	35,3	—	—	40,0	38,0	36,8	—	37,0
2500	CO ₂	—	—	—	0,0	—	—	0,6	0,6	4,4	—	1,4
	CO	—	—	—	37,4	—	—	38,8	37,2	36,2	—	37,4
2750	CO ₂	—	—	—	0,0	—	—	0,0	1,1	3,7	—	1,2
	CO	—	—	—	37,0	—	—	39,7	34,0	37,7	—	37,1
3000	CO ₂	—	—	—	0,0	—	—	0,0	1,4	3,0	—	1,1
	CO	—	—	—	36,8	—	—	39,0	36,0	38,0	—	37,4
3250	CO ₂	—	—	—	0,0	—	—	0,0	1,0	—	—	0,3
	CO	—	—	—	36,0	—	—	38,7	38,0	—	—	37,6
3500	CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	0,5	—	—	0,5
	CO	—	—	—	—	—	—	—	37,3	—	—	37,3
3750	CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	0,4	—	—	0,4
	CO	—	—	—	—	—	—	—	37,4	—	—	37,4

Таблица 48

Температура на четвертом горизонте в распаре

Расстояние от кладки мм	Температура, °С	Средняя °С
0	1280; 1290; 1310; 1300; 1320; 1290	1300
50	1270; 1280	1275
100	1280; 1270	1275
250	1280; 1250; 1240; 1220; 1240; 1260	1250
350	1240; 1230	1235
500	1220; 1180; 1200; 1220; 1180; 1200	1200
750	1200; 1120; 1180; 1170; 1180; 1180	1170
850	1150; 1190; 1140	1160
1000	1130; 1150; 1140; 1130; 1140; 1150; 1140; 1135	1140
1250	1080; 1100; 1110; 1070; 1050; 1120; 1080; 1100; 1070; 1050	1085
1500	1050; 1060; 1080; 1020; 1010; 1040; 1060	1045
1750	990; 1010; 1030; 1000; 1010; 1000; 999	1005
2000	1000; 1010; 970; 960; 970; 980; 950	975
2250	950; 960; 970; 950; 960; 980; 960	960

На рис. 84 приведены кривые состава газа. В распаре содержание углекислоты — минимальное у периферии и увеличивающееся к оси печи. Максимум содержания углекислоты (3,3%) находится между периферией и осью печи, на расстоянии 1000 мм от кладки. Далее к оси идет снижение до минимума; на расстоянии 3700 мм от кладки углекислоты в газе всего 0,4%. Кривая содержания окиси углерода находится в полном соответствии с кривой содержания углекислоты, являясь почти зеркальным ее отражением.

Состав газа в распаре показывает, что как у периферии, так и у оси печи руды почти нет: она находится в промежуточной части. У оси же отсутствие руды объясняется тем, что в условиях увеличения поперечных размеров печи руда не могла опуститься строго вертикально и неизбежно должна была отодвигаться в сторону.

Наряду с этим наиболее быстрое движение материалов происходит над окислительной зоной и вследствие этого в образующуюся как бы воронку сдвигаются соседние слои с меньшей скоростью движения.

На рис. 84 приведена кривая изменения в распаре температуры газов. Максимальная температура здесь, как и в шахте,

находится у периферии, а минимальная — у оси печи. У периферии температура газов доходит до 1300° и на расстоянии 2250 мм от кладки снижается до 960° .

Разность температур у периферии и оси на каждом горизонте составляет $250\text{—}450^{\circ}$. Температура у оси распара ниже, чем у периферии в нижней части шахты и близка к температуре у периферии в средней части шахты. В свою очередь, тем-

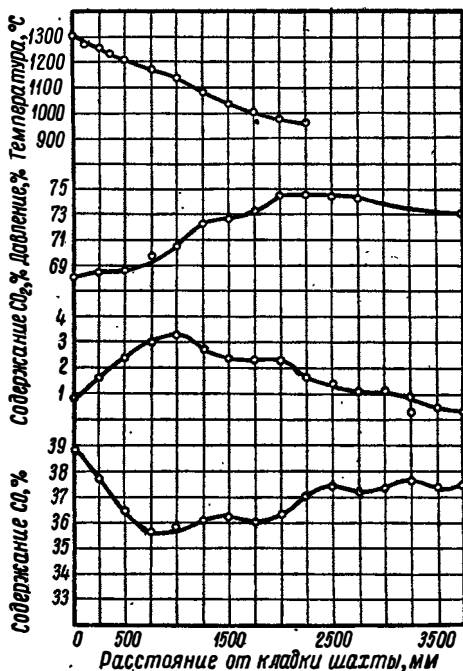


Рис. 84. Состав, давление и температура газов в распаре доменной печи № 3 Запорожстали.

пература у оси нижней части шахты значительно ниже температуры у периферии в средней части шахты. В доменной печи можно встретить одинаковые температуры в точках, отстоящих одна от другой по высоте на 6000—8000 мм, но находящихся на разном расстоянии от кладки шахты.

Температуры ($960\text{—}1300^{\circ}$) в распаре вообще и особенно в периферийной его части таковы, что, казалось бы, процессы восстановления должны здесь полностью закончиться и в составе газовой фазы не должно быть углекислоты. Поскольку

Давление дутья перед воздухонагревателями и давление

Расстояние от кладки м.м.	Давление дутья перед воздухонагревателями, атм и м.м.								
	рт. ст.								
0	1,43 1051	1,25 919	1,29 946	1,30 956	1,22 896	1,30 956	1,42 1044	1,26 927	1,20 882
250	1,45 1066	1,23 904	1,29 946	1,30 956	1,22 896	1,40 1029	1,42 1044	1,28 940	1,28 940
500	1,48 1088	1,25 919	1,30 956	1,32 971	1,22 896	1,40 1029	1,41 1037	1,28 940	1,35 992
750	1,43 1051	1,24 912	1,30 956	1,32 971	1,24 911	1,40 1029	1,40 1028	1,28 940	1,37 1007
1000	— —	1,26 926	1,31 963	1,30 956	1,25 918	— —	1,40 1028	1,28 940	1,37 1007
1250	— —	1,26 926	1,35 993	1,28 942	1,26 926	— —	1,41 1037	1,32 970	1,39 1,21
1500	— —	1,25 919	1,36 1000	1,28 942	1,28 941	— —	1,45 1065	1,32 970	1,42 1044
1750	— —	1,25 919	1,35 993	1,30 956	1,30 956	— —	1,45 1065	1,31 1000	1,42 1044
2000	— —	1,24 912	1,35 993	1,30 956	— —	— —	1,46 1072	1,38 1014	1,42 1044
2250	— —	1,24 912	1,35 993	1,31 963	— —	— —	1,46 1072	1,40 1028	1,43 1051
2500	— —	— —	— —	1,31 963	— —	— —	1,46 1072	1,40 1028	1,45 1065
2750	— —	— —	— —	1,32 971	— —	— —	1,46 1072	1,38 1014	1,45 1065
3000	— —	— —	— —	1,32 971	— —	— —	1,44 1058	1,38 1014	1,45 1065
3250	— —	— —	— —	1,32 971	— —	— —	1,44 1058	1,38 1014	1,45 1065
3500	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	1,40 1028	— —
3750	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	1,40 1028	— —

Таблица 49

газов на четвертом горизонте в распаре

Давление газов, мм рт. ст. и % от давления дутья перед воздухонагревателями									Среднее да- вление дутья, атм и м.м рт. ст.	Среднее дав- ление газов мм рт.ст.	Среднее, % давл. газов от давления дутья
680	605	665	675	575	620	790	615	640	1,30	652	68,1
64,7	65,8	70,0	70,0	64,2	65,0	75,6	66,0	62,5	956	—	—
680	605	665	685	580	700	790	620	680	1,32	666	68,5
63,8	66,4	70,0	71,7	65,0	68,0	75,6	66,0	72,3	972	—	—
700	610	675	705	580	700	780	620	740	1,34	678	68,6
64,3	66,4	70,7	72,7	65,0	68,0	75,2	66,0	74,6	989	—	—
680	610	675	705	610	730	750	620	750	1,33	680	69,6
64,7	67,0	70,7	72,7	68,2	70,9	73,0	66,0	74,5	977	—	—
—	620	685	700	690	—	750	630	750	1,31	680	70,5
—	67,0	71,3	73,4	66,4	—	73,0	67,0	74,5	964	—	—
—	665	755	690	635	—	750	660	760	1,32	704	72,2
—	71,8	76,0	73,4	68,5	—	72,3	68,0	74,4	975	—	—
—	680	755	690	645	—	790	670	780	1,34	716	72,7
—	73,9	75,5	73,4	68,5	—	74,1	69,0	74,5	985	—	—
—	695	750	700	655	—	790	720	780	1,35	726	73,2
—	75,7	75,5	73,2	68,6	—	74,1	72,0	74,5	991	—	—
—	690	745	700	—	—	800	740	780	1,36	742	74,4
—	75,7	75,0	73,2	—	—	74,7	72,9	74,5	997	—	—
—	690	745	710	—	—	800	750	790	1,37	747	74,4
—	75,7	75,0	73,7	—	—	74,7	73,0	75,1	1004	—	—
—	—	—	710	—	—	800	750	800	1,40	765	74,4
—	—	—	73,7	—	—	74,7	73,0	75,1	1028	—	—
—	—	—	715	—	—	800	740	800	1,40	763	74,2
—	—	—	73,6	—	—	74,7	72,9	75,1	1028	—	—
—	—	—	715	—	—	790	740	800	1,40	761	74,0
—	—	—	73,6	—	—	74,7	72,9	75,1	1028	—	—
—	—	—	715	—	—	790	740	800	1,40	761	74,0
—	—	—	73,6	—	—	74,9	72,9	75,1	1028	—	—
—	—	—	—	—	—	—	750	—	1,40	750	73,0
—	—	—	—	—	—	—	73,0	—	1028	—	—
—	—	—	—	—	—	—	750	—	1,40	750	73,0
—	—	—	—	—	—	—	73,0	—	1028	—	—

Состав проб руды с четвертого горизонта — распара

№ пробы	Расстояние от кладки м.м.	Химический состав, % после пересчета на 100 и исключения С												Распределение железа по степени окисления, %			Степень восстановления по количеству кислорода, %
		O ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P ₂ O ₅	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	
800	0—300	4,92	42,66	26,33	17,93	3,32	20,50	9,99	11,41	1,65	7,37	1,25	0,25	61,7	32,7	5,4	73,0
808	0—300	7,46	42,68	17,03	30,47	2,64	23,45	2,67	12,22	1,94	7,33	1,99	0,26	39,9	55,8	4,3	58,8
808а	0—300	5,95	43,73	23,90	22,30	3,48	23,93	2,68	12,64	1,61	7,25	1,92	0,26	54,7	39,7	5,6	68,1
809	0—300	9,79	70,00	36,18	40,70	2,91	6,42	3,39	5,59	0,63	3,16	0,83	0,19	51,8	45,3	2,9	67,2
809а	0 300	1,53	69,15	34,21	38,70	6,77	8,96	1,33	4,35	1,45	3,03	0,96	0,22	49,5	43,6	6,9	64,3
810	0—300	8,22	52,66	24,0	34,00	2,48	14,89	4,36	11,34	1,45	5,32	1,52	0,24	46,4	50,3	3,3	63,4
812	0 300	8,24	54,17	25,68	34,81	1,92	14,75	4,89	9,38	1,43	5,22	1,66	0,26	47,4	50,1	2,5	64,4
813	0—300	7,66	45,09	18,31	33,04	1,40	18,58	6,62	11,41	1,59	6,64	2,06	0,35	40,6	57,2	2,2	60,0
814	200—500	3,71	47,25	34,95	13,64	2,37	21,97	8,18	10,24	1,12	7,15	—	0,38	74,0	22,5	3,5	81,4
816	200—500	8,01	49,95	21,99	34,39	1,58	14,41	8,60	11,67	1,73	5,21	—	0,42	44,0	53,8	2,2	62,2
817	200—500	2,46	50,41	42,52	8,00	2,35	18,20	10,86	13,06	1,06	3,64	—	0,31	84,4	12,3	3,3	88,6
818	200—500	6,86	51,15	27,70	27,67	2,64	14,56	9,60	13,24	0,98	3,32	—	0,29	54,2	42,2	3,6	68,5
820	200—500	6,03	49,76	23,73	22,36	3,70	17,99	7,05	13,00	1,14	4,80	—	0,23	59,7	35,1	5,2	75,7
821	200—500	9,92	51,59	17,12	41,78	2,61	15,64	4,27	12,84	1,19	4,55	—	—	33,2	63,2	3,6	54,95
822	200—500	8,11	67,32	39,48	33,21	2,74	10,14	1,97	8,22	0,81	3,19	—	0,24	58,6	38,5	2,9	71,7
823	200—500	7,14	57,13	32,11	31,42	0,74	14,47	5,12	10,45	0,95	4,50	—	0,24	56,2	42,9	0,9	70,8
826	200—500	3,95	51,52	39,32	10,97	5,18	16,60	9,37	12,00	1,30	4,92	—	0,34	76,4	16,6	7,0	82,0
827	200—500	5,23	64,90	47,80	18,27	4,06	13,15	0,60	10,10	1,06	4,62	—	0,34	73,7	21,9	4,4	81,1
Средний состав руды на 4-м горизонте, взятой одновременно с пробами руды на 3-м горизонте . .		4,92	55,19	38,97	17,74	3,40	16,34	6,37	11,10	1,08	4,72	—	0,28	70,7	25,1	4,2	79,2

в зоне высоких температур идет процесс восстановления, — неизбежно наличие углекислоты, которая должна быстро переходить в окись углерода, но при этом образуются новые порции углекислоты, и в газе всегда будет обнаружено ее присутствие в количестве нескольких процентов.

На рис. 84 приведены также результаты измерения давления газов в распаре. Оно в среднем составляет 68—74% от давления дутья перед воздухонагревателями.

В распаре, так же как и на третьем горизонте, шлака не наблюдается; зона шлакообразования расположена ниже распара — в залпечиках. При кратковременном понижении нагрева дутья на 150—200° в распаре был замечен шлак, но в небольших количествах. К сожалению, пробы были настолько незначительны, что полный анализ шлака произвести было невозможно. Ниже приводятся данные о составе четырех образцов шлака.

1) Шлак черный, плотный, стекловидный (%):

FeO	14,08
Fe ₂ O ₃	1,30
SiO ₂	29,80
Al ₂ O ₃	9,40
CaO	29,00
MgO	9,66

2) Шлак плотный темный (%):

SiO ₂	25,20
CaO	29,80

3) Шлак в виде отдельных кусочков (%):

Fe _{мет}	Следы
FeO	15,00
Fe ₂ O ₃	2,08
SiO ₂	30,42
CaO	28,62

4) Шлак в виде отдельных горошин зеленого цвета (%):

Fe _{мет}	0,49
FeO	10,70
Fe ₂ O ₃	3,28
SiO ₂	31,80
CaO	39,12

Так как шлакообразование в распаре отсутствовало и пустая порода оставалась в руде, не плавясь, то в отличие от магнетитовой руды, в данном случае в пробах руд не наблюдалось увеличения содержания общего железа и отмечалось даже некоторое его уменьшение, вследствие увеличения содержания в руде извести и кремнезема в результате присоединения к ней извести и мартеновского шлака.

Этим же объясняется, что процесс восстановления руды, быстро протекавший в шахте, в распаре, несмотря на высокие

температуры и исключительно благоприятный состав газа, замедлился. На пути от третьего горизонта до распара степень восстановления руд в среднем увеличилась всего на 3,1% и то лишь по пробам руд, взятым одновременно с пробами руд на третьем горизонте. Для части проб констатировано восстановление даже более низкое, чем на третьем горизонте. Объясняется это присоединением окислов железа мартеновского шлака, которые более трудно восстанавливаемы, чем окислы железных руд.

Один раз нам удалось извлечь из распара мелкие горошины металла, совершенно чистого от включений, содержавшего 0,37% Si, 1,44% Mn и 0,18% P. Средняя степень восстановления в распаре по пробам руд, взятым одновременно с пробами на третьем горизонте (табл. 50), составляет 79,2% при относительном содержании железа в виде металлического — 70,7%, закисного — 25,1% и окисного — 4,2%. Среднее содержание железа общего — 55,19%, железа металлического — 38,97%, закиси железа — 17,74% и окиси железа — 3,40%. Таким образом, в отличие от магнитогорских руд, процесс восстановления криворожских руд не заканчивается в распаре. Колебания в степени восстановления по отдельным пробам руды в распаре так же велики, как и в шахте в некоторых пробах при содержании железа общего 50,41% металлического железа — 42,52%; наряду с этим в отдельных пробах при содержании железа общего 51,92% металлического железа — только 17,12%.

В табл. 51 приводятся средние данные для сравнения восстановимости руд в распаре доменных печей № 1 Магнитогорского завода и № 3 «Запорожстали».

Таблица 51

Средний состав руды в распаре (%)

	Доменная печь № 3 Запорож- стали	Доменная печь № 1 Магнито- горского завода
Железо металлическое . . .	38,97	96,50
Закись железа	17,74	0,00
Окись железа	3,40	0,00
Железо общее	55,19	96,50
Относительное содержание железа в виде металла .	70,7	100,00
То же в виде закиси . . .	25,1	0,00
То же в виде окиси	4,2	0,00
Степень восстановления по кислороду	79,2	100,00

В табл. 52 приведен состав кокса и известняка по всем четырем горизонтам. Из приведенных данных видно, что известняк на пути от колошника к распару превратился полностью в известь.

Таблица 52

Состав кокса и известняка по горизонтам

	Расстояние от кладки мм	Состав кокса, %			Состав известняка, %			
		зола	сера	летучие	CaO	CO ₂	SiO ₂	MgO
Средний состав кокса, загружаемого в печь в период исследований	—	9,30	1,28	1,60	54,8	44,0	0,79	0,68
Первый горизонт	300—600	11,80	1,15	—	55,0	43,7	0,60	0,70
	1000—1300	11,91	1,20	0,74	—	—	—	—
Второй горизонт	0—300	11,20	1,10	—	—	—	—	—
	500—800	14,15	1,13	1,18	73,50	14,84	—	—
	1000—1300	15,80	1,05	—	—	—	—	—
Третий горизонт	0—300	12,36	1,16	1,36	87,44	4,12	1,24	—
	200—500	10,56	1,09	0,83	89,10	4,40	1,32	—
	500—800	12,00	1,07	1,13	87,66	3,80	1,68	1,48
Четвертый—распар	0—300	15,83	1,15	0,65	95,92	1,74	1,24	—
	200—500	12,80	1,09	1,00	92,15	2,57	1,44	—

Исследования процессов восстановления руд непосредственно в мощных доменных печах показали, что при работе на разных рудах процессы восстановления протекают совершенно различно. Магнитогорская руда оказалась более удобовосстановимой при высокой температуре, чем криворожская. При работе на последней шлакообразование в том виде, как оно обычно представляется, не наблюдается почти до самого распара. Анализы проб руд показывают, что по мере опускания руды в нижние горизон-

ты состав пустой породы ее, по сравнению с ее составом в исходной руде, изменяется довольно существенно. Эти изменения не могут быть объяснены механической примесью извести и других составных частей шихты.

Образцы руд на различных горизонтах представляют однородную массу, но различного химического состава. Следует признать, что в доменных печах материалы могут реагировать в твердом состоянии. В куске руды, особенно криворожской, одновременно с процессами восстановления происходит процесс шлакообразования в твердом состоянии (всухую). Этим объясняется появление сухого шлака. Процесс шлакообразования в твердом состоянии, повидимому, начинается с момента спекания руд. Этому процессу способствует мелко распыленная известь, количество которой в середине шахты уже довольно велико. Мелкая известь, внедряясь в поры руды, соприкасается с пустой породой и в твердом состоянии образует с ней шлак.

В настоящее время имеются довольно подробные и всесторонние исследования, доказывающие, что реакции в твердом состоянии имеют большое развитие.

Еще в прошлом столетии было установлено, что в твердом состоянии между веществами происходят обменные реакции. Но только позже было доказано, что химические реакции в твердом состоянии при определенных условиях имеют широкое развитие. Выше уже отмечалось, что при кратковременном понижении нагрева дутья на $150\text{--}200^\circ$ в распаре появляется шлак. Влияние температуры дутья может быть объяснено тем, что при постоянном количестве дутья (в m^3) понижение нагрева его приводит к понижению давления дутья. Дутье, поступающая с пониженным давлением, имеет меньшую живую силу и по выходе из фурм устремляется в большей степени вверх вдоль кладки печи, тогда как то же количество дутья, будучи нагретым до более высокой температуры, поступает в печь с более высоким давлением и стремится проникнуть дальше в горизонтальном направлении в глубь горна. Вследствие этого при пониженном нагреве дутья конфигурация окислительной зоны такова, что она в большей мере вытянута по вертикальной оси, чем по горизонтальной, и поток горячих газов в большем количестве устремляется вверх, вдоль кладки печи. Температура в заплечиках, распаре и нижней части шахты повышается, и тестообразные массы первичных шлаков переходят в жидкое состояние. У оси печи, в заплечиках, распаре и нижней части шахты, вследствие поступления туда меньшего количества горячих газов, температура соответственно понижается; но это на ровности хода печи не отражается.

Таким образом, при постоянном количестве дутья и неизменном расходе кокса кратковременное понижение нагрева

дутья действует весьма благотворно при зависаниях печи или тугом ходе ее.

Такой метод регулирования хода доменных печей давно известен практикам, и они широко им пользуются. Снижение нагрева дутья приводит к перераспределению температуры на различных горизонтах в нижней части печи; у периферии температура повышается, а у оси снижается. При повышении нагрева дутья поток горновых газов устремляется в большей мере к осевой части печи, окислительная зона вытягивается в горизонтальном направлении и уменьшается в вертикальном. Кроме того, объем окислительной зоны с повышением нагрева дутья уменьшается. Все это суммарно приводит к тому, что поток горячих газов в меньшей мере (чем при пониженном нагреве дутья) устремляется вдоль периферии печи, и в заплечиках, распаре и нижней части шахты у кладки температура понижается, тогда как на этих же горизонтах печи у осевой части температура соответственно повышается. Нагреву дутья и влиянию его на расход кокса посвящена весьма обстоятельная работа А. Д. Готлиба [61].

Многими исследователями, в том числе нами, установлено, что в распаре доменных печей при температурах до 1200—1250° в газе неизменно содержится несколько процентов углекислоты. До сих пор на основании лабораторных исследований Будуара границей между прямым и непрямым восстановлением считается температура в 950°. Это справедливо для случая, когда газ (как было у Будуара) длительное время выдерживается при высокой температуре (950° и выше): тогда углекислота полностью переходит в окись углерода; но это неверно для реальных условий доменной печи, где углекислота в газе в области высоких температур находится доли секунды и, не успев прореагировать с углеродом кокса, уходит в верхние горизонты печи. Таким образом, правильнее считать границей прямого и непрямого восстановления не 950°, а 1200°. До этой температуры многими заводскими исследователями установлено в газе постоянное содержание углекислоты в несколько процентов.

Ранее уже отмечалось, что в работах Кини [50] между составом газа и температурой его наблюдается несоответствие, которое видно даже малоопытному исследователю доменного процесса. При наличии многочисленных советских исследований мощных доменных печей, опровергающих данные Кини, совершенно недопустимо пользоваться только результатами исследований последнего. Использование данных Кини может привести к грубым ошибкам. Примером тому является работа Б. И. Китаева [62] по теплообмену в шахтных печах. Б. И. Китаев, вопреки экспериментальным заводским исследованиям, утверждает, что

«в современных печах имеется довольно значительная высота, не участвующая в теплообмене».

Поскольку Б. И. Китаев излагает свой совершенно неправильный вывод в трудах, изданных в 1945 и 1949 гг., мы вынуждены привести еще раз измеренные нами температуры у периферии по высоте современных мощных доменных печей. Следует оговориться, что оперировать средней температурой газов на том или ином горизонте невозможно, так как температуры газов в любой точке такого горизонта известны, но количество газа, проходящего через эти точки, — неизвестно. Кроме того, средняя температура на каждом горизонте, даже выведенная с большими допущениями, совершенно не отражает истинного состояния на этом горизонте, поскольку разность температур у периферии и у оси печи на каждом горизонте составляет $250\text{—}450^\circ$ и, например, температура у оси распара близка к температуре у периферии в средней части шахты. В доменной печи встречаются одинаковые температуры в точках, отстоящих одна от другой по высоте на $6000\text{—}8000$ мм, но разны удаленных от кладки шахты.

Ввиду такого распределения температур по высоте и по радиусу печи на одном и том же горизонте происходят самые разнообразные процессы, связанные как с выделением тепла, так и с поглощением его. Поэтому в соответствии с экспериментальными данными по составу газов и материалов и по распределению температур на том или ином горизонте можно говорить лишь о замедлении или ускорении теплообмена на том или ином горизонте печи, но не о прекращении его.

В связи с этим и теплообмен в современной доменной печи происходит по всей высоте ее, и «холостой» высоты в доменной печи нет.

Б. И. Китаев, исходя из неправильных предпосылок, попытался свою «теорию» «холостой» высоты облечь в стройную математическую форму. Но давно известно, что математика не помогает там, где основа, из которой исходят при построении того или иного математического выражения, является ложной. Это наглядно видно из данных табл. 53.

Температура в заплечиках в доменных печах Запорожского и Магнитогорского заводов не измерялась, поэтому перепад температур проведен только между горном и распаром (без заплечиков). Измерения же температур в других печах показали, что температура в заплечиках на границе окислительной зоны не превышает 1450° , поэтому, если условно принять для печей Запорожского и Магнитогорского заводов границу окислительной зоны выше осей фурм на 2000 мм, то перепад температур по высоте печей выразится цифрами табл. 54. (см. рис. 162).

Таблица 53

Температуры по высоте печи в области максимальных и минимальных температур

Доменная печь № 3 Запорожстали						Доменная печь № 1 Магнитогорского завода			
Расстояние от осей фурм, мм	Область печи	Максимальная температура, °С	Перепад температуры на 1 м высоты, °С	Минимальная температура, °С	Перепад температуры на 1 м высоты печи, °С	расстояние от осей фурм, мм	Область печи	Максимальная температура, °С	Перепад температуры на 1 м высоты печи, °С
0,0	Горн	1900	—	1370	—	0	Горн	1900	—
—	—	—	137	—	94	—	—	—	135
4 360	Распар	1300	—	960	—	5 169	Распар	1200	—
—	—	—	31	—	31	—	—	—	40
9 350	Низ шахты	1145	—	805	—	7 659	Низ шахты	1100	—
—	—	—	37	—	45	—	—	—	20
15 290	Середина шахты	925	—	540	—	13 829	Середина шахты	980	—
—	—	—	63	—	39	—	—	—	57
21 350	Верх шахты	540	—	305	—	20 140	Верх шахты	620	—

В заключение необходимо отметить, что область первичного шлакообразования (нижняя часть шахты и распар) является очагом завесаний и тугого хода доменных печей, если шлакообразование протекает ненормально и первичные шлаки находятся в малоподвижном состоянии (клейкие и густые). Это явление усугубляется еще и тем, что пустая порода руды, если нет своевременного шлакообразования, опускается в зоны высоких температур, начинает плавиться вместе с недвосстановленными окислами железа и ухудшает общее положение. В связи с этим, особый интерес приобретают исследования температур размягчения различных руд, в зависимости от пустой породы их и состояния (куски, мелочь, агломерат).

Люйкен и Кребер [63], изучая температуры размягчения руд и агломератов из них, пришли к неправильному выводу, что для доменных печей наиболее благоприятным является медленное размягчение руд во избежание сырого хода.

М. С. Гончаревский в своей работе по определению температур размягчения различных руд и агломератов из них как в сыром виде, так и частично восстановленных установил, что у пред-

Таблица 54

Температуры по высоте печи в области максимальных и минимальных температур

Доменная печь № 3 Запорожстали						Доменная печь № 1 Магнитогорского завода			
Расстояние от осей фурм, м.м	Область печи	Максимальная температура, °С	Перепад температуры на 1 м высоты печи, °С	Минимальная температура, °С	Перепад температуры на 1 м высоты печи, °С	Расстояние от осей фурм, м.м	Область печи	Максимальная температура, °С	Перепад температуры на 1 м высоты печи, °С
0,0	Горн	1900	—	1370	—	0	Горн	1900	—
—	—	—	225	—	—	—	—	—	225
2000	Заплевичики	1450	—	—	—	2000	Заплевичики	1450	—
—	—	—	63	—	—	5169	Распар	1200	79
4360	Распар	1300	—	960	—	—	—	—	40
—	—	—	31	—	31	7659	Низ шахты	1100	—
9350	Низ шахты	1145	—	805	—	—	—	—	20
—	—	—	37	—	45	13 829	Середина шахты	980	—
15 290	Середина шахты	925	—	540	—	—	—	—	57
—	—	—	63	—	39	20 140	Верх шахты	620	—
21 350	Верх шахты	540	—	305	—	—	—	—	—

варительно восстановленных руд начальная температура размягчения значительно ниже, чем у сырой руды. В связи с этим он пришел к совершенно правильному выводу о том, что в реальных условиях доменной печи начало размягчения наступает раньше, чем это установлено для сырой руды. Температура начала размягчения, согласно исследованиям М. С. Гончаревского, находится в зависимости от состава пустой породы. А. Д. Готлиб, исследуя процесс размягчения магнитогорских руд и агломератов из них, пришел к заключению, что температура начала размягчения у агломератов выше, чем у руд, из которых они изготовлены; более богатый агломерат с меньшим содержанием кремнезема дает более высокую температуру начала размягчения; повышение содержания кремнезема в рудах и агломератах снижает температуру размягчения.

Руды с более высоким содержанием закиси железа имеют более низкую температуру размягчения

Изучение температур размягчения криворожских, оленегорских и енских руд было проведено нами совместно с А. С. Аюковым в графитовом тигле в печи Таммана. Графитовый тигель был выбран для того, чтобы приблизить опыты к условиям до-

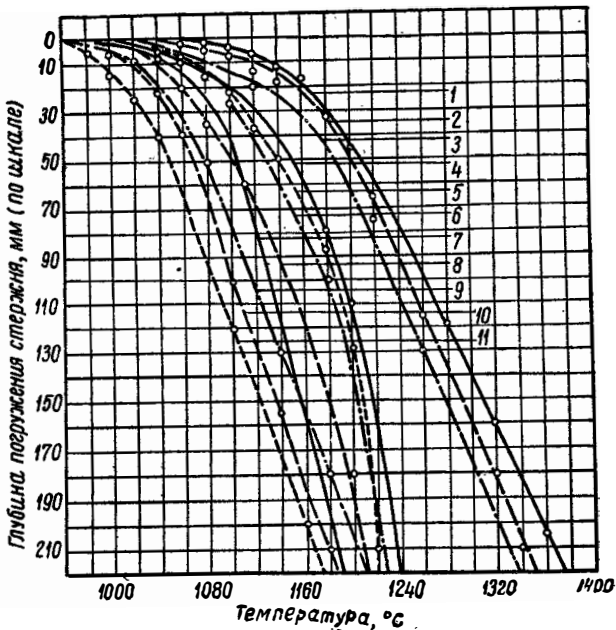


Рис. 85. Температуры размягчения различных руд, концентратов и агломератов из них:

- 1 — енская руда; 2 — енский концентрат; 3 — енский агломерат; 4 — криворожский самоплавкий агломерат; 5 — оленегорская руда; 6 — криворожская бедная руда; 7 — криворожская руда; 8 — оленегорский концентрат; 9 — оленегорский агломерат; 10 — криворожский самоплавкий агломерат; 11 — криворожский агломерат

менной печи. Углерод тигля при высоких температурах восстанавливал часть окислов руды, непосредственно соприкасавшиеся с тиглем, чем и создавалась некоторая аналогия с доменной печью.

Подной аналогии с доменной печью в лабораторных условиях достигнуть трудно, так как руда в печи находится не только под воздействием высоких температур и давления (что легко воспроизвести в лабораторных условиях), но и под воздействием газа-восстановителя, непрерывно меняющего свой состав и состав руд. Все же относительные данные, характеризующие начало и длительность периода размягчения, можно получить и в лаборатории.

На рис. 85 приведены для сравнения результаты исследований ёнских, оленегорских и криворожских руд. Из кривых рисунка видно, что начало размягчения этих руд лежит в пределах температур 980—1080°, конец размягчения — при температурах 1170—1370°.

Из исследований вытекает, что количество пустой породы не влияет на процесс размягчения руд.

Качество пустой породы руды играет важную роль: при трудноплавкой пустой породе размягчение начинается при более высокой температуре, и температурный интервал от начала размягчения до конца его расширяется. Вследствие этого у ёнской руды и агломератов из нее размягчение начинается при температуре на 80—100° выше, чем у оленегорских и криворожских руд и агломератов из них. Температурный интервал от начала размягчения до конца его у первых по сравнению с последними в полтора раза больше и составляет 280—290°.

Закись железа в агломерате способствует понижению температуры его размягчения (агломерат № 4 — 12,7% FeO, а № 10 — 24,5% FeO).

Температуры, при которых происходит размягчение руд, соответствуют температурам нижней части шахты и распара доменной печи. Более позднее начало размягчения благоприятствует полноте восстановления железа из окислов руды, но больший температурный интервал, в котором руда находится в размягченном и тестообразном состоянии, способствует подвисяниям доменной печи и должен быть признан нежелательным. В связи с последним температуру размягчения у ёнской руды, а также и агломерата из нее надо считать менее благоприятной, чем у оленегорской и криворожской руд и агломератов из них.

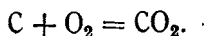
ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ГОРНЕ МОЩНЫХ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

ГЛАВА 6

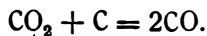
ГОРЕНИЕ УГЛЕРОДА КОКСА

Процесс горения углерода кокса в горне доменной печи является сложным гетерогенным процессом и до сих пор недостаточно изучен, как и вообще процессы горения углерода топлива, в отношении физико-механических превращений, происходящих при горении, особенно кинетика их.

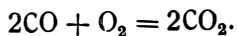
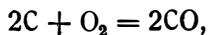
Изучением механизма горения углерода занимаются давно. Исследования проводились наиболее полно физико-технической лабораторией ВТИ [64]. Некоторые исследователи [65] считают, что первичной реакцией горения углерода с кислородом является углекислота по схеме



Скорость образования углекислоты ограничивается только диффузией кислорода через газовую пленку, имеющуюся вокруг каждой из частиц горячего, и окись углерода образуется только по реакции

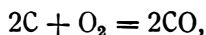


Другие исследователи [66] считают, наоборот, что первичной реакцией горения углерода является окись углерода, а углекислота — вторичным продуктом по схеме

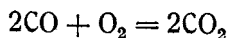


Было доказано, что в сухом кислороде при нагревании древесного угля основным продуктом является окись углерода, и даже при яркокрасном калении сухая углекислота не восстанавливается древесным углем. Отсюда следует, что в горне доменной печи пары воды (из дутья) служат катализатором для образования углекислоты.

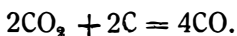
Работами Л. И. Хитрина и Х. И. Колодцева [64] установлено, что при высоких температурах первичной реакцией является реакция образования окиси углерода



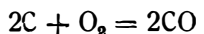
догорающей при наличии кислорода в газовой фазе в углекислоту



с последующим восстановлением в окись углерода при избытке углерода горючего

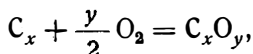


В случае высоких скоростей газового потока непосредственным продуктом горения будет только окись углерода

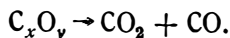


без догорания ее в CO_2 и последующего восстановления в CO , но это имеет место преимущественно при сгорании мелкого топлива размером 1—2 мм. При применении же крупного топлива (что имеет место в доменной печи) большое количество дутья и повышенные скорости газового потока ведут к увеличению окислительной зоны с догоранием CO в CO_2 и последующим восстановлением в CO .

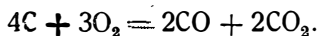
З. Ф. Чуханов [64] и другие считают, что первоначально образуется физико-химический комплекс по схеме



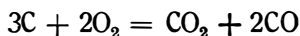
затем в итоге термической диссоциации образуются углекислота и окись углерода



Меер установил, что при температурах до 1200° происходит предварительное растворение кислорода в графитовой решетке, ослабляющее связи и катализирующее реакцию



Другой исследователь пришел к выводу, что при высокой температуре (1500 — 2300°) реакция протекает по схеме



и идет за счет адсорбированного кислорода.

По мнению Ленгмюра, адсорбция кислорода протекает на поверхности углерода. Опыты С. Э. Хайкиной [67] показали, что

в результате первичного акта образуется CO и CO₂, а также физико-химический комплекс C_xO_y, находящийся в тесной связи с адсорбцией кислорода.

Образование комплекса C_xO_y определяется путем магнитных изменений, так как газообразный или молекулярно-адсорбированный кислород сильно парамагнитен, а химически связанный кислород теряет свой парамагнетизм.

До 150° газообразный продукт реакции горения не образуется, но благодаря адсорбции кислорода на поверхности углерода уже при низких температурах начинается связывание кислорода с углеродом, и атомы углерода, поглотившие первые частицы кислорода, находятся в промежуточном состоянии между твердым и газообразным углеродом.

Воспламенение горячего можно рассматривать как явление, при котором первоначально происходит концентрация окиси углерода на поверхности углерода, затем окись углерода воспламеняется и приводит к горению твердого углерода.

В зависимости от температуры в области горения отношение CO/CO₂ подчиняется закону Аррениуса

$$[\text{CO}/\text{CO}_2] = f(T) = A e^{-\frac{E_1 - E_2}{RT}},$$

где E_1 — энергия активации реакции образования CO из O₂;

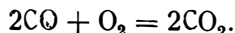
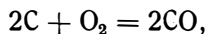
E_2 — энергия активации реакции образования CO₂ из O₂.

В горне доменной печи при больших скоростях дутья и высоких температурах горение идет по реакциям:



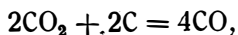
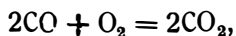
Реакция (1) является первоначальной. Реакция (2) имеет сильное развитие до «фокуса горения». Реакция (3) протекает преимущественно за «фокусом горения».

В процессах горения углерода адсорбция кислорода на поверхности углерода горячего, бесспорно, имеет место. Что же касается преимущественного развития какой-либо реакции, то до «фокуса горения» при больших скоростях дутья, высоких температурах и избытке кислорода имеет место главным образом горение в углекислоту по реакциям



В продуктах горения имеются свободный кислород, азот, углекислота и лишь незначительное количество окиси углерода.

Максимальная температура горения совпадает с максимальным содержанием углекислоты в продуктах горения и небольшими количествами кислорода и окиси углерода. За «фокусом горения» кислород быстро убывает до нуля, и идут реакции горения в углекислоту и окись углерода:



причем последняя реакция имеет преимущественное развитие, а после исчезновения кислорода — исключительное.

Так как реакция образования окиси углерода сопровождается поглощением тепла (75 420 кал на 4CO), то за «фокусом горения» температура быстро понижается в направлении к оси горна. В продуктах горения исчезает кислород, затем углекислота и быстро растет содержание окиси углерода, содержание азота сначала уменьшается, а затем остается неизменным. Концом окислительной зоны и началом восстановительной следует считать границу исчезновения не только кислорода, но и углекислоты, так как при высоких температурах горения углекислота является активным окислителем.

При нормальном ходе доменной печи за пределами окислительной зоны или на границе ее в продуктах горения содержится 34,7% CO и 65,3% N₂. Небольшое количество водорода, образующееся из влаги дутья, несколько изменяет это соотношение. По направлению к оси горна соотношение между окисью углерода и азотом изменяется в сторону увеличения содержания окиси углерода и уменьшения содержания азота за счет реакций прямого восстановления, протекающих как в восстановительной зоне горна, так и ниже окислительной.

Реакция образования окиси углерода из кислорода дутья и углерода горючего в первую очередь протекает на наружной поверхности кусков горючего. При низких температурах и малых скоростях химических реакций и больших скоростях притока кислорода часть его будет проникать внутрь кусков горючего. Глубина проникновения кислорода внутрь куска будет зависеть от скорости диффузии кислорода. Горение углерода топлива будет проходить в объеме куска горючего. При высоких же температурах горения (что имеет место в горне доменной печи) скорости химических реакций настолько велики по сравнению со скоростью диффузии, что кислород при проникновении его внутрь куска быстро расходуется на химическую реакцию, парциальное давление его быстро приближается к нулю, и горение идет преимущественно на поверхности горючего.

Пористость горючего увеличивает поверхность горения, отсюда ясно, что древесный уголь горит быстрее кокса, а кокс горит быстрее антрацита, и объем зон горения при одном и том же количестве углерода будет во всех этих случаях различным. В процессе горения кислород должен проникать из внешней среды путем диффузии через газовую пленку, образованную продуктами горения на наружной поверхности кусков горючего. Парциальное давление кислорода у поверхности кусков горючего будет ниже, чем в газовой среде, и будет зависеть от толщины газовой оболочки, а последняя, в свою очередь, — от скорости газового потока, определяемого критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega d \varphi}{\mu},$$

где ω — скорость газов, м/час,

d — диаметр трубы, см,

φ — удельный вес газа, кг/м³,

μ — коэффициент внутреннего трения газа (вязкость), кг/м · час.

Численные значения критерия Рейнольдса дают представление о ламинарном и турбулентном движении газа.

В условиях горна доменной печи имеет место турбулентное движение как дутья, так и газов. Влияние газовых оболочек, образованных продуктами горения вокруг кусков горючего, имеет при турбулентном движении газов минимальное значение.

Для характеристики газового потока, в случае кусковых материалов, критерий Рейнольдса (после замены значения d — диаметр трубы — на d_1 — диаметр кусков горючего) приобретает вид:

$$Re = \frac{\omega d_1 \varphi_{ср}}{\mu}.$$

Толщина газовой оболочки определяется в зависимости от критерия Рейнольдса:

$$B = \frac{C}{\sqrt{Re}},$$

где B — толщина пленки, см,

C — постоянная.

Формула выведена С. Т. Ростовцевым [68] из формулы Бурке и Шумана, определяющей толщину пленки B :

$$B = 2 \sqrt{\frac{\mu d}{\rho_{ср} \omega}},$$

где μ — вязкость газовой среды, $г/см \cdot сек$,
 d — диаметр сферического куска топлива, $см$,
 φ — плотность газа, $г/см^3$,
 ω — скорость газового потока, $см/сек$.

Отсюда следует, как вывод, что чем больше критерий Рейнольдса (чем выше турбулентность газового потока), тем тоньше газовая оболочка.

С. Т. Ростовцев [68] для скорости химической реакции в куске горючего приводит формулу

$$v = P''_{O_2} \sqrt{D} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{\alpha\beta K}} + \frac{1}{\sqrt{Re \cdot D}}}$$

где P''_{O_2} — парциальное давление кислорода в протекающих газах,

D — коэффициент диффузии,
 α — поверхность пор в единице объема,
 β — относительный объем пор в куске,
 K — постоянная скорости химической реакции,
 C — постоянная.

Из формулы можно сделать следующие выводы.

1. Скорость горения прямо пропорциональна содержанию кислорода в газовом потоке. Следовательно, при дутье, обогащенном кислородом, скорость горения будет расти и объем окислительной зоны горна будет сокращаться, при сохранении постоянными всех других условий.

Исследования Л. Н. Хитрина и Х. И. Колодцева [64], посвященные влиянию содержания кислорода в дутье на состав газа в зоне горения, подтверждают только что высказанное положение. Количество кислорода в дутье в их опытах менялось от 4 до 42%. По мере увеличения содержания кислорода кривая убывания его становилась все более крутой. Скорость убывания кислорода при 42% его в дутье идет во много раз быстрее, чем при содержании в 21%.

2. Скорость горения увеличивается с увеличением критерия Рейнольдса, т. е. увеличение газового потока прямо пропорционально скорости горения.

3. Увеличение K и D повышает скорость горения, но в условиях горения в горне доменной печи, где господствуют высокие температуры, величина константы K по сравнению с коэффициентом диффузии D очень велика, и по сравнению со скоростью химической реакции диффузия в процессе горения в горне доменной печи может играть ограничивающую роль, если величина газовой оболочки, благодаря высоким скоростям газового потока, не будет сведена практически до нуля.

Скорость горения растет пропорционально величине критерия Рейнольдса до известных пределов. После этого, благодаря высоким скоростям газов, создается ничтожно малая толщина газовой оболочки вокруг куска горючего, и скорость газового потока перестает оказывать влияние на скорость горения. Тогда скорость горения растет медленнее скорости газового потока, и горение происходит в большом объеме. В условиях доменной печи при больших скоростях газового потока объем окислительной зоны увеличивается с увеличением скорости дутья, что, при неизменном диаметре фурм, равносильно увеличению количества дутья. К аналогичному выводу пришел и Н. В. Лавров [69], который в итоге своих исследований установил, что «длина кислородной зоны возрастает с увеличением линейной скорости подачи дутья и резко сокращается с повышением температуры реагирования».

В горне доменной печи нельзя наблюдать последовательность в ходе отдельных степеней процесса горения, на которые только что было указано.

У глаза фурм находится большой избыток кислорода и незначительное количество углекислоты. Далее по направлению струи дутья количество свободного кислорода постепенно уменьшается, а углекислоты — увеличивается; однако максимум углекислоты, сосредоточенный в так называемом «фокусе горения», далеко не достигает теоретического (21%), так как кислород дутья идет на окисление не только углерода, но и примесей железа и самого железа. За фокусом горения углекислота переходит в окись углерода, и на границе восстановительной зоны содержание последней устанавливается значительно выше, чем теоретически возможное при горении углерода, вследствие того, что кроме окисления углерода идет и окисление примесей железа.

Перейдем к изложению того, что мы наблюдали в действительности в горнах исследованных нами доменных печей.

Горение углерода горючего в горне доменной печи зависит как от физических качеств горючего и температуры дутья, так и от состояния горна, давления в печи газов, распределения материалов и газов в шахте и хода процессов плавления и шлакообразования в областях, лежащих выше горна.

При определении размеров зон горения чрезвычайно важно учитывать все эти факторы, иначе говоря, нельзя сравнивать окислительные зоны в разных доменных печах вне зависимости от этих факторов.

Даже физические качества горючего, при сохранении всех

прочих условий работы доменной печи постоянными, оказывают громадное влияние на размеры зон горения.

Поскольку горение происходит на поверхности соприкосновения кислорода дутья с углеродом горючего, то чем больше эта поверхность, тем быстрее и в меньшем объеме будет поглощаться кислород дутья. Поверхность, на которой реагирует кислород дутья с углеродом горючего, определяется отношением площади пор к объему горючего ($см^2/см^3$).

Отсюда, поскольку различные виды горючего имеют различную поверхность пор на единицу объема, при определении факторов, влияющих на величину окислительной зоны горна, следует учитывать показатели, полученные на различном горючем. Тем более это необходимо при сравнении размеров окислительных зон различных доменных печей, работающих в разных условиях.

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА ГАЗА В ГОРНЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ЗОНЫ ОТ КОЛИЧЕСТВА ДУТЯ, УПРУГОСТИ ЕГО И ТЕМПЕРАТУРЫ

В процессах, протекающих в доменной печи, горн занимает весьма важное место. Изучение состава газа и температур по радиусу горна (в плоскости фурм) позволяет судить о физико-химических превращениях, происходящих в горне.

Отбор проб газа по радиусу через фурму является сравнительно простой операцией и не представляет особых трудностей. Обычно пользуются охлаждаемой водой трубкой и отбирают при помощи бюреток необходимое количество газа. Первые исследования состава газа были проведены еще на маленькой древесноугольной печи с прямоугольным горном. Печь работала на смеси древесного угля с дровами и имела всего лишь одну фурму [70]. Впоследствии такие исследования были повторены на печи с диаметром горна 3 метра, работавшей на коксе и имевшей уже 5 фурм [71].

Исследования, проведенные за границей в XX в. — в США, Англии и Германии [72, 73, 74] привели к неправильным выводам о том, что окислительная зона горна является неизменной и что в восстановительной зоне, преимущественно у оси горна, существуют низкие температуры и «мертвый столб» материалов, а вследствие этого в восстановительной зоне почти никаких реакций не протекает. Эти выводы являются господствующими за границей и по настоящее время, хотя некоторыми исследователями они опровергались [75, 76].

В СССР было проведено очень много работ по изучению влияния количества и упругости дутья на размеры зон горения. Наши многократные исследования [77] на Магнитогорском и Запорожском заводах показали, что окислительная зона горна меняется в широких пределах 0,7—2 м, в зависимости от количества дутья, поступающего через фурмы в доменную печь. Такое изменение в площади дает разницу между минимумом и максимумом в 8 раз и в объеме в 23 раза. Установлена также взаимосвязь между давлением дутья и размерами зон горения.

З. И. Некрасов [78] провел аналогичные исследования на доменной печи Днепродзержинского завода и установил, что при изменении диаметра фурм с 200 до 250 мм (при одинаковом количестве дутья менялось давление его) размеры окислительной зоны сокращаются в линейных единицах на 250 мм, по площади в 1,5 раза и по объему в $1\frac{3}{4}$ раза. Такую же связь он установил и при изменении давления дутья с 1,2 до 0,6 атм. Окислительная зона в этом случае сократилась на 700 мм или по площади в $3\frac{3}{4}$ раза и по объему в $7\frac{1}{4}$ раза.

Исследования состава газа в горне доменных печей автора с Н. М. Якубцинером и И. А. Гореликом, Н. И. Красавцева и А. П. Любана [79], Л. М. Цилева [80], В. Т. Басова [81], М. М. Лейбовича, Я. М. Гольмштока, Д. С. Хорунова и А. П. Афанасьева [82], М. Я. Остроухова, проф. И. А. Соколова и Н. И. Круглова [83] существенно дополнили имеющийся экспериментальный материал по исследованию окислительной зоны горна.

Несмотря на большое количество научно-исследовательских работ по изучению зоны горения в горне доменной печи, до сих пор еще существуют различные взгляды по вопросам влияния количества дутья на размеры окислительной зоны.

При изучении процессов горения углерода кокса в доменной печи и скоростей реакций горения было установлено, что размеры зоны горения зависят от вида горючего, его качества и отношения реагируемой поверхности к объему пустот. При одном и том же количестве углерода каждому виду горючего при горении будет соответствовать различная по размерам зона горения. Акад. М. А. Павлов [84] считает, что «увеличение количества дутья — при равных качестве горючего, температуре и давлении дутья — должно требовать увеличения реактивной поверхности горючего, а следовательно, и объема, занимаемого им».

Определять зависимость окислительной зоны горна от количества дутья или температуры его и давления необходимо на одной и той же доменной печи, имеющей установленный дутьевой и температурный режим работы, соответствующий профилю, а также качеству проплавленных сырых материалов и горючего. Только оставляя неизменными качество и количество проплавленных сырых материалов и горючего, систему и порядок загрузки, установленный температурный режим и вид проплавляемого чугуна и шлака, совокупно создающие определенное состояние горна, можно изменять давление и количество дутья и, таким образом, устанавливать влияние его на размеры окислительной зоны горна. Сравнение же размеров окислительной зоны разных по размерам доменных печей, без учета их работы на различном горючем и при различном режиме, является гру-

бой ошибкой, не позволяющей вывести истинных зависимостей зон горения от того или иного фактора, влияющего на ее размеры и конфигурацию.

Такую грубую ошибку совершили Пирот и Кини [72], определившие средний состав газа в горне доменной печи, выведенный из состава газа одиннадцати различных и по-разному работавших доменных печей. Из сравнения печей, исследованных Пиротом и Кини, видно, что они имели различные размеры, сырые материалы и горючее, температурно-дутьевой режим работы и производительность и выплавляли чугуны разных сортов. Так, для сравнения приведена печь с диаметром горна 3,75 м и полезным объемом 295 м³ и наряду с этим печь с диаметром горна 5,79 м и полезным объемом 661 м³, т. е. отличающиеся одна от другой по объему в 2¼ раза. Высота исследованных печей менялась от 24,08 до 30,48 м, пористость кокса — от 44 до 53%, а реактивная способность — от 10 до 43, содержание железа в руде — от 35 до 53%, температура дутья — от 482 до 620°, производительность печей — от 220 до 575 т в сутки, т. е. больше, чем в 2,5 раза. Чугун выплавлялся как обыкновенный передельный, так и зеркальный. Расход кокса изменялся в пределах 0,759—1,502. Совершенно ясно, что все исследованные печи, являясь разнотипными по размерам, режиму работы, проплавленным сырым материалам и горючему и работая с резко различным расходом кокса, для вывода средних данных о размерах окислительной зоны не подходят. Если бы Пирот и Кини попробовали исследовать каждую печь в отдельности, сохраняя на ней все перечисленные факторы постоянными и изменяя лишь количество дутья, то они пришли бы, бесспорно, к выводу о зависимости зоны горения от количества дутья, температуры его и давления.

Аналогичную ошибку совершил и Леннингс [73], который провел исследования на доменной печи объемом 575 м³, диаметром горна 3,9 м. Печь выплавляла мартековский чугун из шихты, в которую входило 42—52% агломерата.

Результаты его исследований находятся в противоречии с его же выводами.

Леннингс проанализировал около 600 проб газа, взятого на горизонте фурм в различных точках по радиусу, и по ним вывел средний состав газа, приводимый теперь во многих учебниках. Из кривых среднего состава газа видно, что фокус горения отстоит от глаза фурмы на расстоянии 600 мм, кислород простирается до 800 мм и углекислота до 1200 мм.

Данных о независимости размеров зоны горения от количества дутья, температуры его или давления Леннингс не приводит; тем не менее, он утверждает, что размеры окислительной зоны

являются постоянными. На чем основано такое утверждение — неясно.

Второе необоснованное утверждение, выдвинутое Леннингом, заключается в том, что у оси горна существует «мертвый столб» материалов. В доказательство он приводит отсутствие сопротивления движению газозаборной трубы в области горения и большое сопротивление движению трубы за ее пределами. Труба могла туго подвигаться из-за изгиба ее или неправильной центровки и, вследствие этого, трения о стенки фурменного рукава, сопла и фурмы.

Столь несовершенный метод не может служить критерием состояния горна. Такими критериями могут быть температура, состав газа и его давление.

Температуру газа и давление его в горне доменной печи Леннингс не указывает, а из приведенного состава газа следует, что у оси горна было 40,0% окиси углерода, около 1,5% водорода и 58,5% азота. Следовательно, газ легко проникал из окислительной зоны до оси горна, и утверждение о наличии там «мертвого столба» материалов неправильно. Если бы у оси горна был «мертвый столб», то азота там совершенно не было бы, ибо газы из окислительной зоны не проникали бы к оси горна, а другого источника появления азота нет.

Введение влаги в дутье сразу же отразилось на составе газа не только в окислительной зоне, но и у оси горна. Содержание водорода резко возросло по всему радиусу горна, что также говорит о хорошем проникновении газов до оси горна.

Аналогичную ошибку допустил и А. П. Любан [85]. В своей статье «О влиянии некоторых факторов на величину зоны горения перед фурмами» он пришел к выводу, что «кривые состава газа перед фурмами доменных печей показывают, что изменения состава газов очень сходны между собой в отношении границ исчезновения кислорода и углекислоты для самых различных печей, дающих от 100 т чугуна в сутки до 1300 т». В доказательство этого положения он приводит вычерченные им кривые состава газа в печи, выплавлявшей томасовский чугун, исследованной Фан-Флотеном (причем данные Фан-Флотена не согласуются с приведенными А. П. Любаном кривыми); и одновременно — уже выше разобранные результаты исследований Пирота и Кини, а также печей, работающих на ферроманган и ферросилиций; последняя работала на дутье, обогащенном до 33% кислородом.

Приведенные для сравнения кривые совершенно не подходят для суждения о том, как отдельные факторы влияют на величину зоны горения, потому что они получены на различных по размерам и условиям работы печах, выплавляющих различные чугуны (от пердедельного до ферромангана и ферросилиция)

как на обычном, так и на обогащенном кислородом дутье с различным температурно-дутьевым режимом.

Различные факторы влияют по-разному на размеры зоны горения: одни увеличивают, другие сокращают окислительную зону. Не учитывая их, можно всегда формальным сравнением прийти к ошибочным выводам. А. П. Любан привел состав газа, полученный на доменной печи № 3 Азовстали при давлении дутья 0,1—0,2 *ати*. В печь поступало ничтожное количество дутья и, как следовало ожидать, фокус горения был расположен на расстоянии всего лишь 100 *мм* от глаза фурмы. Кислород практически исчезал на расстоянии 100 *мм*, а углекислота — 800 *мм*. Дутье, поступающее в столь ничтожном количестве, не могло проникать далеко в слой кокса, и горение происходило у стен горна. Газ двигался кверху только у стен шахты. По непонятным мотивам не приведен состав газа, полученный им в той же печи на нормальном дутье и при нормальном давлении дутья, а именно это и нужно было сделать для сравнения. В этом случае фокус горения отстоял на 600 *мм* от глаза фурмы, кислород исчезал не на расстоянии 100 *мм*, а значительно дальше — 800 *мм*, и углекислота доходила до 1300 *мм*.

Такое сравнение показало бы, что размеры окислительной зоны, полученные на одной и той же печи, при неизменных прочих условиях, на переменном количестве дутья и его давлении резко различны.

Совершенно невероятным представляется состав газа, приведенный там же А. П. Любаном (по данным Кини), при давлении дутья 0,07 *ати*. Такое ничтожное давление означает, что практически в печь почти не поступало дутья, живая сила его была близкой к нулю. Встречаясь с первыми кусками кокса, дутье должно было прекратить у глаза фурмы свое дальнейшее движение в направлении оси горна. Непонятно, какие сверхестественные силы заставили дутье проникать так глубоко в горн, что фокус горения отстоял от глаза фурмы на расстоянии 600 *мм*, т. е. таком же, как и при нормальном количестве и давлении дутья. Кислород проникал на глубину до 600 *мм*, а углекислота исчезала лишь на расстоянии 1000 *мм*.

Неправильные выводы, к которым пришли Пирот, Кини и Ленингс в итоге своих исследований состава газа в горне доменных печей и Рейнлендер в итоге измерения температуры горна, привели к тому, что постепенно сложились взгляды, господствующие до сих пор в Америке, Англии и Германии и частично нашедшие распространение и у нас.

Взгляды эти сводятся к тому, что:

1) размер зоны горения перед фурмами постоянен и не зависит от количества дутья, его давления и температуры;

2) у оси горна существует «мертвый столб» материалов, состоящий из кокса и неплавящихся материалов;

3) «мертвый столб» материалов тем больше, чем больше диаметр горна;

4) в осевой части горна температура настолько низка, что никаких реакций там не происходит.

Из всего этого, как конечный вывод, следовало, что с увеличением диаметра горна коэффициент использования площади поперечного сечения его падает.

Далее: поток материалов и газов движется в больших печах только по периферии шахты, что влечет за собой ненормально быстрый износ кладки шахты и слабое использование химической и тепловой энергии газов. Так как в печах малого и среднего размера этого нет, то они тем самым, по сравнению с большими печами, технически совершеннее и экономически рентабельнее.

Для выяснения истинного состояния больших доменных печей и, в частности, состояния горна, нами в течение длительного периода времени исследовались мощные доменные печи Магнитогорского и Запорожского заводов.

Исследования работы горна состояли из: 1) изучения влияния количества дутья и его давления на размеры зоны горения перед фурмами, 2) измерения температуры и противодавления газов в горне по радиусу, 3) изучения состава материалов на горизонте фурм.

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРНА

Для проведения исследования горна потребовались специальные трубы, охлаждаемые водой, через которые измерялась температура горна и давление газов и забирались пробы газа и материалов.

Трубы вводились в горн обычной 2—3-тонной ручной лебедкой при помощи каната, перекинутого через систему блоков. Трубы подвешивались на монорельс, который поддерживал и направлял их строго по радиусу, чтобы устранить трение о стенки фурменного рукава, сопла и фурмы.

Для ввода труб в горн был сконструирован специальный фурменный фланец (рис. 86).

При помощи передвижного клина с сальниковым устройством трубы легко вводились в горн на полном ходу доменной печи. Для забора проб газа из горна доменной печи применялись охлаждаемые водой трубы (рис. 87).

Газозаборная труба изготовлялась из трех цилиндрических трубок разного диаметра. Внутренняя трубка наименьшего диаметра была выбрана из числа имевшихся трубок стандартных размеров. Диаметр ее составлял $\frac{1}{4}$ дюйма, т. е. обеспечивал быстрый и достаточный проход газа и, вместе с тем, не позволял забиваться в трубку кусочкам кокса.

Диаметры средней трубки $1\frac{1}{2}$ дюйма и наружной $2\frac{1}{4}$ дюйма были выбраны с таким расчетом, чтобы: 1) вся труба в смонтированном виде занимала наименьшую площадь по сечению, иначе при вводе ее в горн создавалось бы такое большое сопротивление при проходе через материалы, находящиеся в горне, что даже при нормальном состоянии горна было бы затруднительно довести трубу до оси горна; тем более это не удавалось бы сделать при малейшем загромождении горна; 2) при минимальных размерах средней и наружной трубок разность диаметров между средней и внутренней, а также наружной и средней трубками была бы такой, чтобы площади живого сечения в том и другом случае были одинаковы.

Если живые сечения между трубками трудно подобрать одинаковыми, то необходимо воду подводить со стороны наибольшего живого сечения и отводить со стороны наименьшего, чтобы ско-

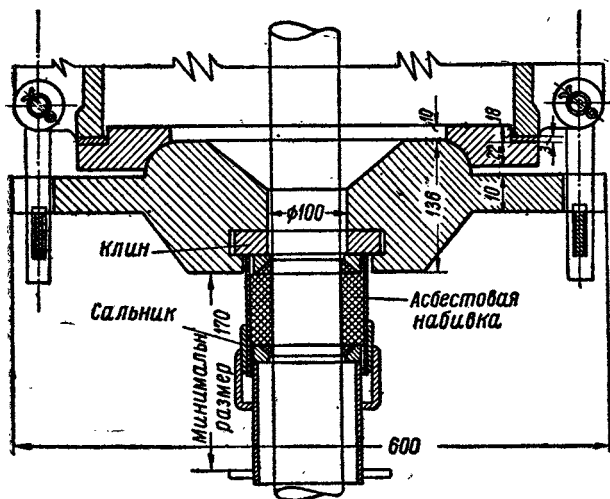


Рис. 86. Фурменный фланец с устройством для ввода трубы в печь

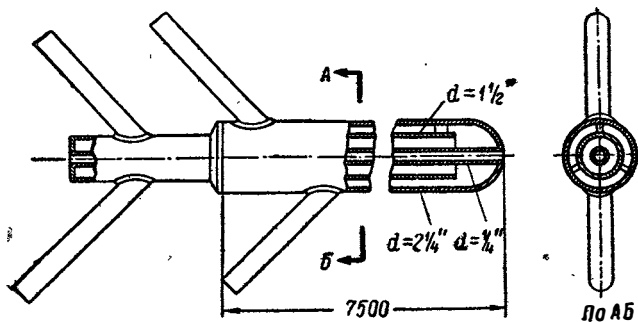


Рис. 87. Охлаждающаяся водой труба для отбора газа из горна доменной печи (трубки железные — цельнотянутые).

рость движения воды как в подводящей воду трубке, так и в отводящей была наибольшей и вода нигде не застаивалась. Нарушение этого условия приводит к тому, что железная труба, охлаждающаяся водой, после ввода в горн быстро сгорает.

Опытом установлено, что охлаждающаяся водой труба вполне надежно и долго стоит в горне, если вода подается под давлением 5—6 ат, и площади живого сечения как подводящей, так и отводящей воду трубок не менее 1000 мм² каждая.

Двум изложенным выше условиям удовлетворяют приведенные на рис. 87 размеры всех трех трубок, из которых монтируется охлаждающаяся водой труба.

Передний конец наружной трубки должен привариваться к переднему концу внутренней трубки автогенной сваркой, а не электросваркой. При электросварке тонких трубок неизбежно получатся трещины и утолщение головки охлаждающейся водой трубы, и тогда труба при вводе в горн сгорит.

Патрубки же и переходы от наружной трубки к средней и от средней к внутренней завариваются вполне надежно электросваркой, причем патрубки должны иметь такое же живое сечение, как и подводящая и отводящая воду трубки, т. е. не менее 1000 мм². Это достигается постановкой на каждую трубку по два патрубка диаметром 26 мм. Патрубки должны привариваться к трубкам под углом в 45°, чтобы при переходе из патрубка в трубку не создавалось застоя или завихрения водяной струи. Патрубки должны быть смещены один относительно другого, во избежание столкновения и завихрения водяных струй при переходе их из патрубков в трубку. Между средней и наружной трубками, для правильной центровки и устранения прогиба средней трубки, необходимо в головной и средней части приваривать по три упора к средней трубке так, как это показано на рис. 87.

Все трубки должны быть тонкостенными и цельнотянутыми. Особенно это относится к наружной трубке. Чем меньше толщина ее стенок, тем дольше она стоит в горне. При соблюдении всех описанных условий применяемые нами охлаждаемые водой трубы, будучи введенными в горн, оставались там по полчаса, а иногда и час, и служили вполне надежно.

Давление газов в горне доменной печи измерялось теми же трубами, которые употреблялись для забора проб газа.

На рис. 88 изображена охлаждающаяся водой труба для измерения температуры в горне доменной печи. Устройство ее аналогично описанной трубе для забора проб газа и отличается только тем, что внутренняя трубка имеет значительно больший диаметр. Он определяется диаметром графитового стержня, служащего одним из электродов графит-вольфрамовой термопары.

Графитовые стержни применялись двух диаметров—16,5 и 23,5 мм. Более устойчивыми оказались стержни диаметром 23,5 мм, так как они лучше противостояли излому в момент выдвижения термопары из охлаждаемой водой трубы. Диаметр

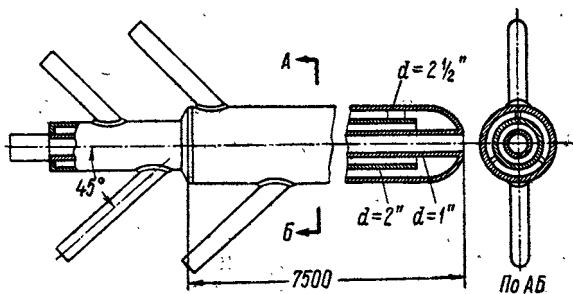


Рис. 88. Охлаждающаяся водой труба для измерения температур в горне доменной печи (трубки железные — цельнотянутые).

стержней в 23,5 мм позволял пользоваться внутренней трубкой в 1 дюйм, и оставался зазор в 1 мм между трубкой и термопарой для свободного прохода термопары внутри трубки. Соответственно диаметр средней трубки выбран в 2 дюйма и наружной трубки — в 2½ дюйма. Длина смонтированных железных труб для забора проб газа и измерения температуры должна быть такой, чтобы они могли через фурменный рукав, сопло и фурму достигнуть оси горна мощной доменной печи. Исходя из этого, все трубы, применявшиеся для исследований, были изготовлены длиной 7,5 м.

Первоначально для забора проб чугуна и шлака была сконструирована охлаждающаяся водой труба, имеющая на поверхности вогнутую часть в виде лодочки, глубиной 15 мм и шириной 20 мм. Через каждые 200 мм были устроены перегородки, чтобы при обратном движении трубы после взятия проб не было смешения. Труба вводилась в горн перевернутой книзу вогнутой частью, затем переворачивалась на 180° и выдерживалась в печи различное время. Чтобы избежать попадания чугуна на трубу при обратном движении ее из горна через зону с максимальным потоком чугуна и шлака, время движения ее сокращалось до 0,5 мин. Труба выводилась из горна с перевернутой книзу вогнутой частью. Различный состав чугуна и шлака в различных частях трубы свидетельствовал о том, что материалы взяты из разных точек горна по его радиусу. Все же подобный метод взятия проб не гарантировал полностью от попадания чугуна и шлака из окислительной зоны при обратном движении трубы из горна.

Вследствие этого при дальнейших исследованиях пробы жидких материалов из горна забирались пробозаборной охлаждаемой водой трубой с внутренней лодочкой и штоком. На рис. 89 изображена такая труба для забора проб материалов из горна доменной печи (на горизонте фурм).

На расстоянии 200 мм от носка трубы имеется прямоугольное отверстие размером 40×15 мм. Под это отверстие через

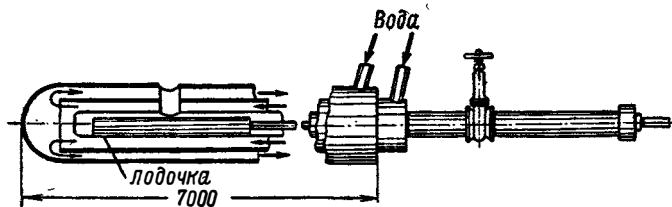


Рис. 89. Охлаждающаяся водой труба для отбора проб материалов из горна доменной печи

внутреннюю часть трубы при помощи штока подводится лодочка. Труба, охлаждаемая водой, вводилась в печь отверстием книзу, затем в месте взятия пробы переворачивалась на 180° ; через прямоугольное отверстие в лодочку со штоком попадал материал, состоящий из чугуна, шлака и мелких кусков кокса. Труба выдерживалась в печи от 30 сек. до 2—3 мин., в зависимости от места взятия пробы, а затем переворачивалась на 180° , шток же с лодочкой оставался в прежнем положении.

Таким образом, лодочка была перекрыта стенками охлаждающейся водой трубы; и прямоугольное отверстие в трубе находилось на 180° по отношению к лодочке. При этом положении, естественно, никакие материалы при прохождении трубы обратно через окислительную зону не могли попасть в лодочку. Единственным недостатком трубы с внутренней лодочкой и штоком является то, что одновременно можно брать пробы материалов не по всему радиусу горна, а только в отдельных точках.

Некоторые исследователи пробозаборную трубу со штоком и лодочкой применяют для одновременного забора проб материалов и газа. Это следует признать ошибочным, так как проходящая через пробозаборную трубу струя газа будет неизбежно взаимодействовать с раскаленными кусочками кокса и железистыми шлаками, и состав газа и состав материалов будут изменяться.

Применить пробозаборную трубу с несколькими лодочками для одновременного забора проб материалов в различных точках горна было трудно по техническим причинам.

Часть проб материалов отбиралась также газозаборными трубами. Труба под давлением сжатого до 5—6 ат воздуха вводилась до определенной точки горна по радиусу, затем закрывался доступ сжатого воздуха и давлением газов внутри печи, которое было всегда больше наружного (атмосферного), материалы вдавливались внутрь трубы. В случае отсутствия сжатого воздуха наружный конец газозаборной трубы закрывался графитовым болтом, который в той точке, где необходимо было взять пробу материалов, выталкивался металлическим прутом, проходящим в виде штока через всю трубу. Такой метод взятия проб также гарантировал от попадания материалов из другой области горна.

СОСТАВ ГАЗА В ГОРНЕ НА УРОВНЕ ФУРМ

Для определения размеров зоны горения в течение ряда лет проводились исследования состава газа в одних и тех же печах Магнитогорского и Запорожского заводов при различном количестве дутья и давлении его.

Необходимо отметить, что количество дутья, поступавшего в печь во все периоды исследований, давалось только по показаниям воздухомера. Это не совсем точно, так как с увеличением количества дутья потери его увеличиваются не пропорционально, а в большей мере.

Расчет количества дутья, фактически поступавшего в печь, в большинстве случаев нельзя было провести по составу колошниковога газа, так как количество дутья часто изменялось на очень короткий промежуток времени, вполне достаточный для качественного определения состава газа в горне доменной печи и совершенно недостаточный для того, чтобы рассчитать по составу колошниковых газов количество дутья, поступавшего в печь в момент исследований. Только поэтому мы и ограничились показаниями воздухомера. Это было вполне достаточно для установления качественной зависимости размеров окислительной зоны от количества дутья, что нами и преследовалось при проведении настоящих исследований.

При определении количественной зависимости размеров окислительной зоны от поступающего в печь дутья, необходимо руководствоваться не показаниями воздухомера, а расчетом количества дутья по составу колошниковых газов с учетом поправок распределения дутья по фурмам. Но это дело будущих исследований.

Установление количественных зависимостей в реальных условиях доменной печи с выводом математических формул — задача пока неразрешенная.

На рис. 90 приведены кривые состава газа при одинаковом давлении, но различном количестве дутья на одной и той же доменной печи № 1 Магнитогорского завода (по данным исследований 1934 г. [77]).

Доменная печь в период исследований выплавляла литейный и передельный чугун.

Литейный чугун обычного состава выплавлялся при температуре дутья 650—750°, передельный чугун при 550—600°. Количество дутья и давление в обоих случаях были, примерно,

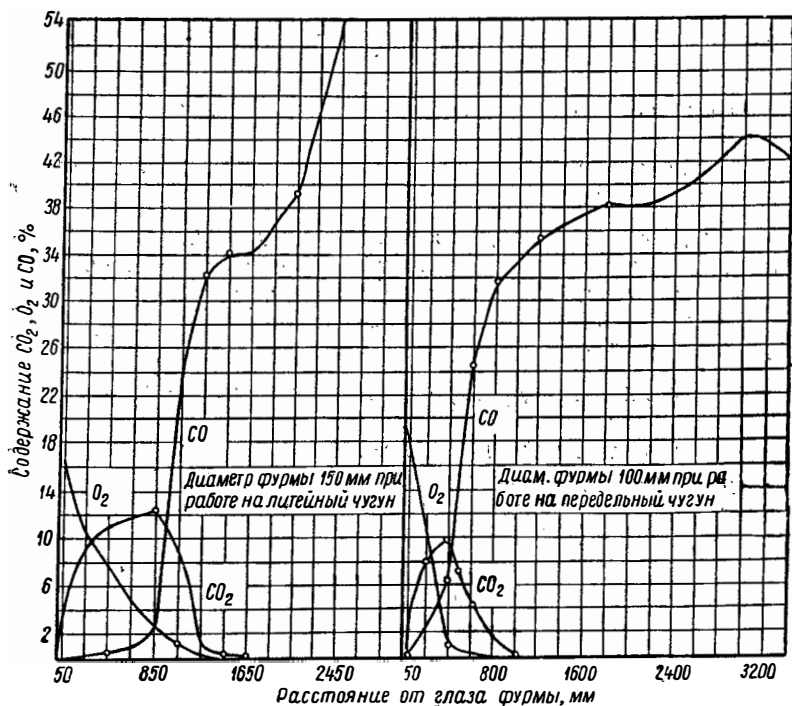


Рис. 90. Состав газа в горне по оси фурмы

одинаковы: первые — 2500—2600 м³ в минуту, последнее — около 1,5 атм. Так как условия выплавки литейного и передельного чугунов различны, то полной аналогии провести нельзя, к тому же разница в нагреве дутья (в среднем больше 100°) сказывалась на размерах зоны горения. Все же характер кривых состава газа в том и другом случае настолько резко различен, что различие в размерах зоны горения следует отнести главным образом к влиянию количества дутья. Доменная печь в обоих случаях работала на 16 фурмах, из них одна над чугуновой леткой диаметром 100 мм, а остальные — 150 мм. Фурма, через которую велись исследования при работе печи на литейный чугун, была диаметром 150 мм, при работе на передельный чугун она была заменена на меньшую, диаметром 100 мм.

Так как количество дутья в обоих случаях было одинаково, то при одной и той же упругости дутья (что имело место в данном случае), оно с некоторым приближением будет пропорционально поперечному сечению фурмы, которое в одном случае при диаметре фурмы 150 мм равно 176 см², а в другом при 100 мм — 78 см², т. е. в 2¼ раза больше, а если учесть газозаборную трубку сечением 20 см², то почти в 2¾ раза. Это в основном и определило различие в размерах зон горения. Как видно из рис. 90, при диаметре фурмы в 150 мм окислительная зона глубже, чем при диаметре фурмы в 100 мм.

Так, если в первом случае свободный кислород исчезал на расстоянии 1350 мм от глаза фурмы, а углекислота на расстоянии 1650 мм, то во втором случае свободный кислород исчезал уже на расстоянии 800 мм, а углекислота на расстоянии 1000 мм. При этом кривая убывания кислорода при диаметре фурмы 150 мм идет более плавно, чем при диаметре фурмы 100 мм. Содержание углекислоты в первом случае доходило в своем максимуме до 12,4%, а во втором случае только до 9,6%. Фокус горения в первом случае был расположен на расстоянии 850 мм от глаза фурмы, во втором же только на расстоянии 400 мм.

Количество окиси углерода в обоих случаях в газе до фокуса горения незначительно. За фокусом горения, по мере перехода углекислоты (в присутствии раскаленного кокса) в окись углерода, при литейном чугуна происходит резкий рост содержания ее в газе, продолжающийся и за пределами окислительной зоны за счет реакций прямого восстановления, которые при выплавке литейного чугуна в данном случае имели большое развитие в горне. Горн частично был загроможден.

После перехода печи на передельный чугун состояние горна резко изменилось, что и сказалось на характере кривой содержания окиси углерода в газе.

После точки на кривой, соответствующей теоретическому количеству окиси углерода, которое может существовать в горне доменной печи при обычном дутье, — 34,7% (если не принимать во внимание небольшого количества водорода, поступающего из влаги дутья), — дальнейшее увеличение окиси углерода могло происходить только за счет прямого восстановления в горне, которое, конечно, имело здесь место. Из характера кривой окиси углерода при работе на передельный чугун видно, что содержание ее по направлению к оси горна увеличивается медленно. Так, если на расстоянии 1100 мм от глаза фурмы окиси углерода было 35%, то у оси горна на расстоянии 3400 мм — 42%. На протяжении 2300 мм содержание окиси углерода увеличилось только на 7,0%, что указывает на нормальную работу горна не только в зоне, смежной с окислительной, но и у оси его.

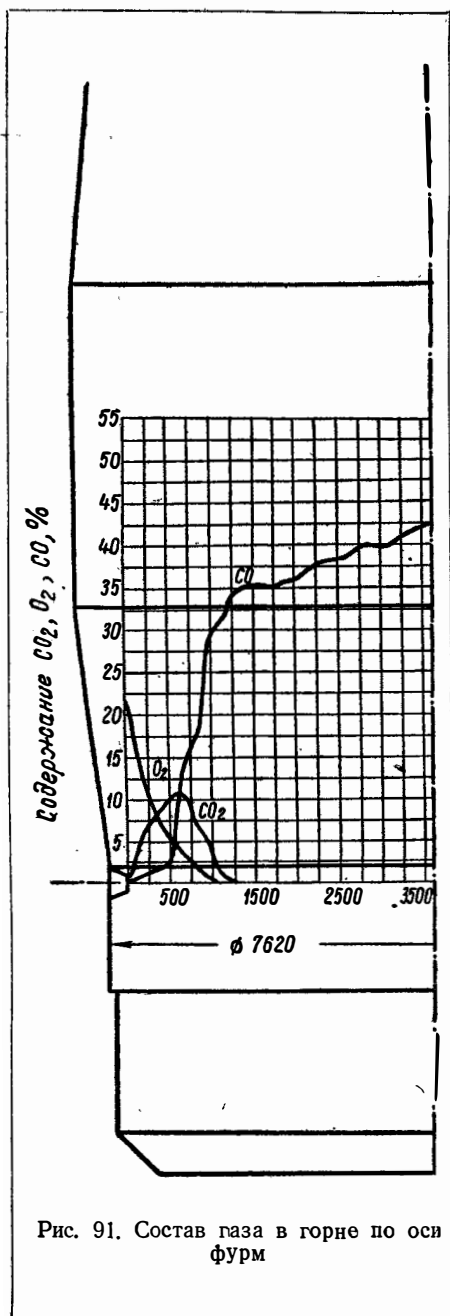


Рис. 91. Состав газа в горне по оси фурм

В этом случае совершенно ясно, что горн работает в своей центральной части настолько нормально, что ни о каком «мертвом столбе» материалов не может быть и речи. Вводимая в печь газозаборная трубка доходила до оси горна свободно, без особых усилий.

Количество окиси углерода, постепенно возрастает, хотя и доходит в середине горна до 42%, однако остается все же ниже того содержания, которое приводится в немецких исследованиях для середины горна, но значительно меньшего диаметра.

В 1935 г. нами продолжались исследования горна на той же доменной печи № 1 Магнитогорского завода.

На рис. 91 приведены кривые состава газа при диаметре всех фурм (кроме фурмы, расположенной над леткой) 175 мм, количестве дутья 3000—3100 м³/мин, температуре его 650—700° и давлении 1,5 атм.

Как видно из рисунка, содержание кислорода вначале уменьшается быстро — до 9% на расстоянии 300 мм от глаза фурм, затем понижается более плавно, и на расстоянии 1050 мм от глаза фурмы кислород исчезает совсем.

Углекислота на расстоянии 600 мм достигает своего максимума — 10,5%, сов-

падающего с максимальной температурой горна, характеризующей положение фокуса горения.

За пределами фокуса горения содержание углекислоты быстро падает по кривой, аналогичной кривой ее роста; на расстоянии 1100 мм содержание ее падает до 1% и на расстоянии 1250 мм доходит до нуля. Так же как и в предыдущих случаях до фокуса горения рост содержания окиси углерода, в присутствии значительного количества кислорода и при быстром увеличении содержания углекислоты, совершенно незначителен.

На расстоянии 500 мм от глаза фурмы окиси углерода содержится всего лишь 2,4%.

За фокусом горения содержание ее быстро растет в связи с быстрым уменьшением содержания углекислоты. На расстоянии 1400 мм от глаза фурмы окиси углерода уже 35%. Дальше к оси горна содержание ее в газе плавно и незначительно увеличивается за счет прямого восстановления и у оси горна достигает 42,4%, т. е. на расстоянии двух метров увеличивается всего лишь на 7,4%.

Из сопоставления кривых рис. 90 и 91 видно, что глубина окислительной зоны при диаметре фурм в 175 мм и количестве дутья 3000 м³/мин. несколько меньше, чем при диаметре фурм 150 мм и количестве дутья 2600 м³/мин. Фокус горения расположен также значительно ближе к глазу фурмы. Объясняется это тем, что при увеличении количества дутья в 1935 г. по сравнению с 1934 г. на 15% площадь живого сечения фурм увеличилась на 36%. К тому же увеличение температуры дутья на 100° способствовало уменьшению размеров окислительной зоны.

На рис. 92 приведен состав газа в горне на той же доменной печи № 1 Магнитогорского завода по данным исследований 1936 г. [77]).

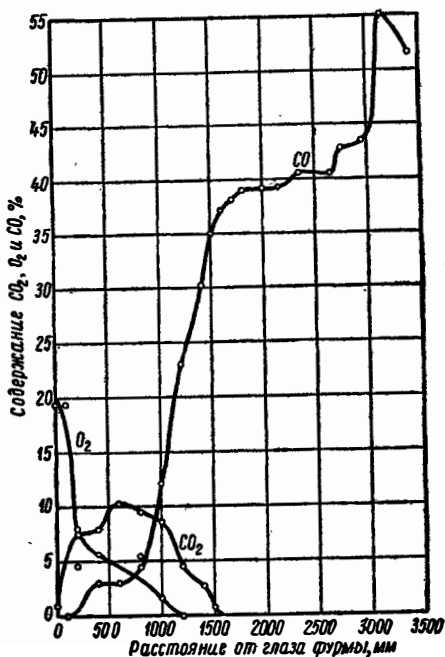


Рис. 92. Состав газа в горне на уровне фурм

Диаметр фурм в 1936 г. оставался прежним — 175 мм. Количество дутья увеличилось на 100 м³/мин, т. е. всего лишь на 3,3%, и составляло 3100—3200 м³/мин. Одновременно снизился нагрев дутья на 100°. Незначительное увеличение количества дутья и небольшое снижение его нагрева не изменили положения фокуса горения; как видно из рисунка, оно осталось прежним на расстоянии 600 мм от глаза фурмы. Максимальное количество углекислоты в фокусе горения снизилось с 12 до 10,3%. Глубина же окислительной зоны оказалась большей.

За пределами фокуса горения произошло более замедленное уменьшение содержания углекислоты, чем это имело место при исследованиях в предыдущие годы. Так, на расстоянии 800 мм от глаза фурмы содержание углекислоты составляло 9,5% и на расстоянии 1000 мм — 8,5%, тогда как в 1935 г., по данным исследований, в этих точках углекислоты было 8,1 и 4% и на расстоянии 1200 мм соответственно 4,5% и 0,5%. Углекислота исчезала лишь на расстоянии 1550 мм, тогда как по данным 1935 г. она исчезла уже на расстоянии 1300 мм. Увеличение количества дутья и снижение температуры его также сказались на изменении зоны горения. Но главное объяснение этому явлению необходимо искать в резком ухудшении качества кокса в 1936 г. Температура у оси горна (о чем подробно будет сказано ниже) также снизилась на 100°. Содержание окиси углерода в газе к оси горна резко увеличилось против предыдущих лет. Так, за счет прямого восстановления количество окиси углерода на расстоянии от 1500 до 3150 мм увеличилось на 20%, с 35 до 55%, тогда как в 1935 г. на таком же расстоянии — всего лишь на 4%.

Кривая, характеризующая изменение содержания кислорода, показывает, что сначала кислород убывает очень быстро — на расстоянии 200 мм от глаза фурмы содержание его изменяется от 21 до 8%, а дальше — медленно и доходит до нуля лишь на расстоянии 1200 мм от глаза фурмы. Это говорит о том, что при ухудшенном коксе горение его в присутствии значительного количества углекислоты происходит более замедленно, чем при нормальном коксе.

О том, что в период исследований 1936 г. кокс был значительно хуже предыдущих лет, свидетельствует также и ухудшение в работе печи. Так, расход кокса повысился с 0,89 до 0,956. Печь шла рывками, с частыми подвисаниями и, как следствие этого, — со значительными осадками. Давление дутья поднималось часто до 1,7 атм. Слабый кокс, приводивший к образованию значительного количества мелочи в печи, создавал неровный ход печи и неравномерное распределение руды и кокса в отдельных ее зонах. Вследствие этого нормальный процесс восста-

новления и шлакообразования нарушался. В горн приходило много коксовой мелочи, перемешанной со шлаком. Способность гореть у такой мелочи значительно меньшая, в связи с уменьшением свободной поверхности для взаимодействия с кислородом.

В период неровного хода печи изучалось изменение содержания углекислоты в пределах окислительной зоны для установ-

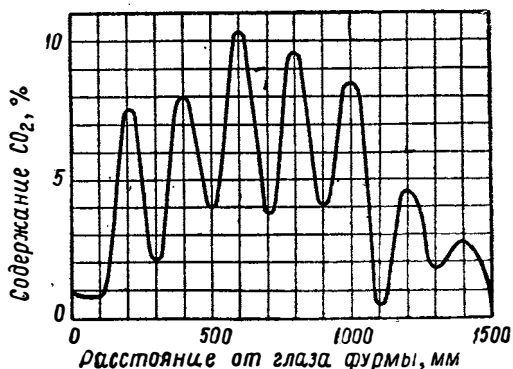


Рис. 93. Содержание углекислоты в горне на горизонте фурм

ления границ между максимумом и минимумом. Из кривой, приведенной на рис. 93, видно, что колебания в содержании углекислоты довольно значительны, а если учесть, что эта кривая выведена по средним данным для каждой точки, то само рассеивание точек на одном и том же расстоянии от глаза фурмы будет еще больше, причем содержание углекислоты иногда изменяется от 0 до 20% на одном и том же расстоянии.

Рассеивание отдельных точек характерно не только для углекислоты, но и для окиси углерода и кислорода. Оно объясняется тем, что в разное время через отдельные участки окислительной зоны при одинаковом количестве дутья проходит различное количество кокса и вследствие этого изменяется содержание углекислоты и окиси углерода в одних и тех же точках.

В различное время проходит также и разное количество жидких материалов в виде чугуна и шлака, и степень окисления (в окислительной зоне) чугуна кислородом дутья, в зависимости от этого, различна. Таким образом, в отдельные моменты может быть израсходовано различное количество кислорода на горение кокса и на окисление чугуна, проходящего через окислительную зону. Кроме того, на рассеивание точек значительно влияет, как было уже отмечено, и ход печи.

Подвисания и осадки сильно меняют характер окислительной зоны. Все же в среднем положение ее при одинаковом количестве дутья, поступающего через фурмы, остается одинаковым.

В 1937 г. нами проводились исследования изменения окислительной зоны при различном количестве дутья на одной печи и в течение одного периода и при постоянных остальных условиях режима работы печи. Для этого использовались отдельные моменты при недостатке кокса или при продолжительных неполадках в цехе, когда печь работала на сбавленном дутье — 2500 м³/мин и даже 1500 м³/мин.

Доменная печь № 1 Магнитогорского завода в 1937 г. работала нормально при количестве дутья до 3200—3400 м³/мин. При таком его количестве взято наибольшее число проб газа.

Диаметр фурм в 1937 г. был такой же, как и в 1936 г. — 175 мм. Количество дутья было на 100—200 м³/мин больше, чем в 1936 г., нагрев его — на 50—70° ниже. Все остальные условия работы печи были прежние за исключением кладки печи (в 1936 г. печь исследовалась перед выдувкой, а в 1937 г. непосредственно после задувки).

В табл. 55 приведен состав газа и на рис. 94 кривые изменения углекислоты в газе при количестве дутья 3400—3200, 2500 и 1500 м³/мин.

Таблица 55

Состав газа (%) в горне доменной печи № 1 Магнитогорского завода (диаметр фурм 175 мм) при различном количестве дутья (исследования 1937 г.)

Количество дутья	3400 м ³ /мин		3200 м ³ /мин		2500 м ³ /мин		1500 м ³ /мин	
	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂
Расстояние от глаза фурмы, мм								
0	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0
200	5,9	13,4	5,7	13,0	8,7	12,2	16,0	1,6
400	9,1	9,3	10,6	8,4	11,1	8,8	12,6	0,0
600	10,0	7,9	13,7	5,3	8,3	7,7	3,4	0,0
800	14,0	4,1	9,7	3,5	5,4	6,0	0,4	0,0
1000	11,0	3,5	7,2	3,3	4,6	3,8	0,0	0,0
1200	6,7	1,1	4,1	0,4	2,2	0,8	0,0	0,0
1400	3,1	0,3	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1600	0,7	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1700	—	—	0,0	0,0	—	—	—	—
1800	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Количество проб . .	72		49		15		11	

При количестве дутья $3400 \text{ м}^3/\text{мин}$ фокус горения расположен на расстоянии 800 мм от глаза фурмы с максимальным содержанием углекислоты в нем $14,0\%$. Глубина окислительной зоны простиралась по радиусу до 1800 мм . При количестве дутья $3200 \text{ м}^3/\text{мин}$ фокус горения располагался на расстоянии 600 мм от глаза фурмы, при максимуме углекислоты

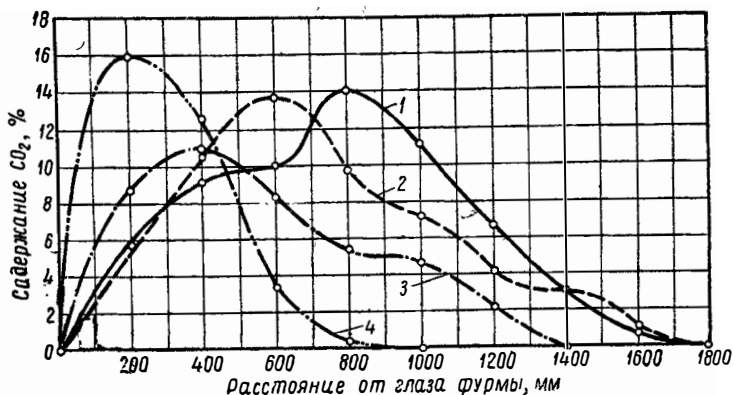


Рис. 94. Содержание углекислоты в горне при различном количестве дутья:

1 — $3400 \text{ м}^3/\text{мин}$; 2 — $3200 \text{ м}^3/\text{мин}$; 3 — $2500 \text{ м}^3/\text{мин}$;
4 — $1500 \text{ м}^3/\text{мин}$

$13,7\%$. Углекислота исчезала совсем на расстоянии 1700 мм . Кривая изменения содержания углекислоты, как это видно из рисунка, при количестве дутья $3200 \text{ м}^3/\text{мин}$, значительно отличается от аналогичной кривой, полученной при количестве дутья $3400 \text{ м}^3/\text{мин}$. При количестве дутья $2500 \text{ м}^3/\text{мин}$ фокус горения находился на расстоянии всего лишь 400 мм от глаза фурмы, максимальное количество углекислоты в этой точке достигало $11,1\%$. За фокусом горения шло плавное уменьшение содержания углекислоты в газе, и на расстоянии 1400 мм от глаза фурмы углекислоты уже не было.

При количестве дутья $1500 \text{ м}^3/\text{мин}$ фокус горения находился всего лишь на расстоянии 200 мм от глаза фурмы, т. е. почти у фурмы, причем содержание углекислоты в фокусе горения было наибольшим (16%) по сравнению со всеми предыдущими случаями. За фокусом горения углекислота довольно быстро исчезала. Так, на расстоянии 800 мм от глаза фурмы ее практически почти не было — всего лишь $0,4\%$.

Из приведенных кривых видно, что положение фокуса горения изменялось в зависимости от количества дутья от 800 мм от глаза фурмы до 200 мм . Углекислота исчезала на

расстоянии 1800 мм при максимальном количестве дутья и 900 мм при минимальном. Разница в размерах окислительной зоны в линейных единицах — вдвое, по площади — в 4 раза, а по объему — в 8 раз, если допустить, что линейные размеры окислительной зоны изменяются одинаково во всех направлениях.

Приближение фокуса горения к периферии и резкое сокращение размеров окислительной зоны свидетельствуют о том, что при незначительном количестве дутья печь работает преимущественно по периферии, газы поднимаются только вдоль кладки печи и к осевой части проникают мало.

На рис. 95 приведены кривые изменения содержания кислорода при различном количестве дутья. Только при малом количестве дутья (1500 м³/мин) кислород исчезает очень быстро. На расстоянии 200 мм от глаза фурмы содержание его уже меньше 2%, и он исчезает практически на расстоянии 300 мм. В остальных случаях поглощение кислорода происходит на 200—400 мм раньше исчезновения углекислоты.

Кривые изменения содержания кислорода в газе по радиусу горна показывают, что в первый период при большей кон-

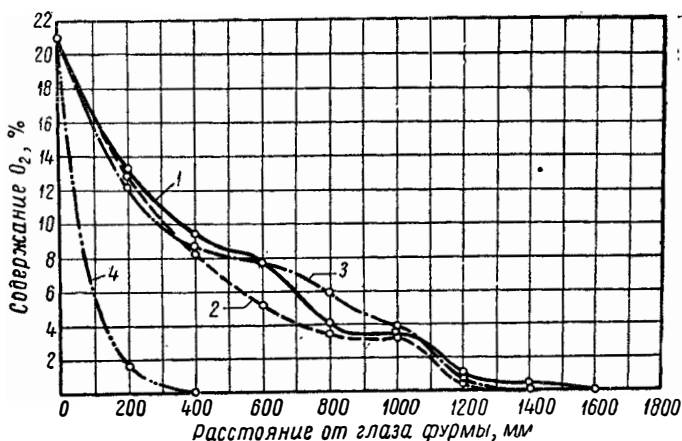


Рис. 95. Содержание кислорода в горне при различном количестве дутья:

1 — 3400 м³/мин; 2 — 3200 м³/мин; 3 — 2500 м³/мин;
4 — 1500 м³/мин

центрации кислорода происходит более интенсивное горение и, благодаря этому, более быстрое поглощение кислорода, в дальнейшем, по мере уменьшения концентрации кислорода в газе, горение происходит медленнее и поглощение кислорода замед-

ляется, кривые становятся более пологими. Замедление горения сохраняется до полного поглощения кислорода. Так, на расстоянии от 0 до 200 мм от глаза фурмы (при дутье 3400, 3200 и 2500 м³/мин) содержание кислорода в газе уменьшает-

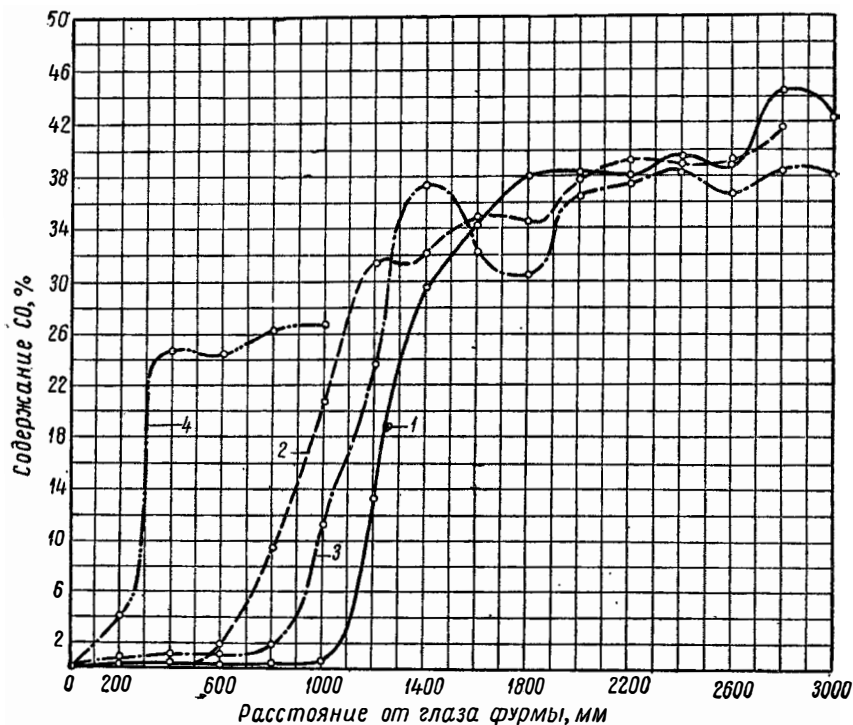


Рис. 96. Содержание окиси углерода в горне при различном количестве дутья:

1 — 3400 м³/мин; 2 — 3200 м³/мин; 3 — 2500 м³/мин; 4 — 1500 м³/мин

ся с 21 до 13% — на 8%, на расстоянии от 200 до 400 мм — с 13 до 9% — на 4%, от 400 до 600 мм — с 9 до 7% — на 2%. В дальнейшем, к оси горна содержание кислорода на таких же расстояниях уменьшается на 2—1,5—1,5—1%. Это говорит о том, что интенсивность горения падает по мере уменьшения концентрации кислорода в газах.

На рис. 96 приведены кривые изменения содержания окиси углерода в газе при тех же количествах дутья.

До фокуса горения во всех случаях содержание окиси углерода в газе ничтожно. За фокусом горения, по мере

убывания углекислоты, оно быстро увеличивается до границ окислительной зоны, затем увеличивается медленно и у оси горна доходит до 42—44%.

Можно считать установленным, что за счет прямого восстановления в горне за пределами окислительной зоны количество окиси углерода увеличилось не больше, чем на 8—9%. По приведенному (рис. 94, 95 и 96) составу газа видно, что горн работал по всему сечению, как у периферии, так и у оси, вполне нормально и что размеры окислительной зоны, при сохранении прочих условий постоянными, находятся в прямой зависимости от количества дутья.

Таким образом, количество дутья, поступающего через фурму в печь, определяет положение фокуса горения и абсолютное содержание в различных точках составных частей газа, а также размеры окислительной зоны.

Для определения влияния количества дутья на размер зоны горения перед фурмами в 1938 г. проводились длительные исследования горна мощной доменной печи № 3 Запорожстали (объемом 1300 м³), работавшей на донецком коксе и криворожской руде в условиях, отличающихся от условий Магнитогорского завода. Исследования велись при различном количестве дутья, а именно: 2400, 2050, 1800, 1500 и 1200 м³/мин. Обычно доменная печь работала с количеством дутья 2400 м³/мин, что при диаметре фурм 200 мм и объеме печи 1300 м³ было явно недостаточно. Вследствие организационных неполадок в цехе печь иногда работала продолжительное время на сбавленном дутье. Это позволило провести многочисленные исследования размеров зоны горения перед фурмами.

В 1939 и 1940 гг. доменная печь № 3 Запорожстали, при сохранении всех остальных условий работы прежними, работала на повышенном количестве дутья — до 3400 м³/мин. В эти годы продолжались исследования горна при различном количестве дутья: от дутья при тихом ходе до 3400 м³/мин, в том числе и при 3100 и 3400 м³/мин.

Количество дутья в печах Запорожстали и Магнитогорского завода определялось по счетчикам перед воздухонагревателями. Потери дутья на Запорожстали были значительно меньшими, чем на Магнитогорском заводе.

В табл. 56 приведен состав газа и на рис. 97 кривые изменения содержания углекислоты в горне доменной печи № 3 Запорожстали при различном количестве дутья: 3400, 3100, 2400, 2050, 1800, 1500 и 1200 м³/мин. Эти кривые указывают на зависимость размеров окислительной зоны от количества дутья. Так, при максимальном количестве дутья 3400 м³/мин фокус горения находился на расстоянии 950 мм от глаза

фурмы, и углекислота простиралась до 2000 мм. По мере уменьшения количества дутья фокус горения приближался к фурме, и размеры окислительной зоны сокращались.

При количестве дутья 3100 м³/мин фокус горения располагался на расстоянии 750 мм, и углекислота исчезала на рас-

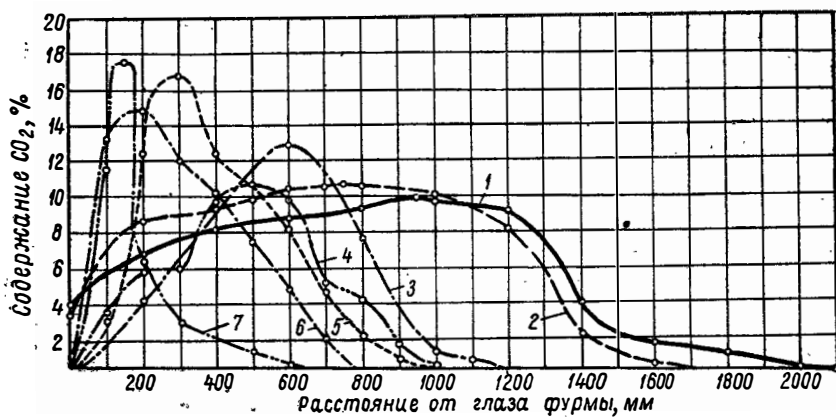


Рис. 97. Содержание углекислоты в газе по радиусу горна доменной печи № 3 Запорожстали при различном количестве дутья:

1 — 3400 м³/мин; 2 — 3100 м³/мин; 3 — 2400 м³/мин; 4 — 2050 м³/мин; 5 — 1800 м³/мин; 6 — 1500 м³/мин; 7 — 1200 м³/мин.

стоянии 1800 мм. При уменьшении количества дутья до 2400 м³/мин фокус горения еще больше приближался к фурме и отстоял от нее на расстоянии 600 мм, глубина же окислительной зоны сократилась до 1200 мм. Переход к количеству дутья 2050 м³/мин передвинул фокус горения еще ближе к фурме — на расстояние 500 мм. При дутье 1800 м³/мин фокус горения передвинулся на расстояние 300 мм. Углекислота в обоих случаях исчезала полностью на расстоянии 1000—1100 мм.

Дальнейшее уменьшение количества дутья привело к еще большему сокращению размеров окислительной зоны. При 1500 м³/мин фокус горения отстоял от глаза фурмы только на расстоянии 200 мм, углекислота полностью исчезала на расстоянии 800 мм. При 1200 м³/мин фокус горения находился от глаза фурмы всего лишь на расстоянии 150 мм, а углекислота исчезала на расстоянии 700 мм.

Размеры окислительной зоны в интервале между минимальным и максимальным количеством дутья менялись в линейном измерении почти в 3 раза, по площади — в 8 раз и по объему — в 23 раза. Обращает на себя внимание характер кри-

Таблица 56

Состав газа (%) в горне доменной печи № 3 Запорожстали (диаметр фурм 200 мм) при различном количестве дутья (исследования 1938—1940 гг.)

Расстояние от глаза фурмы, мм	Количество дутья													
	3400 м ³ /мин		3100 м ³ /мин		2400 м ³ /мин		2050 м ³ /мин		1800 м ³ /мин		1500 м ³ /мин		1200 м ³ /мин	
	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂
0	4,0	15,5	3,4	16,4	0,1	20,8	0,1	20,6	0,0	21,0	0,0	21,0	0,0	21,0
100	—	—	—	—	—	—	3,5	15,1	3,1	14,9	13,2	6,8	11,5	7,2
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17,5	3,2
200	6,8	11,7	8,6	9,9	4,2	15,8	5,7	13,8	12,4	8,1	14,7	5,9	6,5	2,7
300	—	—	—	—	—	—	5,9	13,0	16,8	2,2	12,0	2,0	2,9	1,3
400	8,1	9,2	9,3	8,4	9,2	9,9	9,7	8,6	12,4	1,6	10,2	1,1	2,1	0,4
500	—	—	—	—	9,8	7,6	10,6	7,3	10,5	1,3	7,4	0,6	1,4	0,0
600	8,7	8,6	10,4	7,8	12,9	4,2	9,8	3,7	8,1	0,9	4,8	0,0	0,6	0,0
700	—	—	10,5	7,6	—	—	5,1	1,8	4,6	0,6	1,9	0,0	0,0	0,0
750	—	—	10,7	7,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
800	9,3	8,0	10,5	7,3	7,6	2,2	4,2	0,6	2,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
900	—	—	—	—	—	—	1,8	0,3	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
950	9,9	6,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	9,7	5,6	10,0	6,6	1,3	0,4	0,5	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1100	—	—	—	—	0,8	0,1	0,1	0,0	—	—	0,0	0,0	0,0	0,0
1200	9,1	1,8	8,1	2,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1400	4,0	0,3	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1600	1,7	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1800	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2000	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Количество проб	102		84		132		206		58		27		23	

вых; при большом количестве дутья углекислота в газе, начиная от фурмы, сохраняется почти неизменной, причем до фокуса горения нет ярко выраженного максимума. По мере сокращения количества дутья максимум углекислоты в фокусе горения приобретает резко выраженную форму и особенно это рельефно заметно при малых количествах дутья, что объясняется горением в меньшем объеме. Можно сделать вывод, что окислительная зона резко изменяет свой размер не только в линейном измерении, но и по площади и по объему. При

большом количестве дутья конфигурация окислительной зоны такова, что основной поток газов направлен первоначально к оси горна, а затем, по мере потери напора газов, начинает сдвигаться в вертикальном направлении. При малом дутье происходит иная картина: основной поток газов из-за слабого их напора устремляется преимущественно в вертикальном направлении. Поэтому окислительная зона при большом количестве дутья в объеме в большей мере вытягивается к оси горна, а при малом количестве дутья — к заплечикам.

На рис. 98 приведены кривые изменения содержания кислорода в газе при тех же количествах дутья, причем поглоще-

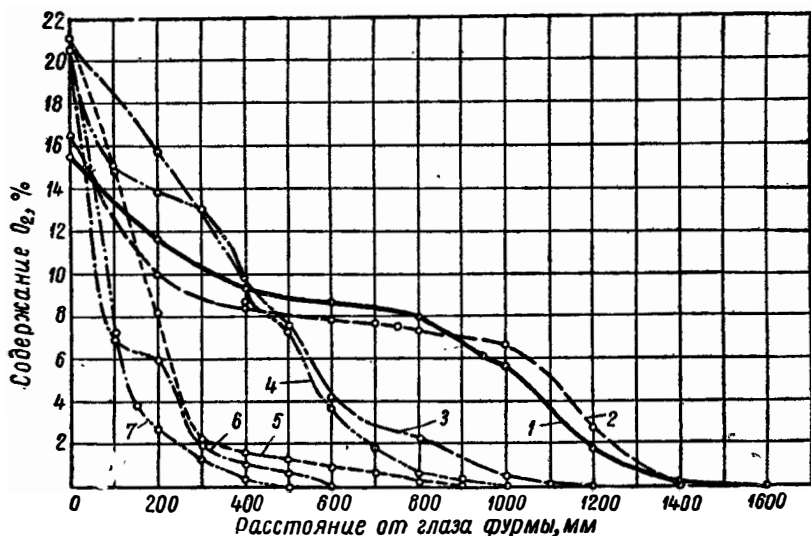


Рис. 98. Содержание кислорода в газе по радиусу горна доменной печи № 3 Запорожстали при различном количестве дутья:

- 1 — 3400 м³/мин; 2 — 3100 м³/мин; 3 — 2400 м³/мин; 4 — 2050 м³/мин;
5 — 1800 м³/мин; 6 — 1500 м³/мин; 7 — 1200 м³/мин

ние кислорода не так рельефно выражено, как для углекислоты.

Все же закономерность сохраняется полная. При большом количестве дутья кислород простирается до 1400 мм от глаза фурмы; с уменьшением дутья поглощение идет быстрее, о чем свидетельствует характер кривых. При малом количестве дутья кислород практически исчезает на расстоянии 400—600 мм.

Как и в предыдущих исследованиях, устанавливается закономерность: при большей концентрации кислорода интенсивность горения больше, и кривые поглощения кислорода имеют более крутой наклон. По мере уменьшения концентрации кислорода в газе интенсивность горения падает, и кривые становятся более пологими; это явление сохраняется до полного поглощения кислорода.

На рис. 99 приведены кривые изменения содержания окиси углерода в газе при различном количестве дутья.

При количестве дутья 3100 и 3400 $\text{м}^3/\text{мин}$ изучался состав газа только в окислительной зоне (по CO_2 и O_2), поэтому кривые для окиси углерода по всему сечению горна при этих количествах дутья не приводятся. Кривые, приведенные на рисунке, подтверждают ранее высказанное положение, что до фокуса горения окиси углерода почти нет. Количество ее резко увеличивается в пределах окислительной зоны лишь за фокусом горения. За пределами окислительной зоны содержание окиси углерода плавно увеличивается и доходит у оси горна

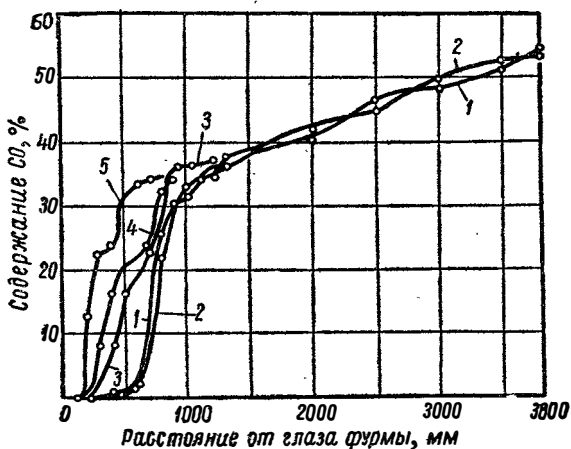


Рис. 99. Содержание окиси углерода в газе по радиусу горна доменной печи № 3 Запорожстали при различном количестве дутья:

1 — 2400 $\text{м}^3/\text{мин}$; 2 — 2050 $\text{м}^3/\text{мин}$; 3 — 1800 $\text{м}^3/\text{мин}$;
4 — 1500 $\text{м}^3/\text{мин}$; 5 — 1200 $\text{м}^3/\text{мин}$

до 52%. Увеличение окиси углерода на 17% против теоретического за счет прямого восстановления — довольно высокое.

Можно считать, что при 16 фурмах, диаметром 200 мм каждая, количество дутья 2400 $\text{м}^3/\text{мин}$ и меньше является явно

недостаточным. При таком количестве дутья указанный диаметр фурм велик.

Длительными исследованиями размеров окислительной зоны при различном количестве дутья в мощных доменных печах, при сохранении всех остальных условий работы постоянными, с полной убедительностью доказано, что размеры окислительной зоны находятся в полной зависимости от количества дутья.

Зависимость от температуры дутья подтверждается исследованиями проф. И. А. Соколова и Н. Н. Круглова [83], М. М. Лейбовича и другими [84].

И. А. Соколов и Н. Н. Круглов исследовали размеры окислительной зоны древесно-угольной доменной печи Ашинского завода при температуре дутья 500—550 и 300° и пришли к выводу, что «при менее нагретом дутье кислород проникает глубже».

Особый интерес представляют исследования М. М. Лейбовича, проведенные на доменной печи № 1 Магнитогорского завода в 1938 г. На рис. 100 приведены кривые изменения состава газа по его данным при нагреве дутья 500, 700 и более 700°.

При температуре дутья 500° фокус горения отстоял от глаза фурмы на расстоянии 600 мм. Глубина простираения углекислоты доходила до 1600 мм. Кислород исчезал на расстоянии 1200 мм. При повышении температуры дутья до 700° (на 200°) окислительная зона резко сократилась. Так, углекисло-

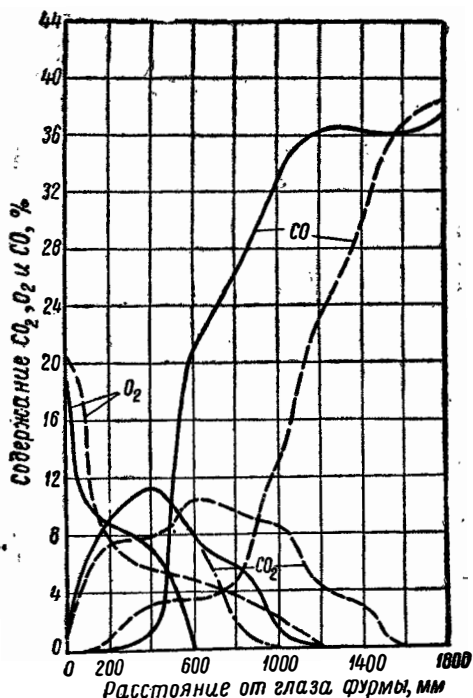


Рис. 100. Состав газа в горне при высоком и обычном нагреве дутья. Пунктирная кривая — при обычном нагреве дутья 500°; сплошные кривые — при высоком нагреве дутья 700°; пунктир с точками — то же более 700°.

та доходила лишь до 1200 мм, фокус горения переместился к фурме на 200 мм и отстоял от нее на расстоянии 400 мм. Кислород уже исчез на расстоянии 600 мм от глаза фурмы.

При температуре дутья выше 700° приведены только данные по содержанию углекислоты в газе. Согласно этим данным, глубина простираения углекислоты доходила лишь до 1000 мм. Кривые, характеризующие изменение содержания окиси углерода в газе, находятся в полном соответствии с кривыми изменения содержания углекислоты. В обоих случаях до фокуса горения окиси углерода мало, за фокусом горения происходит до границ окислительной зоны быстрый рост с последующим медленным увеличением окиси углерода за счет прямого восстановления.

Поглощение кислорода вначале идет очень быстро, в дальнейшем, по мере уменьшения концентрации кислорода в газе, процесс горения замедляется, и кривые в обоих случаях имеют более пологий характер.

Скорость поглощения кислорода как в начале, так и до конца исчезновения его при более нагретом дутье большая, чем при менее нагретом. Отсюда вывод — повышение температуры дутья, как и концентрации кислорода в газе, ускоряет процесс горения, совершающийся тем самым в меньшем объеме и в более короткое время.

Таким образом, устанавливается полная зависимость размеров окислительной зоны от температуры дутья.

А. П. Любан провел исследования размеров окислительной зоны при различном диаметре фурм на доменной печи № 3 Азовстали.

На рис. 101 приведены, по его данным, кривые изменения состава газа в горне при количестве дутья 2000—2200 м³/мин и диаметре фурм 205 мм.

Как видно из рисунка, фокус горения расположен на расстоянии 600 мм от глаза фурмы, и углекислота простирается до 1300 мм. Кислород исчезает на расстоянии 900 мм. При том же количестве дутья (2000—2200 м³/мин) диаметр фурм был увеличен до 220 мм. Увеличение живого сечения фурм на 15% сказалось на размерах зоны горения перед фурмами. В связи с увеличением диаметра фурм плотность дутья и количество его на единицу живого сечения фурм упали, что и привело к уменьшению размеров окислительной зоны.

На рис. 102 приведены кривые изменения состава газа при диаметре фурм 220 мм. Фокус горения передвинулся к глазу фурмы на 100 мм и отстоял от нее на расстоянии 500 мм

Углекислота полностью исчезала уже на расстоянии 1100 *мм.* Глубина проникновения кислорода доходила до 800 *мм.* Таким образом, уменьшение давления дутья привело к сокращению зоны горения в линейном измерении на 200 *мм* и приблизило фокус горения к фурмам на 100 *мм.*

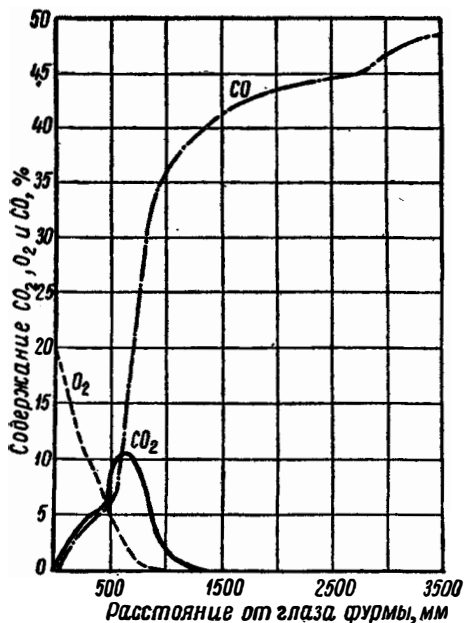


Рис. 101. Состав газа в горне доменной печи № 3 Азовстали при диаметре фурм 205 *мм*

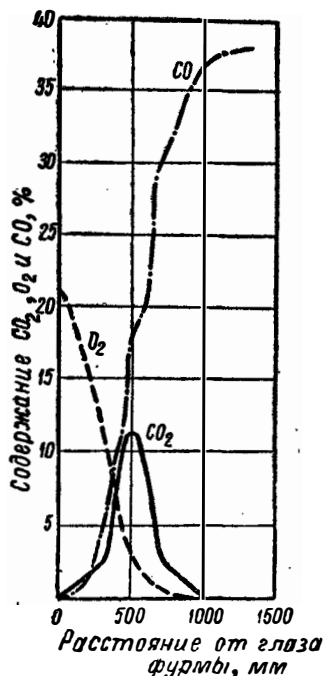


Рис. 102. Состав газа в горне доменной печи № 3 Азовстали при диаметре фурм 220 *мм*

Что же касается кривых изменения содержания окиси углерода, приведенных на рис. 101 и 102, то они находятся в противоречии с кривыми изменения состава газа в горне доменных печей Магнитогорского и Запорожского заводов. Окись углерода, согласно кривым рис. 101 и 102, резко возрастает сразу же за глазом фурмы и одновременно с углекислотой, так что в фокусе горения количество окиси углерода в газе или равно (рис. 101) или значительно больше (рис. 102) количества углекислоты. Неправдоподобность содержания окиси углерода в газе сказывается и в том, что при диаметре фурм 220 *мм* (рис. 102) в фокусе горения сумма кислорода (из $O_2 + CO_2 + 0,5CO$) больше 21%. Объяснить это можно только

неточным подсчетом средних данных для окиси углерода в газе.

Влияние давления дутья на размер окислительной зоны особенно рельефно наблюдается при резком уменьшении его (что, конечно, связано и с резким сокращением количества дутья).

На рис. 103 приведен состав газа в горне той же доменной печи № 3 Азовстали по данным А. П. Любана при давлении дутья 0,2 *ати* [85].

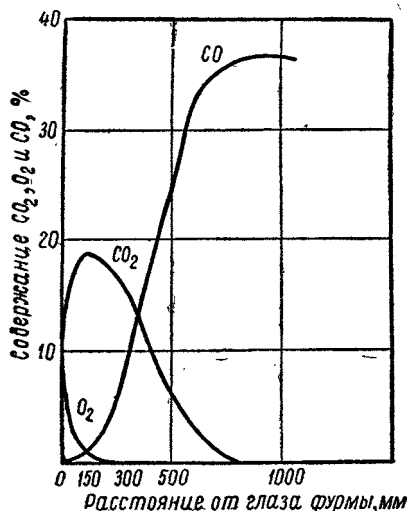


Рис. 103. Состав газа в горне доменной печи № 3 Азовстали при давлении дутья 0,2 *ати*

Состав газа, приведенный на рис. 101, 102 и 103, подтверждает полную зависимость размера зоны горения от давления дутья. Весьма интересно изучение окислительной зоны в древесно-угольной доменной печи, поскольку древесный уголь как горючее представляется совершенно иным, по сравнению с коксом.

Древесный уголь вследствие большой пористости, достигающей до 90%, обладает большей (чем кокс) поверхностью при данном объеме для соприкосновения с кислородом дутья. Кроме того, древесный уголь, имея сплошные каналы, позволяет дутью пронизывать куски угля. Таким образом, горение

В этом случае живая сила дутья была столь ничтожна, что дутье не могло глубоко проникать в слой кокса, и горение происходило сразу же за фурмой. Газы, потеряв напор, устремлялись вверх, вдоль кладки печи. Вследствие этого фокус горения отстоял от глаза фурмы всего лишь на расстоянии 100 *мм*, на таком же расстоянии практически исчезал и кислород. Углекислота полностью исчезала на расстоянии 800 *мм*. Данные А. П. Любана полностью опровергают совершенно недостоверные данные Кини (приводимые без всякой критики в некоторых учебниках), из которых следует, что при давлении дутья 0,07 *ати* размеры окислительной зоны не изменились по сравнению с зоной при нормальном давлении дутья.

древесного угля, при равных количествах дутья, происходит в меньшем объеме и с большей скоростью по сравнению с коксом. Это положение подтверждается исследованием окислительной зоны древесноугольной доменной печи Ашинского завода, проведенным нами в 1935 г.

Печь имела 8 фурм, из них 7 диаметром по 120 мм и одну, через которую велись исследования, 150 мм. Дутье подавалось в количестве 330 м³/мин, под давлением 200 мм рт. ст. с температурой 500—600°.

На рис. 104 приведен состав газа в горне доменной печи Ашинского завода. Фокус горения, как видно из рисунка, расположен на расстоянии 350 мм от глаза фурмы, максимальное количество углекислоты в нем — 10,8%.

Отличительной чертой горения в древесноугольной печи является очень интенсивный переход углекислоты в окись углерода за фокусом горения, объясняющийся большей реактивной способностью древесного угля по сравнению с коксом; вследствие этого кривая изменения содержания углекислоты в газе за фокусом горения более круто падает по сравнению с аналогичными кривыми в коксовой доменной печи.

До фокуса горения как в древесноугольной, так и в коксовых печах скорость образования углекислоты почти одинакова, но за фокусом горения в коксовой печи происходит всегда более замедленный (по сравнению с древесноугольной печью) переход углекислоты в окись углерода. Это видно как по кривым исчезновения углекислоты, так и по кривым поглощения кислорода. Выше уже отмечалось, что в коксовой печи скорость горения падает с понижением концентрации свободного кислорода в газе. Поэтому кривые изменения содержания кислорода имеют крутой уклон

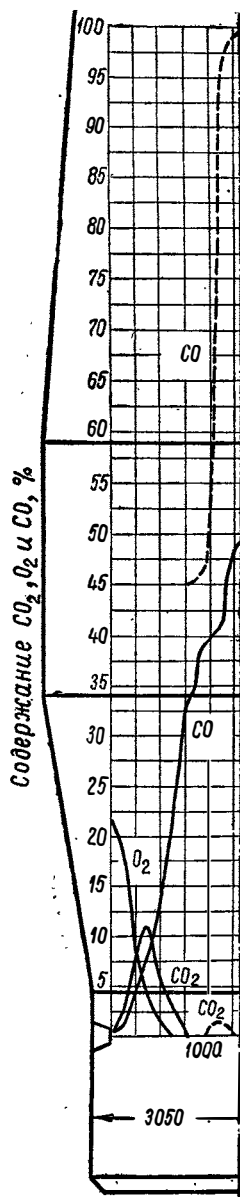


Рис. 104. Состав газа в горне древесноугольной доменной печи Ашинского завода

вниз в начале и более пологий в конце. В древесноугольной печи, как это видно из рис. 104, кривая изменения содержания свободного кислорода в течение всего периода поглощения его имеет почти одинаковый наклон.

Это говорит о том, что при древесном угле: 1) скорость горения остается неизменной при различном содержании свободного кислорода и только при малых концентрациях его падает, и 2) скорость горения больше, чем при коксе.

Кривая изменения содержания окиси углерода при горении древесного угля имеет также иной характер, чем при горении кокса. В коксовых доменных печах до фокуса горения окиси углерода в газе ничтожное количество, и содержание ее быстро растет только за фокусом горения. В древесноугольной печи, благодаря высокой реактивной способности древесного угля и большей скорости горения, сразу же за фурмой происходит быстрый рост содержания окиси углерода в газе, который сохраняется до конца окислительной зоны.

Кривые, нанесенные на рис. 104 сплошными линиями, выведены по средним данным в лучший период работы печи и характеризуют, при наблюдавшемся загромождении горна, одно из лучших его состояний. Эти замеры производились тогда, когда доменная печь, вследствие каких-либо перебоев в загрузке сырых материалов, шла сама, без принудительных осадок, и горн вследствие этого несколько расчищался. Кривые, таким образом, выражают более или менее нормальное состояние горна в период исследований.

Загромождение горна появилось в результате неправильного ведения доменной печи [86]. При вполне естественном желании форсировать ход печи и дать наибольшую производительность, на некоторых уральских заводах, в том числе и на Ашинском, применялся метод принудительного осаживания материалов в печи после загрузки каждой колоши. При длительном искусственном осаживании колош выработался такой ход печи, когда она сама нормального схода колош не допускала и подвисала; как правило, после каждой загрузки печи останавливали дутье для осаживания колош. При таком методе ведения печи горн начал загромождаться, вследствие неправильного распределения и перераспределения материалов. Исследованием магнитогорских доменных печей [87] с совершенной очевидностью было установлено, что всякая осадка, даже тихая, сопровождается крайне неравномерным опусканием материалов как по периферии, так и у оси печи. Иногда происходит не только неравномерное опускание материалов, но и движение их во время осадок — у периферии вниз, а у осевой части вверх.

Если учесть исключительно вредное влияние осадок, приводящих к неправильному перераспределению материалов в печи, становятся понятными причины загромождения горна доменной печи № 2 Ашинского завода.

Меры к своевременной ликвидации загромождения горна не принимались, и постепенно горн загромождался все большим и большим количеством сырой и плавленной руды в смеси со шлаком и горючим. В результате скопление неплавких масс в осевой части горна и отсутствие доступа туда газов из окислительной зоны понизили температуру горна. Загромождение горна росло как вширь, так и вверх по оси печи. Такое состояние привело к тому, что задолго до исследований на Ашинском заводе совершенно перестали пользоваться шлаковыми летками, так как вместо шлака из них шел чугун. Шлак выпускался только через чугунную летку во время выпуска чугуна.

Горн мог вмещать на высоте от лещади до шлаковой летки до 60 т чугуна; тем не менее через один-два часа после его выпуска, когда в горне скапливалось максимум 12—15 т чугуна, было видно, как он плещется у фурм. Фурмы очень часто горели. Шлак же был виден на некоторых фурмах не только перед выпуском чугуна, но и сразу же после выпуска. Очевидно, эти фурмы были изолированы в какой-то мере одна от другой и от чугунной летки и сообщались с ней слабо. На других же фурмах через час после выпуска чугуна, а иногда и раньше, появлялся шлак. Чугунная летка сообщалась с горном так, что только у нее внутри горна был крутой наклон, по которому стекали весь чугун и шлак, расположенные по кольцевому пространству у фурм.

Вследствие нарушения правильного движения материалов, на фурмах всегда были видны в довольно значительном количестве куски сырых материалов. Это явление было настолько постоянным, что на него не обращали внимания. Такое состояние горна приводило к неэкономичной работе печи, о чем свидетельствует состав газа на колошнике.

На древесном угле и удобовосстановимых бурых железняках работу газов можно считать хорошей тогда, когда содержание углекислоты в газе составляет 15—16%. На Ашинском же заводе количество углекислоты в газе колебалось в пределах 10—12%. Только что описанное состояние печи было установлено в результате исследования горна по составу газа, температуре и противодавлению газов на горизонте фурм.

На рис. 104 пунктирными линиями нанесены кривые изменения содержания окиси углерода и углекислоты за пределами окислительной зоны, характеризующие худшее состояние горна, являвшееся в период исследований обычным.

Как видно из рисунка, содержание окиси углерода резко увеличивается за пределами окислительной зоны с 45% (на расстоянии 800 мм от глаза фурмы) до 97% (у оси горна). Одновременно на расстоянии 1000—1200 мм от глаза фурмы появляется вторично углекислота. Высокое содержание окиси углерода и появление углекислоты — результат того, что центр горна был непроницаем для газов из окислительной зоны и там была низкая температура. В сумме содержание окиси углерода и углекислоты составляет почти 100%, что свидетельствует об отсутствии азота в составе газа у оси горна. Азот мог проникнуть к оси горна только из дутья; отсутствие азота говорит о том, что газы из окислительной зоны к оси горна не проникали.

Доменная печь № 2 Ашинского завода при диаметре горна всего лишь 3 м имела «мертвый столб» материалов у его оси, тогда как мощные доменные печи с диаметром горна 8 м работали совершенно нормально по всему его сечению.

Этот пример наглядно иллюстрирует несостоятельность выводов немецких и американских исследователей о неизбежности образования «мертвого столба» материалов в больших доменных печах и тем большего, чем больше диаметр горна.

Ранее уже отмечалось, что помимо других факторов на размеры окислительной зоны влияет и качество кокса.

Это с достаточной убедительностью доказывают исследования Я. М. Гольмштока, проведенные на доменной печи № 1 Магнитогорского завода в период опытных плавов на коксе, выжженном из различных углей и различном по качеству. На рис. 105 приведены полученные им кривые изменения углекислоты в зависимости от качества кокса.

Кокс № 2, плохой по своим физико-механическим свойствам, получен из 50% ленинских и 50% карагандинских углей.

Кокс № 3, хороший по физико-механическим качествам, получен из 100% карагандинских углей.

Кокс № 5, из 55% кизеловских и 45% карагандинских углей, по производственным показателям характеризуется как самый плохой.

Кокс № 6 обычный производственный, сортированный, относится к числу хороших.

При различном по качеству коксе положение фокуса горения и глубина простиранья углекислоты различны. Так, при самом плохом коксе № 5, как это видно из рис. 105, углекислота простиралась до 1700 мм от глаза фурмы, тогда как при хорошем коксе № 3 углекислота исчезала уже на расстоянии

1300 мм. Сокращение зоны горения на 400 мм (или на одну четверть) в данном случае относится за счет качества кокса. Объясняется это тем, что на плохом коксе больше сопротивле-

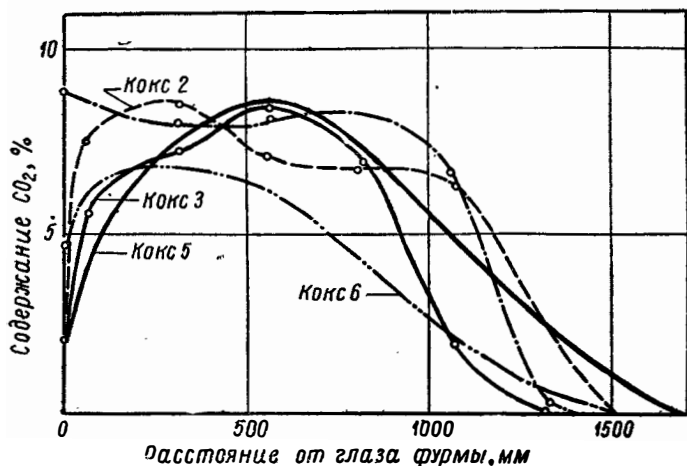


Рис. 105. Размеры окислительной зоны при различном по качеству коксе

ние в слое вышележащих материалов, а чем оно больше, тем дальше к оси стремится проникнуть газ из фурменной зоны. В результате своих исследований Я. М. Гольмшток пришел к выводу, что «на глубину простираения окислительной зоны в горне доменной печи, кроме температуры дутья, его количества и размера кусков горючего, влияет также степень сопротивления движению газов в горизонтах выше области фурм».

Приведенными выше результатами исследований работы горна мощных доменных печей с полной очевидностью установлено, что размеры окислительной зоны находятся в прямой зависимости от количества дутья, температуры его и давления, а также и от качества кокса.

Ю. Р. Тишбейн [88] на основании экспериментальных исследований зон горения перед фурмами предложил математический расчет размеров окислительной зоны. Небезинтересно отметить, что построенные по его расчету кривые изменения содержания углекислоты в газе до фокуса горения полностью совпадают с аналогичными кривыми, полученными нами в действительности при исследовании доменной печи № 1 Магнитогорского завода. Расхождение имеется за фокусом горения, где, по полученным нами опытными данным, глубина простираения углекислоты значительно меньше, чем по расчетным дан-

ным Ю. Р. Тишбейна. Несоответствие за фокусом горения опытных данных с расчетными Ю. Р. Тишбейн объясняет тем, что скорость газа резко уменьшается, и для прохождения одинаковых отрезков по длине оси фурм требуются все большие и большие промежутки времени, что не может быть учтено в выведенных им формулах.

М. К. Гродзовский [89], обработав своим методом полученные нами данные исследования размеров окислительной зоны в древесноугольной доменной печи Ашинского завода, построил чрезвычайно показательные кривые изменения содержания углекислоты и окиси углерода в зависимости от изменения свободного кислорода в газе окислительной зоны.

Обработанные им по формуле А. С. Предводителява результаты наших исследований изменения окислительной зоны в горне доменной печи № 1 Магнитогорского завода в зависимости от количества дутья — также дали полное совпадение с теоретическими расчетами.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований М. К. Гродзовского полностью совпадают с результатами наших исследований зависимости зон горения от количества дутья, что является убедительным доказательством правильности наших выводов.

ВЛИЯНИЕ ДУТЬЯ, ОБОГАЩЕННОГО КИСЛОРОДОМ, НА РАЗМЕРЫ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ЗОНЫ

В 1913 г. были проведены первые опыты, из которых следовало, что при незначительном увеличении кислорода в дутье (на 1,5—2%) производительность доменной печи повышается на 10—12%. После этого у нас и за границей было произведено много теоретических расчетов, относящихся к проблеме работы доменных печей на дутье, обогащенном кислородом. Изменения, которые вносит кислород в доменное производство, наиболее четко сформулировал акад. М. А. Павлов [90]: «Во-первых, горение в обогащенном кислородом дутье, т. е. дутье, лишенном некоторого количества азота, завершается в более ограниченном пространстве, чем в обыкновенном атмосферном дутье, во-вторых, оно дает более высокую температуру вследствие уменьшения — по отношению к весу сгорающего углерода — количества газов, воспринимающих это тепло. В-третьих, меньшее количество газов более быстро и совершенно охлаждается, меняя свой химический состав в большей мере, чем при атмосферном дутье».

Положения, выдвинутые акад. М. А. Павловым, хорошо согласуются с лабораторными опытными работами Л. Н. Хитрина и Х. И. Колодцева [64], доказавшими, что скорость убывания кислорода при 42% его в дутье идет во много раз быстрее, чем при содержании в 21%, а также с теоретическими расчетами С. Т. Ростовцева [68] по скоростям реакций горения.

Несмотря на большое внимание, уделяемое проблеме работы доменных печей на дутье, обогащенном кислородом, до сих пор проведено очень мало опытных работ. Из таких работ можно указать на опыты в Бельгии в 1913 г., опыты на Чернореченском заводе, в Германии в 1932—1933 гг. и в 1938—1939 гг. и у нас на заводе ДЗМО в Днепропетровске в 1940—1941 гг.

Опыты в Германии в 1932—1933 гг. [91] показали, что при работе печей на дутье, обогащенном кислородом:

1) расход кокса снижается, и в результате этого, а также от уменьшения количества газа, резко понижается температура колошника;

- 2) увеличивается производительность печи, и ход ее становится более ровным;
- 3) делается возможной работа на более основных шлаках;
- 4) сокращается вынос колошниковой пыли.

Опыты, повторенные там же в 1938—1939 гг. [92], ставили задачей проплавить бедные немецкие руды (что для экономики Германии было чрезвычайно важно) на дутье, обогащенном кислородом, и выяснить весь комплекс технико-экономических вопросов, связанных с работой доменных печей на этих рудах.

Следует отметить, что при выходе чугуна из рудной части шихты (в одном из опытов) всего лишь 19,7% и выходе шлака 2,45 на единицу чугуна и основности его 0,58, выплавлялись чугуны с содержанием серы 1,773%. Чугун предназначался для вне доменного обессеривания. Небезинтересно также отметить что, в одном из опытов при содержании кислорода в дутье 26% время пребывания шихты в доменной печи снизилось до 4 часов, не вызывая никаких затруднений в работе печи. Вторая серия опытов, так же, как и первая, доказала, что при работе на дутье, обогащенном кислородом, расход кокса снижается и увеличивается производительность печи, ход ее становится более ровным. Предел концентрации кислорода в дутье определяется температурой колошникового газа.

Неправильные выводы, к которым пришли Пирот, Кини и Леннингс, в результате исследований ими состава газа в горне доменных печей, и Рейлендер, в результате измерения им температуры горна, наложили свой отпечаток на обе серии опытов, произведенных в Германии в 1932—1933 гг. и в 1938—1939 гг. Эти исследователи в результате неправильного толкования своих опытов, а за ними и многие другие, пришли к выводу, что объем окислительной зоны горна постоянен и не зависит от количества дутья, температуры его и давления, что за пределами окислительной зоны температура горна настолько низка, что там существует «мертвый столб» материалов, газ туда не проникает и там не происходит почти никаких реакций. Созданный ими жупел под именем «тотерман» настолько довлел над их сознанием, что при выборе размеров опытной доменной печи в 1932—1933 гг. они руководствовались этими соображениями, и «диаметр горна был принят 2400 мм, чтобы избежать мертвого пространства по поперечному сечению горна и обеспечить возможно равномерное опускание шихты» [91]. Это же лежало в основе [92] и при выборе размеров опытной доменной печи в 1938—1939 гг., когда Леннингс утверждал, что «принятый диаметр горна в 2400 мм должен был обеспечить равномерное снижение кокса по всему сечению без образования «мертвого столба» в центре».

По поводу первых опытов в 1932—1933 г. Леннингс [91] писал, что «в зоне горения перед фурмами газы, образующиеся от горения кокса, проникают только на глубину до 1,5 м». Что он в этом утверждении не одинок, следует из позиции, занятой Мак-Ки [93], который утверждал, что «в центре горна оставалось мертвое пространство, наполненное коксом, и в нем никаких процессов не происходило, кроме растворения углерода в чугуна», и что «только на науглероживание кокс из мертвого центрального пространства и расходовался». Спасение от «мертвого центрального пространства» Кини, а за ним и Мак-Ки видели в постройке печей с эллиптическим горном, а для печей с круглым горном — в переходе на большее число фурм, например с 16 до 22.

В самое последнее время Джозеф [94] в своем докладе на сессии, посвященной памяти Гау, все свои теоретические выводы в отношении работы горна доменной печи построил на том, что имеется эффективная площадь, ограниченная 6-футовым активным кольцом в зоне горения, и в остальном — неактивная центральная сердцевина. Изложенные выше взгляды имели и других последователей [95].

Имеются опасения, что в связи с увеличением количества кислорода в дутье и сокращением размеров окислительной зоны будет затруднен ровный ход доменной печи, плавного опускания материалов не получится и очень трудно будет работать на обогащенном кислородом дутье. Поэтому задача будущих исследований заключается в том, чтобы найти такие методы ведения доменных печей, при помощи которых они работали бы вполне нормально и экономично и при дутье, обогащенном кислородом. Во всяком случае кислород — это будущее доменного производства.

При работе доменной печи ДЗМО на ферросилиций на дутье, обогащенном кислородом, М. А. Шаповалов [96, 97], произвел исследование состава газа в горне. Он пришел к неправильному выводу, что «глубина окислительной зоны при кислородном дутье оставалась такой же, какой была при обычном дутье».

Что касается состава газа, то вывод Шаповалова находится в противоречии с приведенными кривыми состава газа в его статье [96], где при 22,7% кислорода в дутье фокус горения отстоял от глаза фурмы на расстоянии 750 мм, с максимумом CO_2 — 13%, углекислота исчезала на расстоянии 1100 мм, кислород — 750 мм.

В статье А. П. Любана [85] указан состав газа, полученный Шаповаловым при 30% кислорода в дутье (к сожалению, сам Шаповалов в своих статьях не дал кривых состава газа при таком количестве кислорода). Из кривых, приведенных А. П. Лю-

баном, следует, что фокус горения с увеличением содержания кислорода в дутье переместился с 750 до 500 мм, максимальное содержание CO_2 поднялось с 13 до 16%, углекислота и кислород исчезли примерно на таких же расстояниях, как и при 22,7% кислорода в дутье. Передвижение фокуса горения к глазу фурмы с увеличением содержания углекислоты в фокусе горения при увеличении кислорода в дутье с 22,7 до 30% свидетельствуют о том, что размеры окислительной зоны менялись. Что же касается простиранья кислорода и углекислоты по радиусу горна, то М. А. Шаповалов, применяя неправильную методику и производя забор проб газа только через 250 мм, не смог точно определить границу окислительной зоны и поэтому пришел к неправильным выводам. М. А. Шаповаловым были проведены только единичные измерения температуры в трех точках по радиусу горна, что не дает возможности судить о температуре по всему сечению горна. По его данным, при 22,7% кислорода в дутье и работе печи на ферросилиций температура была: в фокусе горения (на расстоянии 750 мм от глаза фурмы) — 2125° , на расстоянии 960 мм — 1930° и у оси горна — 1600° . Изменение температуры горна представляется чрезвычайно трудной и сложной операцией и кроме графит-вольфрамовой термопары, примененной для этих целей лабораторией имени акад. М. А. Павлова, других надежных пирометров нет.

Нами на доменной печи Магнитогорского металлургического комбината в декабре 1946 г. были проведены исследования процесса горения в горне доменной печи и испытание стойкости графит-вольфрамовой термопары при работе на дутье, обогащенном кислородом. При этом весь кислород, которым располагал комбинат, подавался через одну фурму в течение $\frac{3}{4}$ — $1\frac{1}{4}$ часа для каждого измерения; такая длительность подачи кислорода была необходима для образования у этой фурмы новой устойчивой зоны горения кокса с определенным составом газа и температурой. Важно было сохранять строго постоянным количество кислорода, поступающего в единицу времени по кислородопроводу в доменную печь. Достигалось это регулированием числа оборотов вентиля, закрывающего доступ кислорода из кислородопровода в фурменный рукав.

Давление кислорода контролировалось манометром. Перед открытием вентиля давление в кислородопроводе достигало 17 ат; после поворота вентиля на несколько оборотов давление падало до некоторой постоянной величины; это означало, что весь подаваемый кислородной станцией кислород непрерывно поступает в таком же количестве в доменную печь. После этого для контроля количества поданного кислорода отбирались пробы дутья из фурмы при различной концентрации в нем кислорода — от 23,6 до 33,6%. Температура по радиусу горна измеря-

лась при максимальном количестве кислорода в дутье — 33,6% и для сравнения в те же дни — при нормальном дутье. При промежуточных концентрациях кислорода в дутье производились лишь единичные измерения температуры, вследствие недостатка времени. Пробы газа при различном содержании кислорода в дутье забирались только из окислительной зоны, ибо это и представляло интерес. Так как комбинат мог подавать максимум 450—500 м³ 98%-ного кислорода в час, то для повышения концентрации его в дутье диаметр фурмы № 7, через которую проводились исследования, был уменьшен со 180 до 120 мм; таким образом, печь имела 16 фурм, из них 14 по 180 мм, одну (над леткой) — 100 мм и одну (№ 7) — 120 мм. В период исследований в печь подавалось 2500—2600 м³/мин дутья с температурой 500° и давлением 1,35—1,40 атм; если принять потери дутья в 10%, то можно считать, что через все фурмы поступало в печь 2300 м³/мин дутья при живом сечении всех фурм 3752 см². Через фурму № 7, имевшую живое сечение 113 см², поступало дутья в 2¼ раза меньше, чем через фурмы диаметром 180 мм; поэтому окислительная зона у этой фурмы даже при атмосферном дутье, по сравнению с зонами других фурм, была значительно меньше.

В табл. 57 приведен состав газа и на рис. 106 кривые изменения содержания углекислоты в нем, показывающие, что при 21% O₂ окислительная зона простиралась до 1100 мм и фокус горения отстоял на расстоянии 400 мм от глаза фурмы, причем максимальное содержание углекислоты составляло 14,3%. При 23,6% O₂ в дутье фокус горения передвинулся к глазу фурмы и отстоял от нее на расстоянии 350 мм с максимальным содержанием углекислоты 17%. При 25,4% O₂ фокус горения остался на расстоянии 350 мм от глаза фурмы, наибольшее содержание углекислоты выросло до 21,6%; окислительная зона по глубине сократилась на 200 мм. То же самое наблюдалось и при 28% O₂ в дутье, но фокус горения переместился еще ближе к глазу фурмы и отстоял от нее на расстоянии 300 мм; максимальное содержание углекислоты поднялось до 20,8%. При 31% O₂ в дутье фокус горения передвинулся еще ближе к глазу фурмы и отстоял от нее на расстоянии 250 мм, максимум содержания углекислоты дошел до 23,4% и глубина зоны сократилась до 700 мм. При 33,6% O₂ в дутье максимальное содержание углекислоты в фокусе горения поднялось до 27,8%. Повидимому, фокус горения должен был еще ближе передвинуться к глазу фурмы, но между 100 и 250 мм не удалось взять проб газа (как и далее 400 мм); поэтому положение фокуса горения условно оставлено на расстоянии 250 мм от глаза фурмы. Судя по характеру кривой, за пределами фокуса горения размер окислительной зоны должен был еще более сократиться.

Состав газа (%) в горне доменной печи Магнито

Дата	O ₂ в дутье, %	Состав газа	Расстояние от										
			-50	0	50	100	150	200	250	300	350	400	
7/XII 1946 г.	23,6	CO ₂	0,4	0,1	0,4	6,6	—	10,2	—	16,0	17,0	16,0	15,6
		O ₂	23,6	22,9	22,4	11,0	—	8,0	—	3,0	3,0	0,8	1,6
		CO	0,0	0,2	1,0	2,4	—	1,4	—	2,8	1,6	4,8	5,2
11/XII 1946 г.	25,4	CO ₂	0,0	0,0	—	12,6	15,0	—	20,0	21,0	21,6	20,2	—
		O ₂	25,4	25,4	—	3,6	3,2	—	0,0	0,0	0,0	0,0	—
		CO	0,0	0,0	—	9,2	3,0	—	2,6	2,4	2,2	5,4	—
9/XII 1946 г.	28,0	CO ₂	0,0	0,6	8,6	12,0	18,0	18,0	—	20,8	—	10,2	—
		O ₂	28,0	24,6	19,0	15,0	10,2	9,4	—	2,6	—	0,0	—
		CO	0,0	3,0	1,4	1,0	0,2	1,8	—	1,2	—	24,6	—
15/XII 1946 г.	30,8	CO ₂	0,0	0,0	0,6	11,4	—	—	—	—	—	—	—
		O ₂	30,8	30,4	28,8	5,6	—	—	—	—	—	—	—
		CO	0,0	0,0	2,6	19,2	—	—	—	—	—	—	—
10/XII 1946 г.	31,0	CO ₂	0,0	0,0	6,0	15,6	16,2	18,8	23,4	21,8	—	21,6	—
		O ₂	31,0	31,0	21,2	11,0	11,0	8,2	5,0	2,4	—	1,0	—
		CO	2,0	0,0	0,0	0,4	0,6	1,0	2,4	5,4	—	9,6	—
15/XII 1946 г.	33,6	CO ₂	0,0	0,8	14,6	18,0	—	—	27,8	24,0	—	18,4	—
		O ₂	33,6	32,6	8,2	8,0	—	—	5,2	5,6	—	0,8	—
		CO	0,0	0,6	1,2	0,8	—	—	0,6	3,2	—	22,1	—
Среднее из 32 проб за период с 7 по 15/XII 1946 г.	21,0	CO ₂	0,0	0,0	0,6	1,2	2,9	6,8	—	9,0	—	14,3	—
		O ₂	21,0	21,0	20,0	18,0	14,1	12,2	—	7,1	—	4,5	—
		CO	0,0	0,0	0,8	1,0	1,1	1,2	—	6,0	—	7,7	—

Таблица 57

горского завода при дутье, обогащенном кислородом

глаза фурмы, мм											Примечание
450	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
—	7,0	—	2,2								На расстоянии от глаза фурмы: —100 мм—150 мм CO ₂ 0,0 0,0 O ₂ 25,4 26,2 CO 0,0 0,0
—	0,0	—	0,0								
—	23,0	—	37,8								
—	4,4	1,8	1,0	0,8	0,0	0,0					
—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
—	34,8	40,6	40,6	40,0	38,0	42,2					
3,8	2,4	2,0	0,0	0,0	0,0	—	—	—	0,0		
0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	—	—	—	0,0		
34,8	38,8	40,0	41,6	38,4	39,6	—	—	—	42,8		
—	9,7	7,6	6,6	4,8	2,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	
—	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
—	18,7	20,2	20,8	27,4	29,6	32,4	35,0	38,2	38,8	39,6	

Всего 61 проба.

Если считать крайними пределами размерами окислительной зоны при опытах 1100 и 700 мм, то можно сделать заключение, что размер окислительной зоны при переходе от обыкновенного

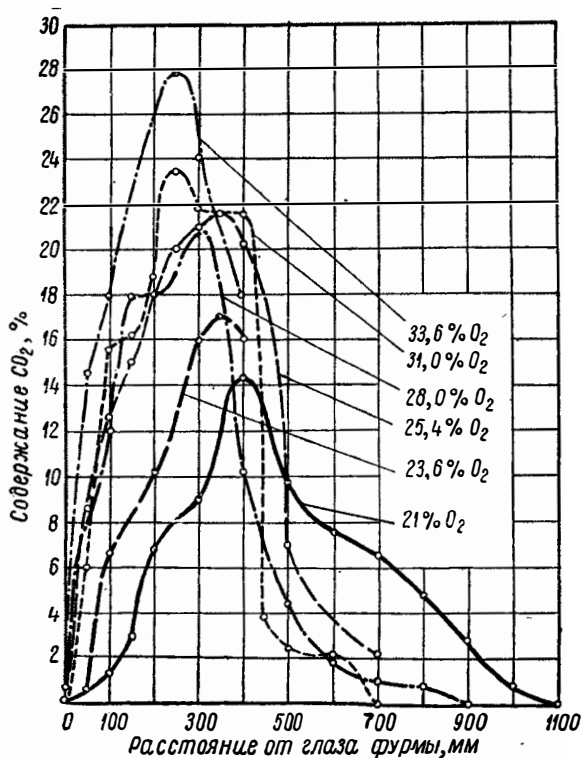


Рис. 106. Изменение содержания углекислоты в газе в зоне горения в зависимости от содержания кислорода в дутье

дутья к дутью, обогащенному кислородом до 33,6%, сократился в линейном измерении на 400 мм; или в 1,5 раза, по площади почти в 2,5 раза и по объему почти в 4 раза.

Характер изменения кривых содержания углекислоты показывает, что по мере увеличения содержания кислорода в дутье процесс горения становится интенсивнее; поэтому сразу же за глазом фурмы быстро повышается концентрация углекислоты в газе, фокус горения приближается к фурме, и содержание в нем углекислоты также резко возрастает. За фокусом же содержание углекислоты в газе быстро падает, и размеры окислительной зоны сильно сокращаются.

Определение содержания кислорода в газе окислительной зоны показало (рис. 107), что по мере увеличения концентрации кислорода в дутье скорость его поглощения растет; сразу же за глазом фурмы его содержание резко уменьшается и на расстоянии 200—300 мм падает до нескольких процентов. Глубина проникновения кислорода по радиусу горна сокращается на 100—200 мм. Характер кривых подтверждает вывод, что процесс горения при увеличении концентрации кислорода в дутье становится более интенсивным. Отношение кислорода к азоту не представляет плавно изменяющейся кривой вследствие малого количества взятых проб газа, так как на различное количество протекающих струй чугуна расходуется на окисление в различное время разное количество кислорода. Плавная кривая отношения кислорода к азоту может быть получена только в результате большого количества проб газа.

На рис. 108 приведены кривые изменения содержания окиси углерода в газе при различной концентрации кислорода в дутье. Из кривых видно, что до фокуса горения содержание окиси углерода в газе почти не меняется, оставаясь очень

низким, как и при нормальном дутье. За фокусом горения при нормальном дутье кривая содержания окиси углерода плавно повышается, при дутье же, обогащенном кислородом, — повышается резко. Так, например, на расстоянии 600 мм от глаза фурмы при 21% O_2 в дутье газ содержит 20,2% CO , а при 28—31% O_2 вдвое больше — 40,6% CO .

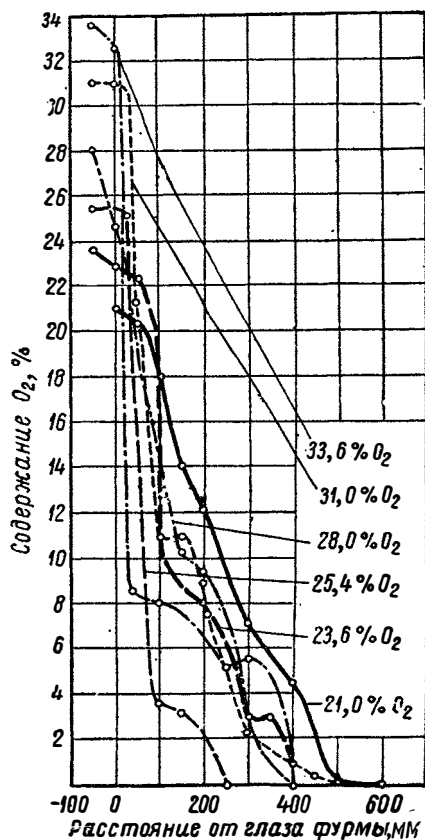


Рис. 107. Изменение содержания кислорода в газе в зоне горения в зависимости от содержания кислорода в дутье

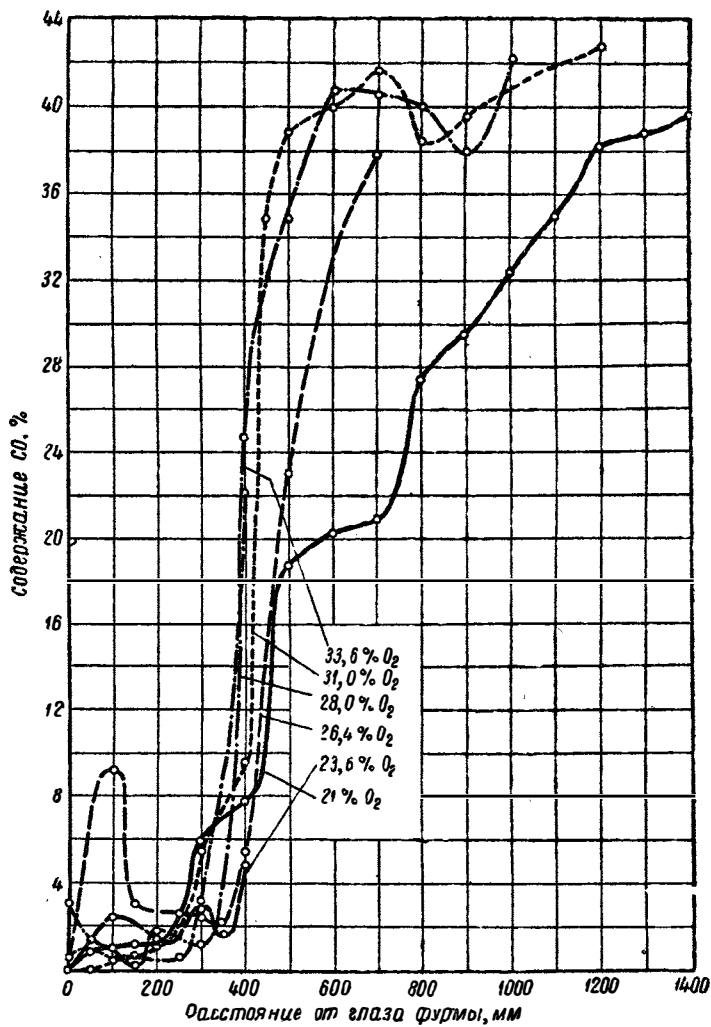


Рис. 108. Изменение содержания окиси углерода в газе по радиусу горна в зависимости от содержания кислорода в дутье

Высокое содержание окиси углерода в газе на границе окислительной зоны при дутье, обогащенном кислородом, по сравнению с нормальным дутьем вполне закономерно.

Если не считать увеличения содержания окиси углерода в результате прямого восстановления и не принимать во внимание небольшого количества водорода, поступающего из влаги дутья, то при 21% O_2 в дутье газ должен содержать 34,7% CO и 65,3% N_2 , а при 33,6% O_2 — уже 50,3% CO и только 49,7% N_2 . Поэтому высокое содержание окиси углерода на границе окислительной зоны и за ее пределами легко объяснимо.

Согласно приведенному расчету, в газе должно быть не менее 50,0% CO ; в нашем же случае ее было не более 42—43%, и это объясняется тем, что за пределами окислительной зоны на состав газа влияют соседние (справа и слева) фурмы. Через эти фурмы поступало дутье с 21% O_2 , и концентрация в газе окиси углерода, образующейся от горения у этих фурм, была более низкой, чем от горения у исследуемой фурмы, через которую подавалось дутье, обогащенное кислородом. За пределами окислительных зон всех фурм происходило смешение газа.

Изучение размеров окислительной зоны в горне доменной печи при различном содержании кислорода в дутье показало, что процесс горения при увеличении концентрации кислорода в дутье становится более интенсивным и благодаря этому размеры окислительной зоны сокращаются. Тем не менее не нужно опасаться того, что с переходом на дутье, обогащенное кислородом и сокращением размеров окислительных зон, ход печи будет затруднен. Должны быть найдены методы ведения печи, обеспечивающие ее нормальную работу. Существует мнение, что идеальным ходом доменной печи следует считать такой, при котором все поперечное сечение горна занято окислительной зоной. В частности, такой ход печи имели в виду Мак-Киз, Кини, Райс и проф. И. А. Соколов, предлагая создать эллиптический горн и увеличить число фурм.

Бесспорно, что увеличение размеров окислительной зоны способствует более равномерному и более плавному опусканию сырых материалов. Но не следует забывать, что в зоне горения совершается не только полезная и абсолютно необходимая, но и бесполезная, если не сказать вредная, работа по окислению кислородом дутья элементов чугуна. В горне ниже фурм приходится снова восстанавливать окисленные кремний, марганец и в особенности железо.

Как было установлено нами и другими исследователями, в окислительной зоне горна шлак содержит до 60—70% закиси и окиси железа. Таким образом, железо чугуна окисляется кис-

лородом дутья не только до закиси железа, но и до магнитной окиси.

При дутье, обогащенном кислородом, процессы окисления должны быть еще более энергичными; поэтому в окислительной зоне содержание закиси железа и магнитной окиси в шлаке будет выше, чем это указывают приведенные цифры, а если бы вся область горна была окислительной, то подавляющая часть железа чугуна на горизонте фурм окислилась бы. При этом здесь выделялось бы значительное, но вряд ли нужное количество тепла, часть которого уносилась бы газами в верхние горизонты печи. Под фурменным горизонтом, где температура значительно ниже, чем на уровне фурм, было бы необходимо затрачивать дополнительное количество тепла на восстановление окисленных элементов.

Правда, акад. М. А. Павлов отмечает, что при этом произойдет лишь перенос тепла и перераспределение температур, так как «горение элементов у фурм повышает здесь температуру, а обратное восстановление этих элементов за счет твердого углерода (ближе к оси горна и ниже фурм) требует меньше тепла, чем его выделилось бы при окислении, например, железа и марганца». Но едва ли такое перемещение тепла можно считать полезным.

На горизонте фурм температуры, вызванные горением углерода, достаточно высоки. Под горизонтом фурм температуры значительно ниже, и запас тепла тратится на реакции, приводящие к образованию в горне чугуна такого состава, который он имеет при выпуске. Дополнительная нагрузка на нижнюю часть горна будет вредной; поэтому расширение окислительной зоны на все сечение горна или на значительную его часть нельзя считать желательным. Следует сохранять размеры окислительной зоны такими, чтобы обеспечить нормальный и быстрый ход доменной печи с высокой производительностью и низким расходом кокса.

РАЗМЕРЫ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ЗОНЫ ПРИ ПОДВИСАНИЯХ ПЕЧИ И ОСАДКАХ

Очень часто в советской и в иностранной литературе приводится состав газа в окислительной зоне, из которого видно, что непосредственно у глаза фурмы содержится меньше 21% кислорода, несколько процентов углекислоты и некоторое количество окиси углерода.

Является ли такой состав газа нормальным при ровном ходе печи или он связан с расстройством хода, можно было выяснить только путем исследований состава газа в зоне горения при различном ходе доменной печи. В связи с этим, состав газа, полученный при неровном ходе печи, записывался отдельно и в подсчет средних данных о размерах окислительной зоны не включался.

Изучение состояния горна при ходе доменной печи с подвисяниями и осадками показало, что состав газа в окислительной зоне и за ее пределами резко отличается от состава газа, полученного при нормальном (ровном) ходе доменной печи.

Так, в период исследований в 1946 г. доменной печи № 6 Магнитогорского завода нормальный ход ее часто нарушался, печь шла с подвисяниями и осадками, как самопроизвольными, так и принудительными. В период наиболее тугого хода печи с осадками при нормальном количестве дутья был получен состав газа (рис. 109), резко отличающийся от состава его при нормальном ходе. Здесь нет четко выраженного фокуса горения и нет плавного изменения содержания углекислоты, кислорода и окиси углерода. При этом у глаза фурмы кислорода было уже не 21%, а всего лишь 14,8%, но зато 6,8% окиси углерода и 0,4% углекислоты.

Подобное явление замечалось и ранее при исследованиях состава газа на доменных печах № 1 Магнитогорского завода и № 3 Запорожстали при неровном ходе печей. Поэтому при исследованиях 1946 г. этот случай был изучен дополнительно; были взяты пробы газа внутри фурмы на расстоянии от глаза фурмы минус 50 мм и минус 100 мм. Оказалось, что на расстоя-

нии минус 50 мм в газе содержится только 19,2% кислорода вместо 21%, но зато 1,8% окиси углерода вместо 0%; на рас-

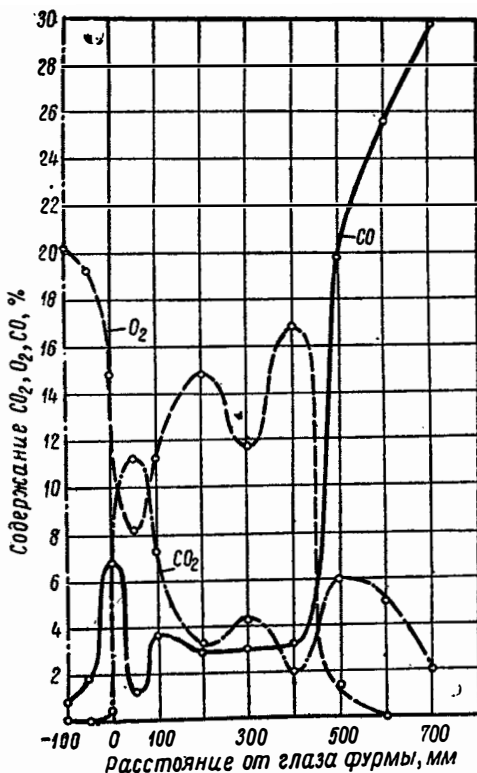


Рис. 109. Состав газа в окислительной зоне горна при работе печи с подвижками и осадками.

стоянии минус 100 мм соответственно 20,2% кислорода и 0,8% окиси углерода.

Другой пример такого явления представляет состав газа доменной печи № 3 Запорожстали, полученный при исследованиях в 1940 г. (рис. 110). К сожалению, тогда внутри фурмы состав газа не изучался.

Пробы газа были взяты при сильно расстроенном ходе доменной печи; в связи с производственными неполадками наблюдалось резкое похолодание горна и значительное загромождение его недостаточно подготовленными материалами; в нем происходили процессы, обычно идущие в заплечиках, распаре и нижней части шахты. В этом случае у глаза фурмы кислорода бы-

ло всего лишь 5%, углекислоты уже 11% и окиси углерода 4,5%; граница окислительной зоны не была обнаружена, так

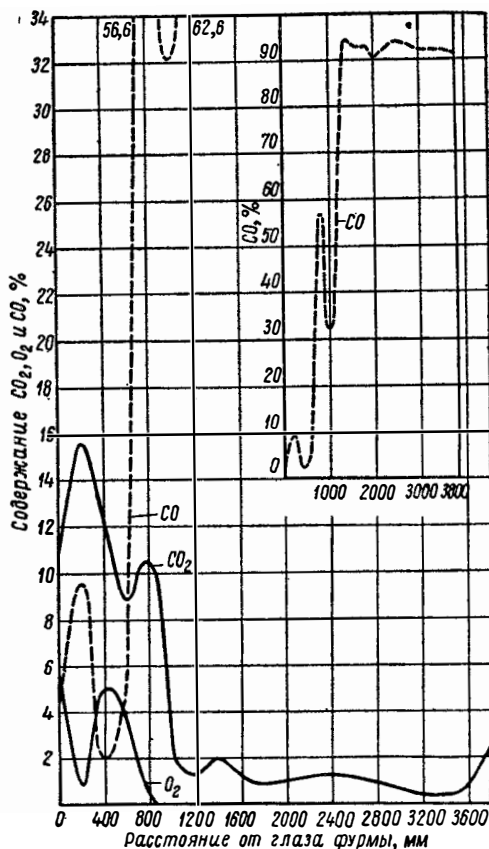


Рис. 110. Состав газа по радиусу горна при расстроенном ходе печи.

как кроме углекислоты, которая образовалась в этой зоне от горения кокса, газ до самой оси горна сохранял небольшое количество углекислоты (в пределах 0,5—2%), получающейся при низкой температуре.

Содержание окиси углерода в газе на расстоянии от 1300 мм и до оси горна превышало 90%; следовательно, газ из окислительной зоны в эту часть горна почти не проникал вследствие его загромождения.

Аналогичные случаи ненормального состава газа в горне при расстроенном ходе печи наблюдались и ранее. Так, например,

при исследованиях доменной печи № 1 Магнитогорского завода в 1934 г. был взят газ непосредственно после осадки печи, когда в горн попало много недовосстановленной руды.

В связи с этим на расстоянии 1400 мм от глаза фурмы (рис. 111) содержание окиси углерода резко возросло, дойдя до 90—92%. Максимуму содержания окиси углерода в 92% соответствует и второй максимум содержания углекислоты в 3%. Сумма окиси углерода и углекислоты при максимальных значениях составляла 95%. Азота в газе почти не было, и кислород в эту изолированную зону поступал не из дутья, а от недовосстановленной руды.

При исследовании той же доменной печи в 1935 г. были также случаи ненормального состава газа в горне при ходе печи с подвисаниями и осадками. Вследствие поступления пылеватой руды доменная печь часто работала неровно, давление дутья поднималось иногда до 1,8—2,0 ати, сход колош прекращался, печь подвисала; за подвисаниями следовали осадки. После нескольких осадок была измерена температура горна. Измерения показали, что в отдельных точках по радиусу температура понизилась на 100—200 и даже 300°. В другом случае после нескольких осадок было взят газ по радиусу горна, было отмечено появление углекислоты за пределами окислительной зоны (рис. 112), с одновременным высоким содержанием окиси углерода на расстоянии 1500—3000 мм от глаза фурмы. Сум-

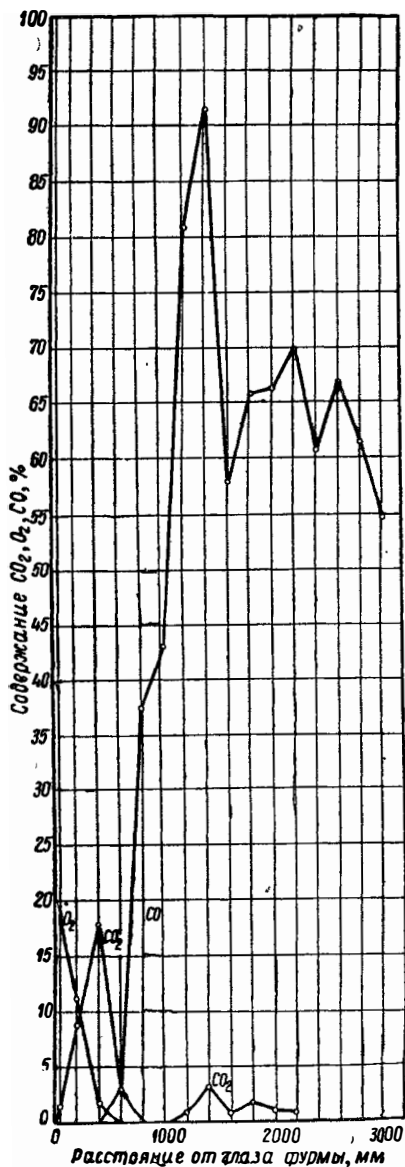


Рис. 111. Состав газа по радиусу горна после осадки печи.

ма углекислоты и окиси углерода на этом участке доходила до 99%, следовательно, азота не было, и этот участок представлял совершенно изолированную от горновых газов зону. Содержание

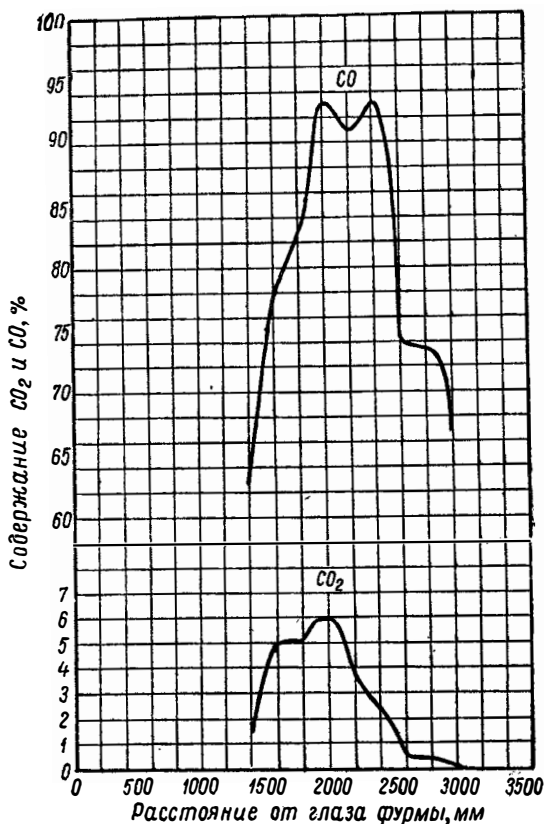


Рис. 112. Состав газа за окислительной зоной горна после нескольких осадков.

кремния в чугуне выпуска, последовавшего за этим измерением, снизилось до 0,06%.

Появление углекислоты за пределами окислительной зоны и высокое содержание окиси углерода явились следствием временного загромождения горна. Через 16 час. определение состава газа и температуры показало, что углекислота на участке 1500—3000 мм от фурмы исчезла, и печь стала работать нормально.

Приведенные примеры говорят о том, что при расстроенном ходе печи состав газа в горне резко отличается от состава газа,

полученного при нормальном (ровном) ходе печи. Неопытные исследователи, определяя состав газа как при нормальном, так и ненормальном ходе печи и выводя из полученных данных (без подразделений) средний состав газа, искажают истинный состав его. Присутствие окиси углерода и углекислоты в фурме при неровном ходе печей может быть объяснено тем, что давление газа в горне после подвисаний, в момент осадок, поднимается несколько выше давления дутья; вследствие этого происходит обратное движение газа из печи внутрь фурмы; после прорыва газов из горна вверх давление в нем падает ниже давления дутья, которое и начинает снова поступать в печь. Такие колебания давления газа в горне могут быть частыми, но кратковременными. Приборы для измерения давления дутья, находящиеся перед воздухомнагревательными аппаратами, не отмечают этих колебаний, так как большой свободный объем воздухомнагревательного аппарата выравнивает это давление; но если бы приборы, указывающие давление дутья, были поставлены у глаза фурмы, они, бесспорно, отметили бы такие колебания.

В практике работы доменных печей часто наблюдается, что в период длительных подвисаний дутье в печь не поступает и турбовоздуходувная машина работает «на себя». Но кратковременные колебания давления газа в горне на работе воздуходувных машин не отражаются.

Повидимому, подобными же явлениями объясняются отмеченные и другими исследователями случаи (в частности Пиротом и Кини средние состава газа из 11 печей), когда газ у глаза фурмы содержал не 21% кислорода, а значительно меньше (11—12%) и соответственно не нуль, а довольно заметное количество углекислоты. При ровном ходе печи это исключается.

ДАВЛЕНИЕ ГАЗОВ В ГОРНЕ

Одновременно с изучением состава газа измерялось и противодействие газов в горне в различных точках по радиусу от глаза фурм до оси доменной печи. Противодействие горна, наряду с составом газа и температурой его, наилучшим образом иллюстрирует состояние горна, поэтому при исследовании мощ-

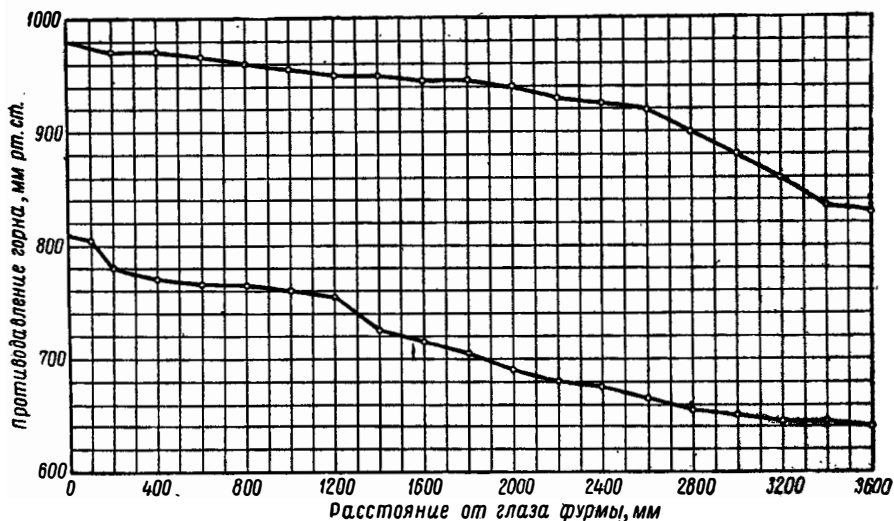


Рис. 113. Противодействие газов в горне доменной печи № 1 Магнитогорского завода

ных доменных печей довольно подробно было изучено статическое давление газов в горне при различном давлении дутья.

На рис. 113 приведены две кривые противодействия газов в горне доменной печи № 1 Магнитогорского завода по исследованиям 1935 г.

Верхняя кривая характеризует противодействие при нормальном режиме печи и выведена по средним данным за длительный период. Получена она при среднем давлении дутья в кольцевом

воздухопроводе 1,45 ати (1102 мм рт. ст.) и количестве дутья 3000 м³/мин при диаметре фурм 175 мм. Нижняя кривая получена при пониженном количестве и давлении дутья.

Кривые показывают, что противодействие газов в горне изменяется довольно плавно как в окислительной зоне, так и за пределами ее, и свидетельствуют о хорошей проницаемости горна и проникновении газов до оси. У оси горна давление газов составляет 830 мм. Потери напора от фурм до оси горна — 150 мм (15,3%). Высокое давление газов у оси горна указывает на отсутствие в мощных доменных печах «мертвого столба материалов» и на нормальную работу горна по всему сечению.

При последующих исследованиях той же доменной печи, в частности в 1937 г., одновременно с определением размеров окислительной зоны подробно изучалось и давление газов в горне при различном количестве дутья. На рис. 114 приведены кривые изменения давления газов в горне при меняющемся давлении дутья и количестве его 3400 м³/мин.

По отдельным данным выведены средние, отмеченные на рисунке жирными линиями. Давление газов в горне от периферии к оси изменяется незначительно и свидетельствует о хорошем состоянии горна; горн совершенно свободен от какого-либо загромождения; газы легко проникали к его оси.

На рис. 115 представлены аналогичные кривые при количестве дутья 3200 м³/мин. Эти данные приведены по одному измерению, но они также указывают на нормальную работу горна; давление газов очень высокое по всему сечению его.

На рис. 116 показано противодействие газов в горне при количестве дутья 2500 м³/мин. И в этом случае давление газов как у периферии горна, так и у оси довольно высокое.

При исследовании в 1938 г. доменной печи № 3 Запорожстали с диаметром горна 8 м было определено падение давления от воздухонагревательного аппарата до оси горна (рис. 117). Давление в фурменном рукаве составляло 87%, в сопле — 86,1%, в фурме — 83,6%, у глаза фурмы — 83,1% от давления дутья перед воздухонагревателями.

Таким образом, давление дутья при проходе через воздухонагреватель и кольцевой воздухопровод снижается на 13%, при переходе от фурменного рукава в сопло — на 0,9%, при переходе из сопла в фурму — на 2,2%, и при выходе из фурмы — на 0,8%, т. е. при прохождении дутья до глаза фурмы его давление снижается на 16,9%. В горне давление в направлении от фурмы до оси на протяжении четырех метров уменьшается совершенно незначительно — на 3,7% (с 83,1 до 79,4%).

Столь малое падение давления говорит о хорошей проницаемости горна, что может быть отнесено только за счет качества

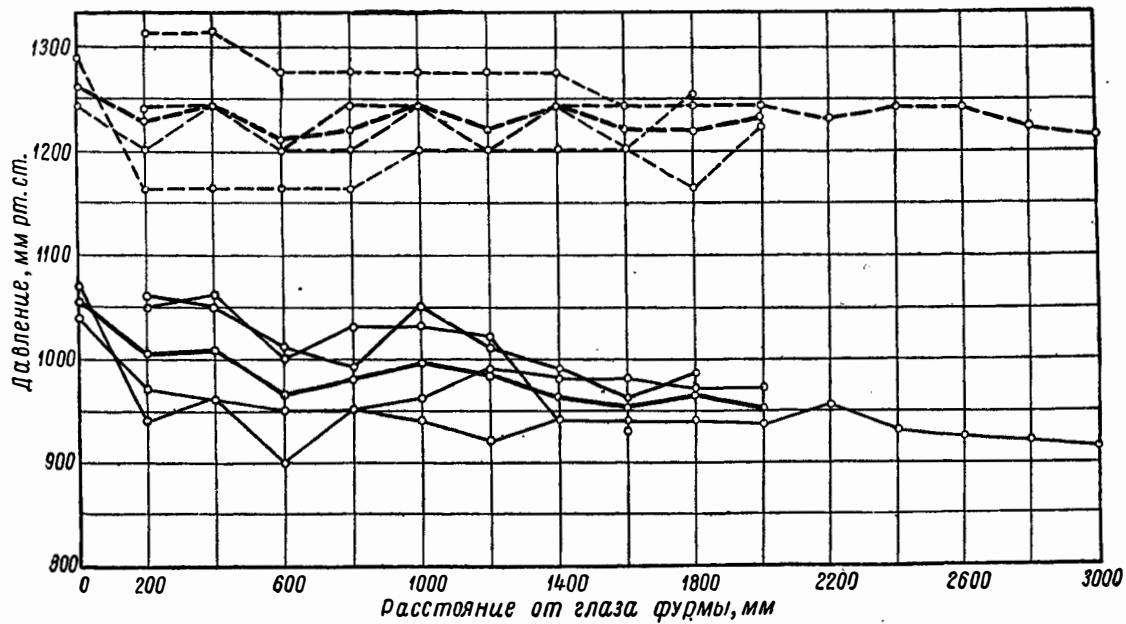


Рис. 114. Давление дутья (пунктирные кривые) и противодействие газов в горне (сплошные кривые) при количестве дутья $3400 \text{ м}^3/\text{мин.}$

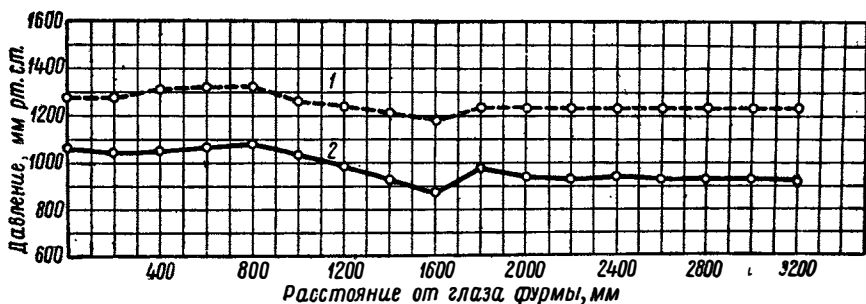


Рис. 115. Давление дутья (1) и противодействие газов в горне (2) при количестве дутья 3200 м³/мин

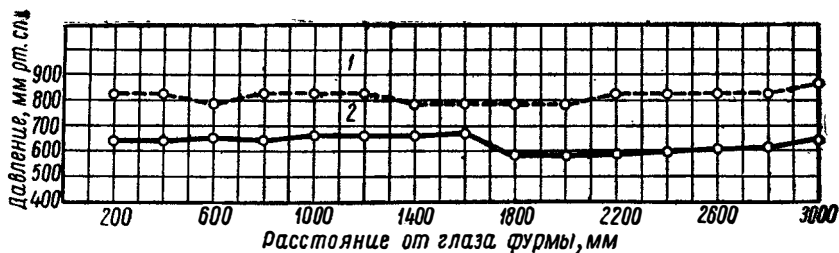


Рис. 116. Давление дутья (1) и противодействие газов в горне (2) при количестве дутья 2500 м³/мин.

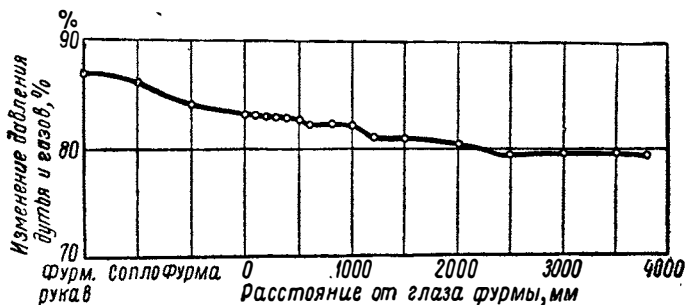


Рис. 117. Давление дутья в фурменном рукаве, в сопле и в фурме и противодействие газов в горне доменной печи № 3 Запорожстали (в процентах от давления дутья перед воздухонагревателями)

кокса, его крепости и отсутствия в нем мелочи (менее 40 мм в поперечнике).

На доменной печи № 1 Магнитогорского завода при подаче дутья в количестве 3400 м³/мин (печь работала с большими потерями дутья) падение давления от периферии до оси горна составляло 9% (при более слабом коксе).

При исследовании древесноугольной доменной печи Ашинского завода было установлено загромождение горна и образование в нем «мертвого столба» материалов. Состав газа (рис. 104) указывал на такое состояние.

Измерение противодавления горна подтвердило сделанный вывод. На рис. 118 приведены результаты измерения.

Пунктирная кривая выведена по средним данным в лучшие моменты работы печи и характеризует собой, при имевшемся загромождении горна, одно из лучших состояний его. Эти замеры производились в тот момент, когда вследствие перебоев в доставке и загрузке материалов печь шла без принудительных осадок и горн несколько расчищался. Как видно из рисунка, противодавление газов в горне от глаза фурмы до оси резко падает. Так, если у глаза фурмы противодавление равно 220 мм рт. ст., то у оси горна оно составляет 78 мм. Таким образом, в малой древесноугольной печи, имеющей радиус горна всего лишь 1,5 м, давление газа в горне падало от глаза фурмы до оси горна почти в три раза, тогда как в большой коксовой печи Запорожстали с радиусом горна 4,0 м давление газа в горне падало лишь на 3,7%.

Кривая противодавления, нанесенная сплошной линией на рис. 118, характеризует состояние горна при принятом на заводе методе ведения печи, когда каждая колоша сопровождалась искусственной осадкой. В этом случае давление газов в горне падает еще более резко. Если у глаза фурмы противодавление составляет 210 мм рт. ст., то на расстоянии 1100 мм оно доходит до 5 мм, что означает полную непроницаемость.

Пробникновение трубкой дальше этой точки, до оси горна, было связано с большими трудностями, и при вводе трубки чув-

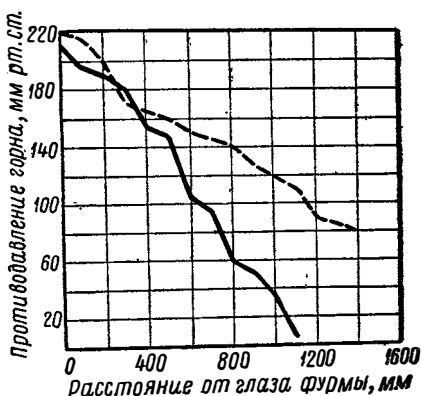


Рис. 118. Противодавление газов в горне древесноугольной доменной печи Ашинского завода.

ствовалось, что она с большим усилием проходит через какую-то вязкую массу.

У оси горна, в той области, где давление газов доходило до нуля, наблюдается совершенно изолированная от проникновения горновых газов зона, представляющая, вероятно, клейкую тестообразную массу, не пропускающую газов из окислительной области.

Приведенные примеры противодействия газов в горнах мощных коксовых доменных печей и малой древесноугольной печи показывают, сколь необоснован и ошибочен был вывод немецких и американских исследователей о том, что существование «мертвого столба» материалов связано с размерами горна доменной печи.

Исследования других мощных доменных печей, в частности исследования В. Т. Басова кузнечной доменной печи [81], Н. И. Красавцева и А. П. Любана макеевской доменной печи [79], А. П. Любана доменной печи № 3 Азовстали, дали аналогичные результаты противодействия газов в горне, свидетельствующие о хорошей проницаемости горна и нормальной работе его.

В заключение необходимо отметить, что противодействие горновых газов неодинаково по окружности горна, что было установлено Я. М. Гольмштоком при исследовании доменной печи № 1 Магнитогорского завода (как и другими исследователями других печей).

Я. М. Гольмшток измерял статическое давление в соплах одновременно на четырех фурмах, расположенных по окружности горна под углом 90° одна к другой. В результате измерений оказалось, что давление дутья на фурмах 11 и 15 (южная сторона печи) составляло 866,5 и 868,5 мм рт. ст., тогда как на фурмах 3 и 7 (северная сторона) оно равнялось 885,3 и 885,4 мм рт. ст. Тогда же исследованиями шахты печи была установлена большая проницаемость столба плавильных материалов с южной стороны печи вследствие недостаточно правильного распределения материалов на колошнике. Это и привело к тому, что в горне было разное противодействие.

Такую же зависимость распределения дутья по фурмам от распределения материалов на колошнике установили проф. А. Н. Похвиснев, С. К. Трекало и Г. А. Воловик при исследовании доменной печи № 1 Запорожстали [98]. По их подсчетам разность в количестве дутья, подаваемого через различные фурмы, доходила до одной четверти.

Специально проведенными исследованиями в 1938 г. на доменной печи № 3 Запорожстали проф. А. Н. Похвиснев и Г. А. Воловик также выявили неравномерность давления дутья и разное количество его на различных фурмах.

ТЕМПЕРАТУРА ГОРНА

Температура играет важную роль в ходе физико-химических превращений, происходящих в горне доменной печи. Тем не менее до сих пор температуры в этой области измерялись сравнительно мало. Объясняется это экспериментальными трудностями и отсутствием пирометров, пригодных для этих измерений.

Температуры чугуна и шлака при выпуске их и температуры у глаза фурм в конце прошлого столетия [99] и в текущем столетии [100] измерялись оптическим пирометром.

Температуру горна по радиусу и у глаза фурм определял в 1930 г. Рейнлендер [74]. Температуру горна по радиусу он измерял в двух доменных печах, в третьей только у оси горна. В первой исследованной печи с горном диаметром 3,9 м получены вполне удовлетворительные результаты. Температуры по радиусу горна были достаточно высокими — от 1750° у фокуса горения до 1425° у оси горна. Результаты измерений во второй печи с диаметром горна 5 м и довольно широкими фурмами (диаметром 240 мм) находились в резком противоречии с полученными на первой печи: температура у фокуса горения второй печи была, как и в первой, 1750° , но по направлению к оси горна резко упала до 1100° на расстоянии 1250 мм от глаза фурмы. От измерений температуры ближе к оси горна Рейнлендер воздержался, считая, что там господствуют еще более низкие температуры, для определения которых оптический пирометр не пригоден.

В третьей печи с горном диаметром 4,5 м исследователь измерил температуру у фурм и у оси горна и нашел, что на расстоянии 1500 мм от глаза фурмы температура горна понизилась до $1000\text{—}1100^{\circ}$; как и в предыдущем случае, он полагал, что у оси горна температура будет еще ниже, и дальнейших измерений не произвел.

Результаты измерений в последних двух печах привели Рейнлендера к следующему ошибочному выводу: так как первая печь с высокой температурой имела диаметр горна только 3,9, вторая 5,0 и третья 4,5 м, причем в обеих более широких печах установлены (только единичными измерениями) близ оси горна низкие температуры ($1000\text{—}1100^{\circ}$), то у всех печей, имеющих

диаметр горна 5 м и более, в центральной зоне образуется «мертвый столб» материалов.

Это мнение прочно укоренилось в технической литературе Германии, США и Англии. Только в последнее время в Англии и США появляется критика неправильных выводов, сделанных Рейнлендером. Можно указать, например, на статью Джемса Дейля [101], в которой он, основываясь на проведенных нами многократных измерениях температур горна по всему радиусу мощных доменных печей Магнитогорского и Запорожского заводов и соглашаясь с нашими выводами, критикует последователей теории существования «мертвого столба» материалов, считающих это явление неизбежным пороком всех больших доменных печей. Возможно, что в двух последних печах, исследованных Рейнлендером, вследствие загромождения горна, происшедшего в силу обстоятельств, не связанных с размерами печи, действительно имелись такие низкие температуры.

При исследовании доменной печи Ашинского завода [86], имевшей горн диаметром лишь 3 м, нами было установлено такое загромождение горна; температура у оси горна оказалась ниже 1300°.

Тщательный анализ применяемых Рейнлендером методов измерения температуры заставляет с большим сомнением отнестись к полученным им результатам. Он пользовался при измерениях оптическим пирометром, причем для измерений в точках, удаленных от глаза фурмы, пирометр визировался через трубу с водяным охлаждением. Кроме того, применялись железная штанга (0,1% С), термоэлемент, ардометр и отсасывающий пирометр.

Оптический пирометр замеряет температуру небольшой части поверхности материалов, что приближается, можно сказать, к одной точке. Перед фурмами могут оказаться куски кокса как ошлакованные, так и чистые (и поэтому различной яркости) и капли проходящих чугуна и шлака, а иногда и нерасплавленные куски сырых материалов; все они имеют различные температуры. Кроме того, показания пирометра искажаются пылью, газами, стеклами фурменных гляделок; точность этих показаний в значительной мере зависит от субъективных особенностей наблюдателей.

Применение ардометров, основанных на измерении интегрального лучеиспускания, устраняет субъективные ошибки наблюдателя, но также не дает правильных результатов, так как коэффициенты лучеиспускания различных кусков материалов перед фурмами точно неизвестны, а засорение стекол и пыль также искажают показания. Оптические и радиационные пирометры можно использовать, с учетом их недостатков, для измерения температуры только у глаз фурм.

Оптический пирометр, снабженный трубой с водяным охлаждением, дает возможность измерить температуру по радиусу горна, но полученные при этом результаты далеки от истинных, так как не только самый прибор, но и труба с водяным охлаждением и продувка воздухом искажают температуру горна, к тому же труба также визирует температуру только отдельных проходящих тел, но не газов.

Штанга с 0,1% С, которую применял Рейнлендер, предполагая, что она должна расплавиться при температурах около 1500°, в условиях горна доменной печи быстро оплавлялась после науглероживания, не достигая температуры плавления железа.

Термоэлемент в виде термопары, даже наилучший из существующих — платино-платинородиевый, чрезвычайно удобный, точный и надежный, к сожалению, пригоден для измерения температур не выше 1500—1550°. В условиях же горна доменной печи термопара должна быть защищена от механических повреждений и от науглероживания чехлом, представляющим железную трубку.

Но такая трубка быстро науглероживается и плавится при температурах ниже 1500°; поэтому и платино-платинородиевая термопара в горне доменной печи разрушается при температурах более низких, чем 1500°.

Отсасывающий пирометр очень громоздок и также не дает точных измерений; как бы ни была мала теплопроводность трубы, через которую отсасывается газ, его температура понижается, и термоэлемент не показывает действительной температуры газа в печи.

Принимая все это во внимание, результаты измерений Рейнлендера никак нельзя признать точными; так, например, при измерении оптическим пирометром с трубкой колебания температур в одной точке в течение 5 мин. достигали 300—350°, что можно объяснить только недостатками прибора. Измеренная температура колебалась у глаза фурмы от 1430 до 1790°, на расстоянии 250 мм — от 1600 до 1820°, на расстоянии 500 мм — от 1450 до 1760°.

Измерения ардометром перед глазом фурмы давали колебания от 1400 до 2000°. Даже по признанию самого Рейнлендера, приведенные им температуры горна по радиусу, вошедшие в учебники, являются не средними температурами (при таких колебаниях трудно было вывести среднее), а только однократно измеренными и казавшимися ему отвечающими действительности. Каковы же были истинные температуры горна при этих измерениях, неизвестно. В табл. 58 приведены температуры горна на уровне фурм по данным различных исследователей. Температуры эти далеки от истинных, как это будет дальше показано.

Таблица 58

Температура горна на уровне фурм (°С)

По Рейнлендеру			По Соколову			По Сорочкину		По Мак-Ки	
расстояние от глаза фурмы, мм	1-я печь, среднее	2-я печь, однократные измерения	расстояние от глаза фурмы, мм	среднее по доменной печи Кузнецкого завода	12/V 1935 г.	расстояние от глаза фурмы, мм	доменная печь № 3 завода Серова, 3 я ва. 3 я 19/VIII 1939 г.	расстояние от глаза фурмы, мм	как представляется Мак-Ки
0	1780	1720	1000	1525	—	100	1300	0	650
250	1790	1730	1300	—	1140	300	1300	500	1650
—	—	—	1350	1250	—	500	1300	1000	1320
500	1710	1750	1500	1253	—	700	1140	1500	1300
750	1660	1410	1550	—	1028	900	820	2000	1260
1000	1650	1210	1700	1450	—	1100	810	2900	1240
—	—	—	2000	1341	1125	1300	900		
1250	1590	1100	2250	1379	—	1500	980		
1500	1525	1100	2500	1300	—	1700	1200		
—	—	—	2700	1410	—				
1750	1425	1100	2750	1410	—				
			2800	1380	—				
			3000	1373	1290				
			3200	1340	—				
			3250	1370	1135				
			3420	1320	—				
			3500	1307	—				
			3560	—	1232				

И. А. Соколов [102], основываясь на измерениях температуры горна по радиусу платино-платинородиевой термопарой, пришел к выводу, что в доменной печи существует «полый тотерман» [103], расположенный между периферией и осью горна, вместо раннее им задицававшегося сплошного «тотермана».

Как видно из табл. 58, максимальная температура горна 1525° измерена И. А. Соколовым на расстоянии 100 мм от глаза фурмы. Затем к оси печи температура резко снижается до 1250°, потом повышается до 1450° и опять снижается до 1300°; дальше снова повышается до 1410° и снижается до 1307° у оси горна. Еще более разительные температуры приведены И. А. Соколовым по измерениям 12/V 1935 г., когда на расстоянии от глаза фурмы 1300 мм было только 1140°, 1550 мм — 1028°, 2000 мм — 1125°; к оси печи температура повысилась до 1290°, затем снизилась до 1135° и снова повысилась до 1232° у оси горна.

При температурах, которые приводит И. А. Соколов как

наиболее правдоподобные, от 1028 до 1290° чугуна и особенно шлак были бы в неподвижном состоянии.

Измерения температур искажались тем, что охлаждаемая водой труба вводилась в горн до оси и затем при обратном движении измерялась температура. Вполне понятно, что труба оставляла после себя более холодную среду. Температуру можно измерять только движением трубы от периферии к оси, но не обратно. Нами неоднократно было проверено, что разница в температурах при движении трубы от глаза фурмы к оси и обратно в одних и тех же точках часто достигает 100°, а иногда и больше.

В той же табл. 58 приведены температуры по В. А. Сорокину [104], измеренные им на доменной печи № 3 завода Серова. Эти температуры еще более фантастичны. Так, например, на расстоянии 100—500 мм от глаза фурмы температура показана неизменной — 1300°, что противоречит законам горения. На расстоянии 500 мм у него, по всей вероятности, фокус горения. Затем на расстоянии 900—1100 мм от глаза фурмы температура горна резко понизилась до 820—810° и к оси горна поднялась до 900°. В. А. Сорокин не указывает, каким прибором и каким образом он измерял столь низкие температуры. Можно лишь сказать, что при температурах, господствующих у него в горне за фокусом горения, чугун и шлак были безусловно в твердом состоянии и непонятно, как они выпускались из горна доменной печи. Непонятно также, как трубка продвигалась через твердую массу чугуна и шлака.

В табл. 58 приведены температуры горна, как они представляются Мак-Ки [93]: в фокусе горения на расстоянии 500 мм от глаза фурмы температура 1650°, на границе окислительной зоны на расстоянии 1500 мм — 1300° и дальше до оси горна понижается всего лишь на 60°. Такое представление о температурах (далекое от истины) создалось у Мак-Ки на основе неправильных измерений температур Рейнлендером и др.

Разбор температур по Рейнлендеру, И. А. Соколову, В. А. Сорокину и Мак-Ки приведен для того, чтобы показать, как, пользуясь непригодными приборами и методами измерений, можно придти к порочным выводам и как многие исследователи не критически относятся к полученным ими результатам.

Лабораторией имени акад. М. А. Павлова еще в 1935 г. была сконструирована графит-вольфрамовая термопара. Методы градуировки ее впоследствии были описаны Н. М. Якубцинером и М. М. Воровичем [105].

Из всех материалов, стойких при высоких температурах и пригодных для термопар, наиболее подходящим оказалось сочетание вольфрамовой проволоки с графитовым стержнем. Графитовый стержень является достаточно стойким против

разъедания его чугуном и шлаком и против воздействия окислительной атмосферы горна (кратковременного).

Кроме того, графит прекрасно обрабатывается и выдерживает резкие колебания температуры. Графит-вольфрамовая термопара дает высокую электродвижущую силу, позволяющую производить точные отсчеты. Сочетание всех этих свойств и определило выбор графит-вольфрамовой термопары как наиболее подходящей для измерения температур в горне доменной печи.

Максимальную температуру, определяемую этой термопарой, ограничивают свойства капилляров, изолирующих вольфрам от графита, материал которых выдерживает более низкую температуру, чем графит и вольфрам. Углерод имеет точку кипения около 3500°, вольфрам же плавится при температуре 3380°. Обычно применяемые фарфоровые капилляры, выдерживающие в полурасплавленном (тестообразном) состоянии температуру до 1800—1900°, оказались мало пригодными для измерения самых высоких температур. Цирконовые капилляры позволяют измерять температуры до 2300°. Если будет найден материал для капилляров, выдерживающий более высокую температуру, то тем самым повысится предел измеряемых температур. Наиболее существенным недостатком графитовых стержней является их малая прочность и поэтому быстрое разрушение передвигающимися материалами в горне доменной печи.

Несмотря на хрупкость графитовых стержней, проведенные нами в течение ряда лет этими термопарами многочисленные измерения температур горна мощных доменных печей Магнитогорского и Запорожского заводов показали полную их пригодность для этой цели. Необходимы лишь быстрота в измерениях и опыт в работе с ними.

Устройство графит-вольфрамовых термопар показано на на рис. 119 и 120, где термопара изображена в разобранном по составным частям и в собранном виде и в разрезе.

Для изготовления графитовых стержней были взяты графитовые электроды, применяемые в электросталеплавильном производстве, и из них были выточены стержни диаметром 16,3 и 23,5 мм и длиной 400 мм. При измерениях наиболее удобными оказались стержни диаметром 23,5 мм. Для увеличения прочности термопар желательно было бы увеличить диаметр трубок, охлаждаемых водой, до размеров, превосходящих 3 дюйма, но это привело бы к большому сокращению живого сечения фурмы и к затруднениям при вводе трубок в горн.

Графитовый электрод состоит из головки, ввинчивающейся в стержень, и из самого стержня, имеющего нарезку с передней части для головки и с задней для навинчивания специально изготовляемых металлических ниппелей. Внутри стержня по всей

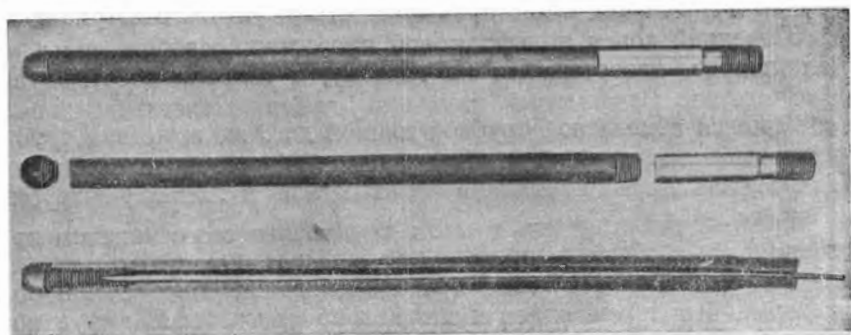


Рис. 119. Графит-вольфрамовая термопара в разобранном виде.

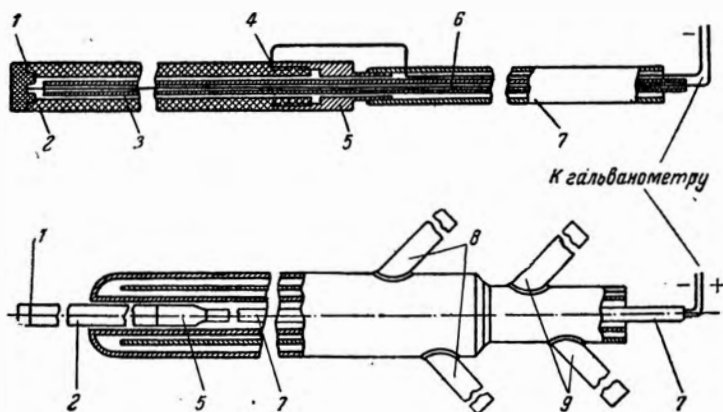


Рис. 120. Графит-вольфрамовая термопара для измерения температуры в горне:

1 — горячий спай; 2 — графитовый электрод; 3 — фарфоровый капилляр; 4 — место присоединения компенсационного провода; 5 — нипель; 6 — вольфрамовый провод; 7 — железная трубка; 8 — патрубки для отвода воды; 9 — патрубки для подвода воды

его длине просверливалось отверстие диаметром 3 мм, через которое протягивалась вольфрамовая проволока, служившая электродом, диаметром 0,35 мм, помещенная в фарфоровые капилляры, изолирующие проволоку от графитового стержня.

Передний конец вольфрамовой проволоки, освобожденный от капилляров, навертывался на головку, и головка ввертывалась в стержень. Графитовый стержень через железный нипель соединялся с железной трубкой длиной до 8 м; железная трубка навертывалась на нипель. Вольфрамовая проволока, помещенная в капилляры, проходила через нипель и железную трубку.

Графитовый стержень в месте соединения его с нипелем присоединялся к медному проводнику; за железной трубкой медный проводник и вольфрамовая проволока соединялись со шнуром, который был присоединен к специально подготовленному и градуированному гальванометру. Градуировка графит-вольфрамовых термопар производилась до температур 1500—1550° по платино-платинородиевым термопарам, а выше 1550° — при помощи оптического пирометра. В смонтированном виде (рис. 120) термопары помещались в описанные выше специально изготовленные охлаждаемые водой трубы.

При измерении температур, как это установлено предварительными испытаниями, высов термопары из охлаждающейся водой трубы необходимо держать строго постоянным при каждом измерении, так как при различном высове термопара будет показывать различную температуру; это же относится и к диаметру стержня. При одном и том же высове термопары, но при разных диаметрах стержня будут разные показания температуры; поэтому градуировка термопар должна быть тщательно проведена как при различном высове их из охлаждающейся водой трубы, так и при различных диаметрах стержней. В наших исследованиях был принят высов термопары в 100 мм.

Опытным путем было установлено, что при высове 75 мм и менее термопара показывала слишком низкие температуры (большое влияние охлаждаемой водой трубы), при высове же более 125 мм часто ломался графитовый стержень.

При измерении температур в окислительной зоне, естественно, должно было происходить частичное обгорание поверхности графитового стержня (выдвинутой части из трубы в печь). Испытания как целых, так и обгоревших графитовых стержней (одного диаметра и при одном и том же высове) показали столь незначительные расхождения, что практически ими можно пренебречь. Пока не произойдет разрушения горячего спая, термопара, как бы много она ни обгорела, будет достаточно правильно показывать температуру.

Неудобство термопар заключалось в том, что не всегда удавалось каждой термопарой измерить температуру горна, так как часто она разрушалась раньше, чем успевала показать температуру в данной точке горна. Разрушение термопар происходило преимущественно в момент высова их из охлаждающейся водой трубы. В тех случаях, когда в момент высова разрушения не происходило, термопара сохранялась сравнительно долго и была чрезвычайно чувствительной к колебаниям температуры, хотя и незначительным, но все время происходящим в горне. Эти колебания связаны с приходом новых материалов в горн, имеющих различную температуру, и с количеством горючего (в зоне горения), в большей или меньшей степени сгорающего в каждый отдельный момент.

В большинстве случаев (при ровном ходе печи) колебания температур были совершенно незначительными — порядка 20—30° в ту или иную сторону, и только иногда достигали 50°. Подсчеты брались по средним показаниям.

В охлаждающуюся водой трубу при вводе ее в горн вставлялась графитовая пробка с головкой, предохраняющая от заливания чугуном и шлаком внутреннее отверстие трубы, через которое выдвигалась термопара. После установки трубы в требуемом положении пробка осторожно выталкивалась графит-вольфрамовой термопарой, и последняя выдвигалась, как уже сказано, на 100 мм.

Во избежание поломки термопары при выдвигании ее из трубы, необходимо ввести трубу до намеченной точки, затем быстро отодвинуть ее на 100 мм назад и быстро выдвинуть вперед на 100 мм графит-вольфрамовую термопару. Быстрота необходима потому, что поломка термопар происходит преимущественно в момент выдвижения их из охлаждающейся водой трубы.

Правильность измерений достигается только при движении охлаждающейся водой трубы от периферии к оси; тогда холодная труба не влияет на окружающую среду и термопара показывает истинные температуры горна. Опытным путем установлено, что при движении трубы от оси к периферии как графит-вольфрамовая термопара, так и платино-платинородиевая, показывают температуру на 70—100° меньше действительной. В этом случае требуется длительная выдержка термопары для получения истинных показаний температуры газов. Лишь в окислительной области горна происходит быстрая ликвидация влияния охлаждающейся водой трубы при измерениях методом движения трубы от оси к периферии.

Измерения температуры в горне ниже 1500° производились одновременно в течение длительного периода как графит-вольфрамовыми, так и платино-платинородиевыми термопарами, при-

чем разница в их показаниях была совершенно незначительной: 15—20°. Это говорит о надежности графит-вольфрамовых термопар при измерении высоких температур.

Необходимо отметить, что графит-вольфрамовые термопары для измерения высоких температур в доменных печах впервые были использованы нами, и специально для этой цели была выработана описанная выше конструкция термопар. В сталеплавильном производстве такие термопары использовались ранее [106].

На рис. 121 приведены температуры для различных точек по радиусу горна доменной печи № 1 Магнитогорского завода по

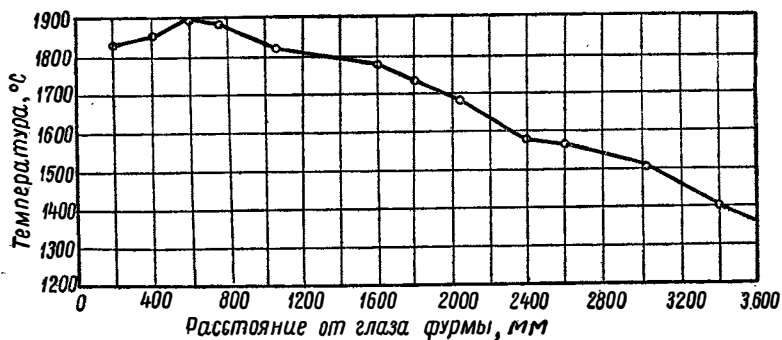


Рис. 121. Температура газов в горне доменной печи № 1 Магнитогорского завода

измерениям 1935 г. Эти температуры выведены по средним из ряда измерений, причем колебания по отдельным точкам были незначительными.

Кривая показывает равномерное падение температуры от периферии к оси горна. Максимальная температура горна 1900° наблюдается на расстоянии 600 мм от глаза фурмы и указывает положение фокуса горения с максимальным содержанием углекислоты (рис. 91). Ближе от фокуса к фурмам температура ниже, на расстоянии 400 мм от глаза фурм температура горна 1850° и на расстоянии 200 мм — 1830°. Непосредственно у глаза фурмы температура, очевидно, еще несколько ниже. Это объясняется влиянием дутья, температура которого была не выше 700°; по сравнению с зоной высоких температур (порядка 1800° и в фокусе до 1900°) нагретое дутье является, таким образом, более холодным. Воздух, входящий через фурмы под большим давлением (1,5—1,6 *ати*), первоначально, несомненно, понижает температуру горна; затем, вследствие развивающихся реакций образования углекислоты, связанных со значительным выделением тепла, температура на протяжении от фурм до фокуса горения быстро поднимается.

За фокусом горения по направлению к оси горна температура ниже, чем в фокусе, но все же остается довольно высокой на значительном протяжении. Так, температура выше 1800° сохраняется до 1350 мм, выше 1600° — до 2300 мм. Дальше идет плавное понижение температуры, доходящее у оси горна до 1390° .

Температура горна от периферии до оси на горизонте фурм, так же как состав газа и противодавление, подтверждает ранее сделанный вывод о том, что доменные печи с большим диаметром горна при сохранении нормальных условий (между прочим, количества дутья) работают вполне хорошо и какое-либо загромождение горна отсутствует.

Поток жидкого чугуна и шлака проходит как через периферийную часть горна, так и через осевую; свидетельством тому являются образцы чехлов платино-платинородиевых термопар. Как уже отмечалось выше, температура у оси горна измерялась как графит-вольфрамовыми, так и платино-платинородиевыми термопарами, последние для предохранения помещались в чехлы из обыкновенных железных трубок диаметром $\frac{1}{4}$ дюйма.

Термопара в чехле выдвигалась из охлаждаемой водой трубы на 150 мм, после чего стрелка гальванометра показывала быстрое нарастание температуры до некоторой величины и затем резко отклонялась в ту или иную сторону. Отклонение указывало на момент расплавления чехла и порчи термопары.

После осторожного извлечения термопары вместе с чехлом оказывалось, что конец железного чехла оплавлен и термопара испорчена. При этом во всех случаях, как это показано на рис. 122, выдвинутый из охлаждаемой водой трубы конец чехла термопары оплавлялся не весь одновременно, а только со стороны, обращенной вверх. Поток капель чугуна целиком разъедал в виде борозды чехол термопары, выдвинутый из трубы.

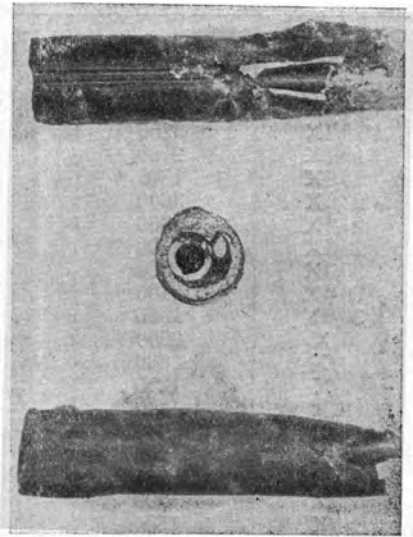


Рис. 122. Чехол платина-платинородиевой термопары после измерения температуры у оси горна.

На чехле после демонтажа термомпары были видны капли чугуна и шлака как на стороне, обращенной при измерении температуры кверху (слева на рис. 122), так и на стороне, обращенной книзу (справа). Все это с полной убедительностью доказывает, что поток жидкого чугуна и шлака имеется по всему сечению горна; количество жидких материалов, стекающих в центральной части горна, конечно, меньше, чем на периферии.

В табл. 59 и на рис. 123 приведены результаты измерений температуры горна на той же доменной печи в 1936 г.

Таблица 59

Температура горна доменной печи № 1 Магнитогорского завода

Дата	Расстояние от глаза фурмы мм	Температура °С	Средняя температура в 1936 г.	
			расстояние от глаза фурмы мм	средняя температура, °С
1936 г.				
10/IX	3250	1280	200	1830
10/IX	3250	1300	400	1850
10/IX	2100	1475	600	1900
10/IX	1300	1800	800	1875
23/IX	3600	1280	1000	1835
26/IX	3300	1320	1100	1825
28/IX	2600	1500	1200	1815
30/IX	2600	1350	1300	1800
30/IX	2100	1425	1400	1790
30/IX	1600	1600	1600	1775
1/X	2000	1480	1800	1735
1/X	1800	1480	2000	1690
1/X	1250	1700	2100	1635
2/X	1400	1700	2300	1600
4/X	900	1675	2400	1580
4/X	900	1700	2600	1560
10/X	1000	1680	2800	1540
13/X	600	1880	3000	1525
16/X	1500	1780	3200	1475
17/X	600	1870	3400	1410
17/X	1000	1780	3600	1390
18/X	1800	1600		
18/X	2000	1430		
18/X	1000	1820		
19/X	500	1870		
19/X	3000	1525		
19/X	2500	1675		

Ухудшение в состоянии и работе печи, вследствие износа кладки и понижения качества кокса, вызвавшего ход печи с подвисаниями и осадками, отразилось на состоянии горна.

По сравнению с предыдущим годом температура горна по всему сечению снизилась. Снижение у оси горна произошло на

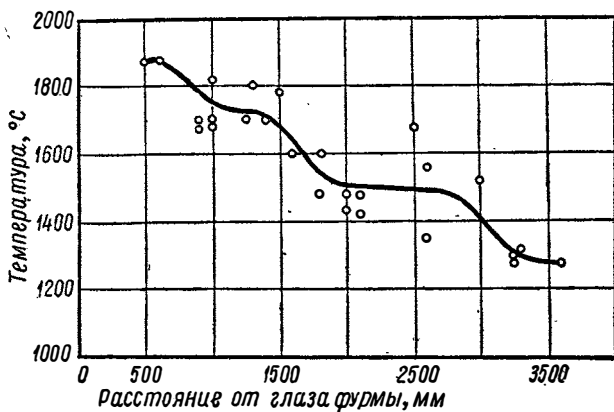


Рис. 123. Температура газов в горне.

110° (1280 вместо 1390°). От оси к фурме кривая изменения температуры горна характеризуется резкими скачками на небольших участках и почти одинаковой температурой на значительных участках (до одного метра).

Так, например, от оси горна к периферии на расстоянии 300 мм почти не происходит изменения температуры, затем на небольшом участке в 450 мм температура резко возрастает с 1300 до 1480°; дальше к фурме, на расстоянии 800 мм, температура изменяется всего лишь на 40°, после чего происходит снова резкое увеличение на 200°, затем снова замедление.

Почти одинаковой температура остается лишь в фокусе горения (1900° в 1935 г. и 1880° в 1936 г.).

Скачкообразное изменение температуры по радиусу горна является следствием неравномерной работы, связанной с ходом печи осадками. Все же температура по всему сечению горна остается достаточно высокой для того, чтобы протекали реакции восстановления и чугуна и шлак были в жидком состоянии.

На рис. 124 приведены результаты измерения температуры горна на той же доменной печи в 1937 г. в сопоставлении с результатами измерений предыдущих лет. В 1937 г. измерения были проведены лишь на расстоянии 1000—2500 мм от глаза фурмы.

Как видно из рис. 124, кривая изменения температуры лежит в пределах, определенных в 1935—1936 гг. Температура горна в 1937 г. во всех исследованных точках была значительно выше, чем в 1936 г. Это объясняется тем, что в 1937 г. исследования

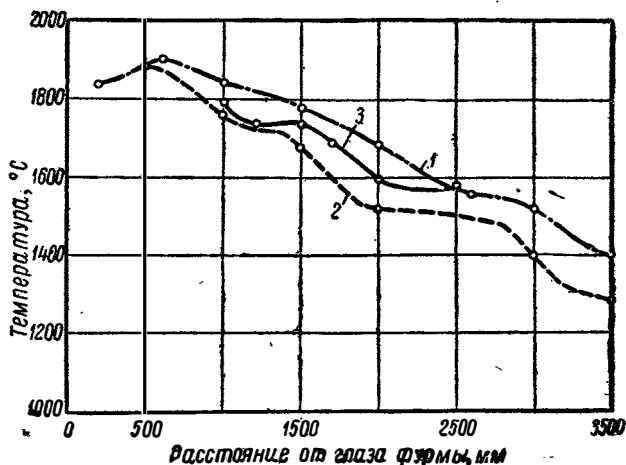


Рис. 124. Температура газов в горне доменной печи № 1 Магнитогорского завода:

1 — измерения 1935 г.; 2 — 1936 г.; 3 — 1937 г.

проводились непосредственно после задувки печи, тогда как в 1936 г. — перед выдувкой печи. Различное состояние профиля отражалось на ходе доменной печи и состоянии горна.

Измерения температуры за трехлетний период показали, что средняя температура горна в различных точках по радиусу мощной доменной печи свидетельствует о нормальной работе горна по всему сечению и отсутствии какого-либо «мертвого столба» материалов.

На рис. 125 приведена кривая средних температур от глаза фурм до оси горна в доменной печи № 3 Запорожстали по измерениям 1938 г.

Измерения велись нами у оси горна вначале платино-платинородиевой, затем графит-вольфрамовой термопарой; для проверки надежности показаний последней производились попеременные измерения обеими термопарами. Получалось почти полное совпадение, — разница не превышала 10—15°. В остальных точках по радиусу измерения велись графит-вольфрамовой термопарой; результаты всех измерений приведены в табл. 60.

Максимальная температура 1900° в фокусе горения оказалась на расстоянии 600 мм от глаза фурмы. По направлению к фурме температура несколько снизилась (до 1820° на расстоя-

нии 100 мм). К оси горна от фокуса горения идет плавное, закономерное уменьшение температуры без резких скачков. Средняя температура у оси горна 1370°.

Для сравнения на рис. 126 приведены кривые температур

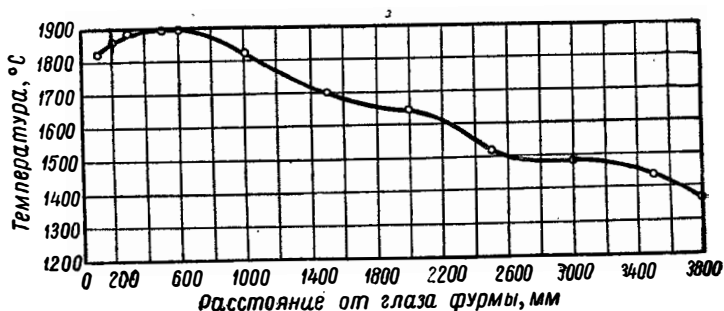


Рис. 125. Температура газов в горне доменной печи № 3 Запорожстали.

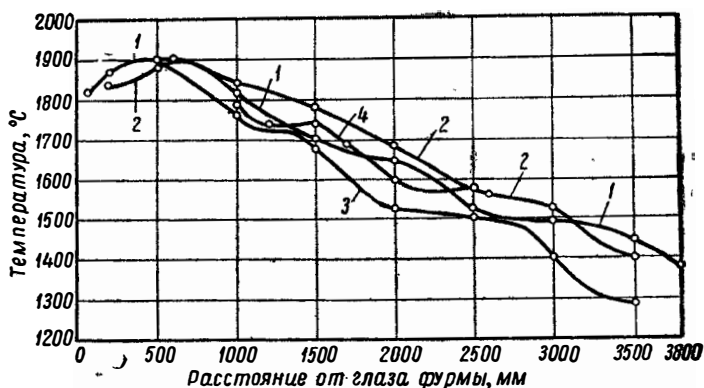


Рис. 126. Температура газов в горне мощных доменных печей:

1 — печь № 3 Запорожстали; 2 — печь № 1 Магнитогорского завода в 1935 г.; 3 — та же печь в 1936 г.; 4 — та же печь в 1937 г.

в горне доменных печей Магнитогорского и Запорожского заводов по измерениям 1935—1938 гг.

Из сопоставления их видно, что для фокуса горения получается полное совпадение температур, а за ним по направлению к оси горна обнаруживается незначительная разница. Более низкая температура на этом участке в доменной печи № 3 Запорожстали объясняется тем, что печь работала с неполным дутьем; при диаметре горна, большем на 0,38 м, количество

дутья было несколько меньше, чем у магнитогорской печи. Кроме того, запорожская, печь работала на более легкоплавких шлаках, чем магнитогорская.

Таблица 60

Температура по радиусу горна

Расстояние от глаза фурмы, мм	Температура, °С	Средняя температура, °С
100	1830; 1810	1820
200	1860	1860
300	1890; 1880	1885
500	1890; 1880; 1900	1890
600	1920; 1900; 1900; 1890; 1900	1900
1000	1860; 1740; 1840; 1790; 1870	1820
1400	1700	1700
1500	1710; 1720; 1690; 1670; 1680	1695
2000	1710; 1660; 1670; 1640; 1580; 1660; 1595	1645
2500	1550; 1540; 1500; 1530	1530
3000	1500; 1455; 1475; 1460; 1550; 1425	1480
3500	1490; 1440; 1460; 1410; 1400	1440
3800	1390; 1410; 1380; 1350; 1410; 1400; 1360; 1380; 1340; 1320; 1330; 1360; 1370; 1350; 1370; 1400; 1390; 1335	1370

Можно считать, что в больших доменных печах температура по радиусу горна будет примерно одинаковой при работе на один и тот же чугуи.

Кривые, приведенные на рис. 126, с полной убедительностью доказывают, что в любой точке горна температура достаточна для того, чтобы материалы находились в жидком состоянии и чтобы быстро шли процессы взаимодействия чугуна со шлаком. Таким образом, температура горна в исследованных больших мощных доменных печах, так же как состав газа и противодавление горна, доказывает порочность немецкой и американской теории о неизбежном существовании «мертвого столба» материалов в горне мощных доменных печей.

Что это именно так, показывают также и кривые рис. 127, представляющие результаты одновременных замеров температуры у оси горна и температуры чугуна и шлака, выпускаемых из доменной печи № 3 Запорожстали.

Для сравнения приведены девять измерений, и их вполне достаточно, чтобы избежать случайных выводов. Температура у оси горна во всех случаях выше температуры выпускаемого чугуна и очень близка к температуре шлака.

Выпускаемые чугуны и шлаки были нормальными для принятого на заводе режима плавки, что видно из

табл. 61, в которой даны температуры, послужившие для составления кривых на рис. 127; указаны дни и часы измерений и приведены анализы чугунов и шлаков.

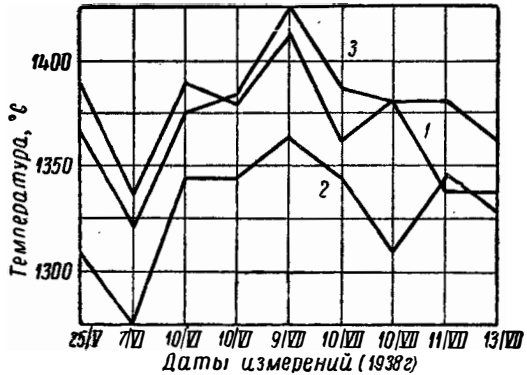


Рис. 127. Результаты одновременных измерений температуры:

1 — газов у оси горна; 2 — чугуна; 3 — шлака

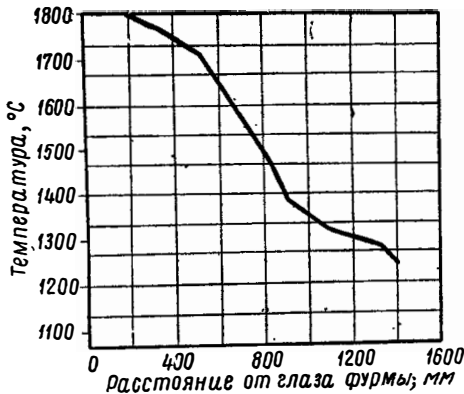


Рис. 128. Температура газов в горне древесноугольной доменной печи Ашинского завода.

убедительностью было доказано составом газа (рис. 104) и противодействием газов в горне (рис. 118). Измерения температуры горна по радиусу подтвердили загромождение горна.

На рис. 128 приведена кривая изменения температуры на уровне фурм в различных точках по радиусу горна доменной

Температуры чугуна и шлака, выпускавшихся из доменной печи, измерены Н. М. Якубцинером, сконструировавшим удобный для таких измерений пирометр [107].

Ранее отмечалось, что при исследовании древесноугольной доменной печи № 2 Ашинского завода имело место загромождение горна. Это с полной

Таблица 61

Состав чугуна и шлака

Дата и время измерений час.—мин.	Температура у оси горна °C	Температура чугуна при выпуске °C	Температура на из шлака из новой легки °C	Состав чугуна, %			Состав шлака, %									
				Si	Mn	S	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO	S			
25/V, 14—00	1390	1310	1365	0,58	2,26	0,093	37,00	40,10	—	—	—	—	—	—	—	—
7/VI, 16—45	1335	1275	1320	0,33	1,54	0,104	38,80	38,73	—	—	—	—	—	—	—	—
10/VI, 11—00	1390	1345	1375	0,73	2,61	0,077	39,30	39,81	13,89	—	—	—	—	—	—	—
10/VI, 13—30	1380	1345	1385	0,74	2,60	0,075	38,80	38,50	13,68	—	—	—	—	—	—	—
9/VII, 14—00	1410	1365	1425	0,95	4,04	0,053	36,10	43,08	—	—	—	—	—	—	—	—
10/VII, 13—00	1360	1345	1385	0,75	3,04	0,048	36,20	40,96	—	—	—	—	—	—	—	—
10/VII, 15—00	1380	1310	1380	0,70	2,87	0,087	36,20	40,96	—	—	—	—	—	—	—	—
11/VII, 12—00	1340	1345	1380	0,70	2,78	0,090	36,40	40,47	—	—	—	—	—	—	—	—
13/VII, 16—30	1340	1330	1360	0,51	2,60	0,063	36,60	40,27	—	—	—	—	—	—	—	—

печи № 2 Ашинского завода. Как видно из рисунка, максимальная температура у оси горна достигает лишь 1250°, тогда как в больших коксовых печах она значительно выше (1390°). Казалось бы, что при малом диаметре горна у оси его температура должна быть более высокой. Очевидно, если бы древесноугольная печь работала нормально и горн не был загроможден, то у оси его температура была бы значительно выше, чем это было в период исследований.

От области низких температур у оси горна температура довольно медленно повышается по направлению к периферии, и только на расстоянии 900 мм от глаза фурмы начинает повышаться резко (с 1390°). Очевидно, здесь кончается недействительная зона, и вследствие этого происходит резкое возрастание температуры, поднимающейся на небольшом участке в 400 мм и 1390 до 1720°. Максимальная температура в 1800° (на расстоянии 200 мм от глаза фурмы) характеризует собой фокус горения.

Необходимо отметить, что фокус горения в данном случае не совпадает с максимальным содержанием углекислоты в газе, которое было на расстоянии 350 мм от глаза фурмы. Такое несовпадение объясняется ненормальной работой печи, когда горн работал только по периферии и область высоких температур была расположена к фурмам ближе, чем это было бы при нормальной работе горна. В данном случае, очевидно, дутье попадало в чугун подобно тому, как это имеет место в процессе малого бессемерования, и температура повышалась не только за счет сгорания углерода горючего в углекислоту, но и за счет сгорания кремния, марганца и железа в значительной степени вблизи фурм; вследствие этого область высоких температур и приближена к периферии.

В 1949 г. А. П. Любан измерял графит-вольфрамовыми термопарами температуры горна по радиусу его на уровне фурм в доменной печи № 2 Косогорского завода при работе ее на ферромарганец [108] и ферросилиций [109].

Для проверки стойкости графит-вольфрамовой термопары в доменной печи Магнитогорского металлургического комбината в декабре 1946 г. были произведены измерения температуры по радиусу горна при содержании кислорода в дутье до 33,6%; для сравнения в те же дни измерялась температура и при обычном дутье. При промежуточных концентрациях кислорода температура тоже измерялась, но лишь в отдельных точках горна.

На рис. 129 показан графитовый стержень до и после измерения им температуры и демонтажа термопары; нижний стержень

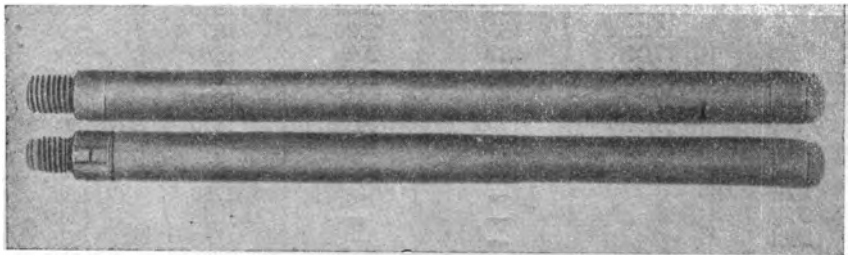


Рис. 129. Графитовый стержень до и после измерения температуры.

жень несколько обгорел, но имел нормальную длину 400 мм; конец, где завинчивалась графитовая головка, сохранился. Термопара давала надежные показания. В других случаях стержни передвигающимися материалами были обломаны на различных расстояниях от конца охлаждаемой водой трубки. Вследствие

хрупкости графитовых стержней производить измерения такими термопарами в окислительной зоне трудно, так как в ней происходит наибольшее передвижение материалов. Такие измерения требуют много времени и большого опыта. Однако до подыскания более совершенной, графит-вольфрамовая термопара может служить для измерения температуры и при дутье, обогащенном кислородом.

На рис. 130 и 131 и в табл. 62 приведены температуры окислительной зоны при обычном атмосферном дутье и при содержании в нем 33,6% O_2 ; для сравнения даны также результаты измерений на доменных печах № 1 Магнитогорского завода и № 3 Запорожстали.

Таблица 62

Температура горна по радиусу на уровне фурм ($^{\circ}C$)

Расстояние от глаза фурмы, мм	Печь Магнитогорского завода (1946 г.)			Печь № 1 Магнитогорского завода (1935 г.)	Печь № 3 Запорожстали (1938 г.)
	дата измерений	дутье с 21% O_2	дутье с 33,6% O_2	обычное дутье	
100	5/XII	1720	1900	—	1820
200	7/XII	1800	2000	1830	1850
250	9/XII	1820	2040	1830	1860
300	10/XII	1840	2030	1840	1870
350	15/XII	1850	2030	1840	1880
400	15/XII	1880	2020	1850	1890
500	17/XII	1870	2020	1880	1890
600	17/XII	1820	2000	1900	1900
700	17/XII	1800	1950	1880	1890
800	17/XII	1790	1930	1870	1880
900	17/XII	1770	1880	1870	1850
1000	17/XII	1750	1830	1850	1820
1500	—	—	—	1780	1695
2000	—	—	—	1695	1645
2500	—	—	—	1580	1530
3000	—	—	—	1515	1480
3500	—	—	—	1400	1440
3600	—	—	—	1390	—
3800	—	—	—	—	1370

Температура в фокусе горения, достигавшая при обычном дутье 1880° , повысилась при содержании в нем 33,6% O_2 до 2040° , т. е. на 160° . В конце окислительной зоны на расстоянии

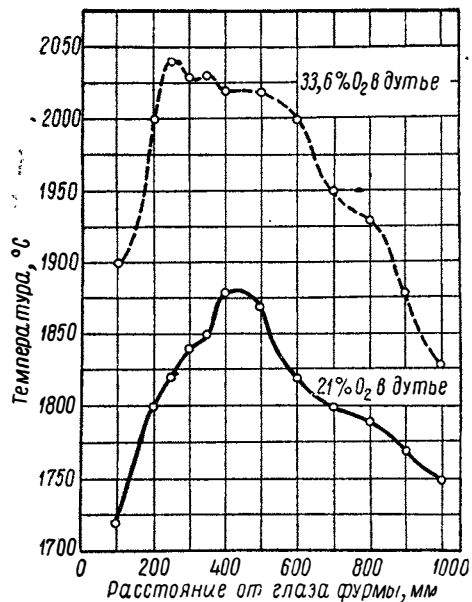


Рис. 130. Температуры в окислительной зоне горна при атмосферном и обогащенном кислородном дутье.

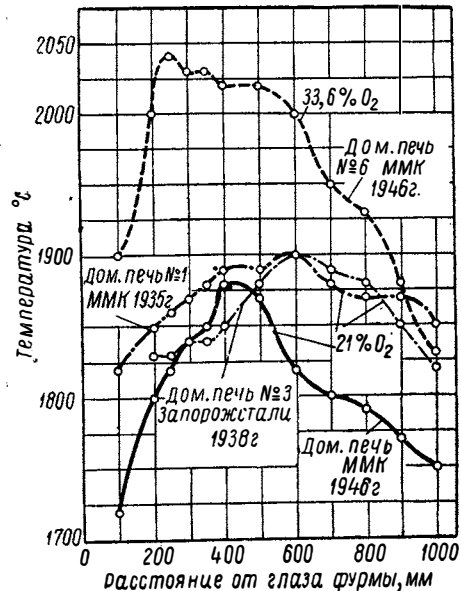


Рис. 131. Температуры в окислительной зоне горна доменных печей Магнитогорского и Запорожского заводов.

1000 мм от глаза фурмы температура была соответственно 1750 и 1830°, что дает разницу только в 80°. Произойдет ли дальнейшее сближение температур по направлению к оси горна, сказать трудно; это будет зависеть не только от температуры, развиваемой в фокусе горения, но и от количества газов, которые будут переносить тепло из зоны горения к оси горна.

В фокусе горения разница температур между обычным дутьем и дутьем с 33,6% O_2 составляет 160°, т. е. на 1% O_2 в дутье сверх обычного температура повышается в среднем на 13°.

При промежуточных содержаниях кислорода в дутье (между 21 и 33,6%) измерялась температура в фокусе горения, положение которого определялось по составу газа; при этом оказалось, что с повышением концентрации кислорода в дутье рост температур, по мере приближения к предельным, замедляется (табл. 63).

Таблица 63

**Температура в фокусе горения
при различных концентрациях
кислорода в дутье**

Содержание O_2 в дутье %	Температура фокуса го- рения, °C	Повышение температуры на 1% O_2 °C
21,0	1850	0
25,4	1920	9
28,0	2000	17
31,0	2020	14
33,6	2040	12,7

Заметная разница температур за фокусом горения (рис. 131) при обычном дутье по исследованиям 1935 и 1938 гг. и 1946 г. объясняется тем, что через фурму № 7 в 1946 г., как уже указывалось, преднамеренно подавалось дутья в $2\frac{1}{4}$ раза меньше по сравнению с остальными фурмами.

Меньшее количество образовавшихся газов переносило из области максимальных температур меньше тепла, следовательно, падение температуры по радиусу горна было более быстрым. Во всех случаях, как видно, температура на дутье, обогащенном кислородом, значительно выше, чем на обычном.

ОКИСЛЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

П. Гладкий в 1890 г. [110] высказал предположение об окислении дутьем элементов чугуна в горне доменной печи. В 1892 г. Фан-Флотен [71] нашёл по отношению кислорода к азоту, что в зоне горения кислорода нехватает, а в межфурменной зоне имеется избыток окиси углерода (против теоретического). Вдуваемый воздух содержит 26,5 объема кислорода на 100 объемов азота; в газах же окислительной зоны было по объему кислорода 20,4—24,8 м³ на 100 м³ азота, а за пределами окислительной зоны количество кислорода доходило до 34,3—34,7 и даже до 42,1 м³ на 100 м³ азота. Таким образом, было установлено окисление кислородом дутья кремния, марганца и железа чугуна.

Белл [111] указал на различный состав чугуна и шлака, проходящих в горне на горизонте фурм и выпускаемых из доменной печи. Он установил, что шлак в окислительной области горна более железистый, чем конечный шлак. Чугун у фурм содержит меньше углерода и кремния, чем при выпуске, фосфора почти столько же, а серы несколько больше; последняя удалялась ниже горизонта фурм при взаимодействии чугуна со шлаком. Вюст, посвятивший ряд работ [112] вопросу окисления кислородом дутья элементов чугуна у фурм, подтверждая образование железистых шлаков при прохождении чугуна через окислительную область, впал в ошибку, утверждая, что до 15% кислорода дутья идет на окисление элементов чугуна, за что подвергся длительной и справедливой критике со стороны ряда исследователей доменного процесса и, особенно, академика М. А. Павлова.

Кини, Ройстер и Джозеф [113] в 1926 г. при исследовании 300-тонной печи в Алабаме, выплавлявшей литейный чугун из красного и бурого железняков и агломерированных пиритных огарков, определили изменение содержания углерода, кремния, марганца, серы и фосфора в чугуне от распара до выпуска. В распаре чугун содержал более 1,2% С, около 0,4% Si, 0,2% Mn, 0,3% P и много серы — около 0,8%. До горизонта фурм содержание примесей в чугуне, за исключением фосфора, резко увеличилось: углерода до 3,7%, кремния до 3,0%, марганца до 1,0%, серы до 1,8%. Ниже плоскости фурм содержание углерода

и кремния оставалось почти неизменным; резко убывали марганец и сера.

Авторы совершили ошибку, приведя средний состав чугуна на горизонте фурм без подразделения на чугун из окислительной и восстановительной зон. Безусловно, чугун в этих зонах резко различен по своему составу. Средние же цифры не дают истинного представления о процессах, протекающих на горизонте фурм под воздействием окислительной атмосферы и о действительном составе чугуна отдельно в окислительной и восстановительной зонах.

Банзен [114] произвел исследования доменной печи, выплавлявшей томасовский чугун. Он брал пробы материалов в заплечиках (через вспомогательные фурмы, расположенные выше главных фурм на 2050 мм), на горизонте главных фурм и через шлаковую летку. Пробы брались при помощи охлаждаемой водой трубы, имевшей на наружной поверхности продольный желобок с перегородками.

Выше уже отмечалось, что взятие проб таким методом не гарантирует от попадания материалов из других мест при обратном движении трубы. Пробы из главной фурмы Банзен брал при работающей фурме, при закрытой фурме и при закрытых соседних. Из микрофотографий проб видно, что чугун загрязнен неметаллическими включениями.

Результаты исследований показали, что содержание углерода в чугуне увеличивается от вспомогательных фурм до шлаковой летки (с 1,32 до 4,06%), затем при выпуске несколько снижается (до 3,64%). Содержание кремния в заплечиках довольно высокое (1,86%), в окислительной зоне снижается до 1,33%, затем до шлаковой летки увеличивается до 2,05% и резко снижается при выпуске до 0,45% за счет реакций взаимодействия кремния чугуна с железистыми шлаками.

Содержание марганца в чугуне увеличивается от вспомогательных фурм до выпуска (от 0,66 до 1,58%); таким образом, получается, что марганец не окисляется на фурмах и не участвует в реакциях, протекающих между жидким чугуном и шлаком ниже горизонта фурм, что противоречит другим исследованиям в этой области. Содержание фосфора в чугуне непрерывно увеличивается от заплечиков до выпуска с 0,58 до 1,80%.

Эйхенберг [115] исследовал доменную печь, выплавляющую литейный чугун из руд минетт. Пробы материалов он брал тоже при помощи трубы с желобком и поэтому получил ту же погрешность. Он определил относительное количество чугуна и шлака, проходящих по радиусу горна на горизонте фурм, и установил, что наибольшее количество жидких материалов проходит через окислительную зону и небольшое — у оси горна. Углерод, кремний и марганец выгорают в значительной части вблизи

фокуса горения; ближе к оси горна содержание их в чугуна увеличивается и несколько падает у самой оси. Шлак в окислительной зоне сильно железистый, за пределами же ее светлый, с малым содержанием закиси железа.

Более полные исследования процесса окисления элементов чугуна на горизонте фурм были проведены Мундом, Штеккером и Эйлендером [116] на доменной печи объемом 575 м³ и диаметром горна 3,9 м. Печь выплавляла томасовский и литейный чугуны из шихты, в которую входило до 50% агломерата. Исследователи применили совершенно иной, чем Банзен и Эйхенберг, метод забора проб материалов. Охлаждаемая водой труба с лодочкой внутри, описанная выше (рис. 89), полностью гарантировала от попадания материалов из другой области горна. Пробы материалов брались через вспомогательную фурму, главную фурму и шлаковую летку. Часть пробы взята при работающей главной фурме и часть проб — при закрытой.

Исследования проводились с целью определить состав и количество чугуна и шлака, проходящих через горн на горизонте фурм в отдельных точках по радиусу, и показали, что в окислительной зоне горна происходит интенсивное выгорание углерода, кремния, марганца и железа чугуна с образованием железистых шлаков.

При работе на томасовский чугун содержание углерода в заплечиках (вспомогательная фурма) достигало 3—4%, при 4% его в конечном чугуна. На горизонте фурм под действием окислительной атмосферы углерод в чугуна интенсивно выгорал и содержание его на различном расстоянии по радиусу горна снизилось до 1—1,5%; за пределами окислительной зоны, а также при закрытой фурме в окислительной зоне содержание углерода сохранялось 3—4%. На уровне шлаковой летки углерода в чугуна было почти столько же, сколько и при выпуске.

Таким образом, исследованиями установлено, что науглероживание чугуна довольно интенсивно протекает в заплечиках; на горизонте фурм под действием свободного кислорода углерод резко выгорает; ниже уровня фурм процесс повторного науглероживания протекает настолько быстро, что на уровне шлаковой летки содержание углерода в чугуна почти то же, что и при выпуске.

Содержание марганца в чугуна изменяется аналогично углероду; при закрытой вспомогательной фурме оно достигает 2—3%, при 3,5% в выпускаемом чугуна. При работающей главной фурме марганец выгорает настолько интенсивно, что содержание его в чугуна падает в окислительной зоне до 0,1—0,2%, за пределами же ее сохраняется около 3%. При закрытой главной фурме содержание марганца изменяется от 1,5% (200 мм

от глаза фурмы) до 5,3% (1000 мм от глаза фурмы). На уровне шлаковой летки количество марганца в чугуна резко возрастает по направлению от периферии к оси горна — от 2% на периферии до 7—8% у оси.

Из изложенного следует, что восстановление марганца и переход его в чугун совершается в заметных количествах (до 2—3%) в заплечиках; этот процесс протекает интенсивно до горизонта фурм, где под действием окислительной атмосферы марганец резко выгорает; затем он весьма быстро восстанавливается между горизонтами фурм и шлаковой летки.

Содержание кремния в чугуна в заплечиках — 0,2—0,6%, в зависимости от расстояния по радиусу, меньше у периферии и больше к оси, при 0,75% в выпускаемом чугуна. На горизонте фурм в окислительной зоне кремний выгорает почти полностью; ниже он интенсивно восстанавливается твердым углеродом, и на уровне шлаковой летки содержание его в чугуна над окислительной зоной в среднем составляет 0,2% и над восстановительной зоной до 1%. Таким образом, кремний восстанавливается выше и ниже фурм; в окислительной же зоне выгорание кремния происходит аналогично выгоранию углерода и марганца, с той лишь разницей, что процесс этот развит слабее при томасовском чугуна, вследствие низкой концентрации в нем кремния. На горизонт фурм чугуна приходит с содержанием серы, значительно превышающим содержание ее в конечном чугуна; процесс обессеривания происходит ниже горизонта фурм при взаимодействии со шлаком, свободным от окислов железа, что наиболее убедительно доказывается изменением состава шлака по мере передвигания его от заплечиков до лещади.

Кривые изменения содержания закиси железа в шлаке показывают, что при закрытой главной фурме количество ее на горизонте фурм составляет около 13—14%; при действующей же главной фурме в окислительной области содержание закиси железа в шлаке резко увеличивается, причем процесс окисления железа протекает в различных точках по радиусу по-разному. Ближе к фурмам содержание закиси железа в шлаке достигает 47—48% (100—400 мм от фурм); по мере уменьшения свободного кислорода в газе содержание ее резко уменьшается и на расстоянии 1000 мм от глаза фурмы доходит до 13—14%. На уровне шлаковой летки содержание закиси железа сохраняется в пределах 10—14%; ниже, на лещади горна при взаимодействии с твердым углеродом закись железа настолько интенсивно восстанавливается, что при выпуске содержание ее составляет меньше 0,5%. Поток жидких материалов по сечению горна резко различен; у периферии он в 5—6 раз больше, чем у оси, что обусловлено преимущественным движением материалов именно у периферии.

Исследования, проведенные при работе той же доменной печи на литейный чугун, показали, что так же, как и при томасовском чугуне, на горизонте фурм под действием окислительной атмосферы происходит интенсивное выгорание кремния, марганца и железа и частичное — углерода и фосфора чугуна. Выгорание ближе к фурмам, в связи с большей концентрацией свободного кислорода в газе, протекает более энергично, дальше к оси — менее энергично. Наблюдавшийся состав шлака на горизонте фурм и при выпуске подтверждает образование железистых шлаков, большее у периферии и меньшее у оси, и интенсивное восстановление закиси железа ниже горизонта фурм. Содержание серы в чугуне и шлаке находится в зависимости от содержания закиси железа и извести в шлаке: чем меньше закиси железа и больше извести, тем больше обессеривающая способность шлаков.

Л. М. Цылев при исследовании доменной печи № 1 Ново-Липецкого завода [80], выплавлявшей литейный чугун, установил, что в окислительной зоне на горизонте фурм образуется сильножелезистый шлак (до 36% FeO), за пределами ее шлак менее железистый, но все же содержание закиси железа на расстоянии 2900 мм от глаза фурмы составляет больше 9%, при 1,2% в выпускаемом из печи.

Выгорание марганца, железа, фосфора и особенно углерода происходит на горизонте фурм под действием окислительной атмосферы, ближе к фурмам — в большей мере, дальше к оси — меньше. При этом исследовании наблюдалось высокое содержание кремния в чугуне на горизонте фурм, наибольшее у фурм (7,91%), минимальное на границе окислительной зоны (3,60%) и довольно высокое у оси (5,60%), при 3,70% в выпускаемом из печи. В какой степени окислялся кремний чугуна в окислительной зоне, трудно сказать; ответ на этот вопрос можно было получить, лишь взяв пробы чугуна выше горизонта фурм.

Содержание серы в чугуне во всех точках по радиусу несколько выше, чем при выпуске. Кремний ниже фурм удаляется из чугуна при взаимодействии с железистым шлаком.

Д. С. Хорунов и А. П. Афанасьев [82] при исследовании доменной печи Кузнецкого завода, выплавлявшей литейный чугун, также установили, что кремния в чугуне на горизонте фурм содержится больше, чем при выпуске.

И. А. Соколов и Н. Н. Круглов [83] при исследовании древесноугольной доменной печи Ашинского завода констатировали высокое содержание закиси железа в окислительной зоне (до 28% на расстоянии 400 мм от глаза фурмы) и низкое за пределами ее, особенно у оси горна (4%). Они определяли количество проходящих жидких материалов в различных точках по радиусу горна в плоскости фурм; при этом оказалось, что почти

весь чугун и шлак проходят только в зоне горения и в ничтожном количестве у оси.

Н. И. Красавцев и А. П. Любан [79] исследовали горн доменной печи № 1 Макеевского завода при работе на мартеновский чугун. Пробы шлака из окислительной области горна были темного цвета, с большим содержанием закиси железа, тогда как из восстановительной области шлаки были большей частью светлые, зеленого цвета, такого же вида, как и шлаки, выпускаемые из печи, и только часть проб была черного цвета. Состав проб шлаков, согласно исследованиям, показывает, что сумма окислов железа ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) в окислительной зоне достигает в среднем 56—57%, тогда как в восстановительной — только 7—8%.

Наиболее интенсивно процесс окисления происходил до фокуса горения; в пробах шлака, взятых на расстоянии 450 мм от глаза фурмы, содержание $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ было 68,29—70,05%. За пределами окислительной зоны содержание окислов железа в шлаках резко снижалось; в большинстве проб эта сумма не превышала 1—2%, но наряду с этим имелись пробы, в которых сумма $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ составляла 15—20%. Исследования А. П. Любана на доменной печи № 3 Азовстали в 1939 г. подтвердили выводы исследований доменной печи № 1 Макеевского завода.

Полученные различными исследователями результаты, иногда разноречивые, вызывали необходимость дополнительного изучения хода процесса окисления чугуна перед фурмами. С этой целью нами в 1934—1937 гг. забирались также и пробы материалов из горна доменной печи № 1 Магнитогорского завода: в 1935 г. трубкой с продольным желобком, в 1936 г. только трубкой с внутренней лодочкой и в 1937—1938 гг. трубкой с внутренней лодочкой и газозаборной трубкой. Для возможности сравнения результатов с другими исследованиями, здесь приводятся только данные, полученные трубкой с внутренней лодочкой (рис. 89) и газозаборной трубкой (рис. 87).

Пробы чугуна тщательно отделялись от неметаллических включений (шлака) путем мелкого дробления и отбора магнитом. Возможно, что при таком методе отделения терялась часть углерода чугуна. Пробы шлака подвергались анализу отдельно на металлическое железо, чтобы попавшее в шлак железо в виде мельчайших частиц не могло быть отнесено к закиси железа шлака.

На рис. 132 изображены кривые содержания углерода, кремния, марганца, фосфора и серы в чугуне на горизонте фурм, построенные по средним данным, приведенным в табл. 64 (исследования 1936 г.).

Горизонтальными линиями указано содержание тех же элементов в конечном чугуне в среднем за весь период исследова-

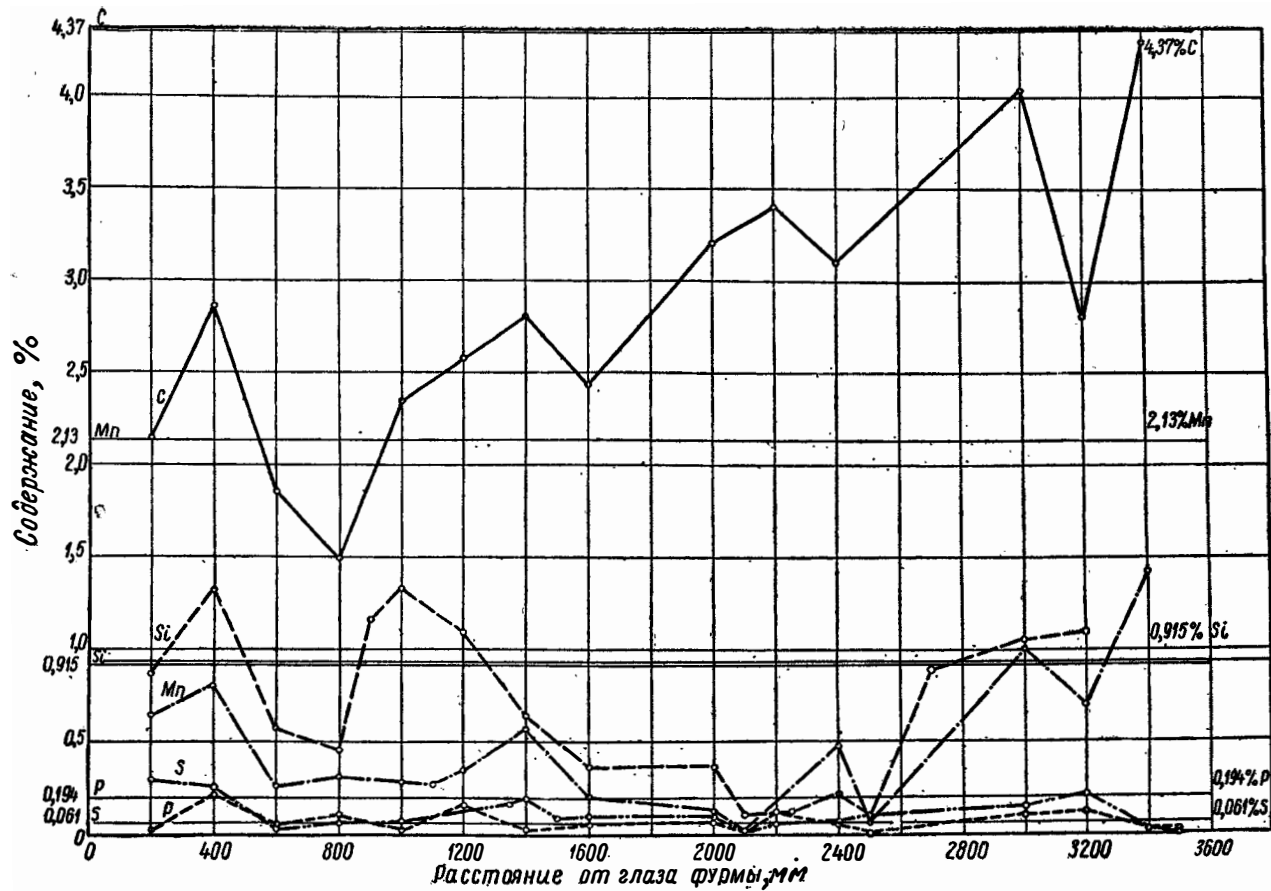


Рис. 132. Состав чугуна на горизонте фурм

ний. Как видно из рис. 132, содержание углерода в чугуна по всему радиусу значительно меньше, чем в конечном чугуна, причем в пределах окислительной зоны оно минимальное и лишь в центре горна близкое к содержанию углерода в конечном чугуна. Это показывает, что в окислительной зоне происходит интенсивное выгорание углерода чугуна под воздействием кислорода дутья. Содержание кремния в чугуна на уровне фурм в большинстве точек по радиусу значительно меньше, чем в конечном чугуна. В пределах окислительной зоны выгорание кремния происходит крайне неравномерно, что, по видимому, связано с различным содержанием его в отдельных струйках чугуна, проходящих через горизонт фурм.

Особенно низким было содержание кремния в чугуна (доходящее до 0,11—0,12%) на расстоянии 1500—2500 мм от глаза фурмы. Дальше к оси горна содержание кремния в чугуна (так же как и углерода), увеличивается; на расстоянии 3200 мм от глаза фурмы оно составляет 1,09%.

Состав чугуна, взятого из распара (табл. 65), подтверждает, что в пределах окислительной зоны происходит интенсивное окисление кремния чугуна кислородом дутья. Содержание кремния в чугуна из распара сильно колеблется в отдельных пробах (от 0,09 до 1,26%), что связано с меняющимися условиями для процесса восстановления, но в большинстве проб оно или близко к содержанию кремния в конечном чугуна или превышает его. На горизонте же фурм, в окислительной области, кремния во многих точках значительно меньше, чем в распаре.

Содержание марганца в чугуна на горизонте фурм во всех точках меньше, чем в конечном чугуна. Таким образом, из сопоставления данных табл. 64 и 65 вытекает, что марганец весьма интенсивно окисляется кислородом дутья на горизонте фурм, но содержание его даже за пределами окислительной зоны ниже, чем в конечном чугуна.

Таблица 64

Средний состав чугуна на горизонте фурм (%)

Состав чугуна	Расстояние от глаза фурмы, мм											
	200	400	600	800	900	1000	1100	1200	1350	1400	1500	1600
C	2,14	2,85	1,85	1,49	—	2,34	—	2,57	—	2,80	—	2,43
Si	0,86	1,32	0,57	0,46	1,16	1,33	—	1,09	—	0,64	—	0,36
Mn	0,64	0,81	0,25	0,30	—	0,28	0,27	0,34	—	0,56	—	0,20
P	0,022	0,206	0,045	0,099	—	0,03	—	0,159	—	0,021	—	0,045
S	0,28	0,253	0,028	0,050	—	0,06	—	—	0,162	0,192	0,092	0,097

Продолжение табл. 64

Состав чугуна	Расстояние от глаза фурмы, мм											вы- пуск
	2000	2100	2200	2250	2400	2500	2700	3000	3200	3400	3500	
C	3,20	—	3,4	—	3,10	—	—	4,04	2,81	4,3	—	4,37
Si	0,37	0,12	—	0,12	0,23	0,11	0,89	1,04	1,09	—	—	0,915
Mn	0,13	0,030	—	—	0,48	0,06	—	1,01	0,70	1,42	—	2,13
P	0,070	0,021	0,12	—	0,047	0,0018	—	0,10	0,11	—	—	0,026
S	0,095	0,02	0,045	—	0,066	0,10	—	0,151	0,205	0,016	0,028	0,061

Содержание фосфора в чугуне во всех точках, за исключением одной (400 мм), остается ниже, чем в конечном чугуне; объясняется это тем, что фосфор вносится в шихту доменных печей Магнитогорского завода главным образом золой кокса, из которой фосфор переходит в чугун ниже фурм.

Состав чугуна из распара

Таблица 65

Расстояние от кладки, мм	Дата взятия проб	Химический состав, %					Примечание
		C	Si	Mn	P	S	
		Северная сторона					
У кладки	17/X	3,25	0,81	1,15	0,254	0,11	Корольки чугуна
»	29/IX	—	0,80	1,80	—	—	То же
»	1/X	—	1,13	—	—	—	» »
»	14/X	—	1,03	—	—	—	Кусочек чугуна
»	26/X	—	0,23	0,29	—	—	То же
»	26/X	—	0,09	—	—	—	Корольки чугуна
1000	17/IX	3,78	1,26	1,72	0,226	0,12	Кусочек чугуна
3000	20/X	—	0,58	0,63	—	—	То же

Содержание серы в чугуне на горизонте фурм во всех точках по радиусу значительно больше, чем в конечном чугуне: обессеривание чугуна происходит ниже горизонта фурм при взаимодействии чугуна со шлаком. Процесс обессеривания в доменной печи не заканчивается, а продолжается и после выпуска чугуна.

Обессеривание чугуна за время прохождения его от доменной печи до разливочной машины за период исследований (сентябрь и октябрь 1936 г.) в среднем составляет 53,5%. Как на характерные примеры можно указать, что 1 сентября серы в чугуне при выпуске было 0,035%, а при разливке 0,019%; 2 сентября при выпуске — 0,037%, при разливке — 0,028%; 3 сентября соответственно — 0,036 и 0,021%; 4 сентября — 0,041 и 0,020%; 25 сентября — 0,067 и 0,017%. Это примеры относятся к области максимального и минимального обессеривания.

Приведенные на рис. 132 кривые состава чугуна на горизонте фурм выведены по средним данным; различие же в отдель-

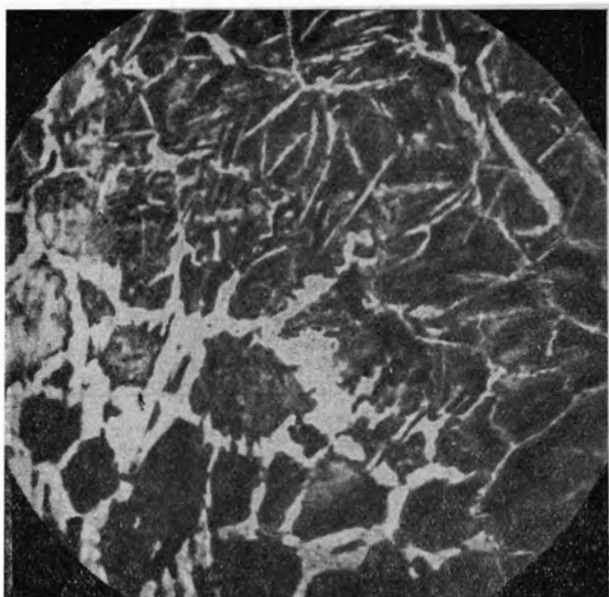


Рис. 133. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 800 мм от глаза фурмы. Структура: перлит + цементит. Увел. 200.

Химический состав (%): С — 1,82; Si — 0,14; Mn — 0,37; P — 0,108; S — 0,062. Вес образца 2 г

ных пробах чугуна довольно значительное. Это объясняется тем, что в разное время через отдельные точки окислительной зоны проходит различное количество чугуна разного состава и встречает в окислительной зоне в разное время в одних и тех же точках различное количество свободного кислорода. Анализом был установлен разнородный состав чугуна, даже в одних

и тех же небольших пробах, взятых в одной точке в одно и то же время. Так, например, состав одного и того же кусочка чугуна был резко различен: на расстоянии от глаза фурмы 600 мм — 1,02 и 0,09% Si, 1400 мм — 1,05 и 0,37% Si, 3000 мм — 0,47 и 0,37% Si, 0,16 и 0,74% Mn, 0,009 и 0,034 S, 3000 мм — 0,98 и 0,52% Si, 0,04 и 0,31% Mn.

О различном составе чугуна одной и той же пробы говорит и микроанализ: шлифы и снимки делались из одних и тех же кусочков чугуна, и в них были найдены различные структурные составляющие. На рис. 133—156 приведены снимки структур чугунов, взятых по радиусу горна на горизонте фурм.

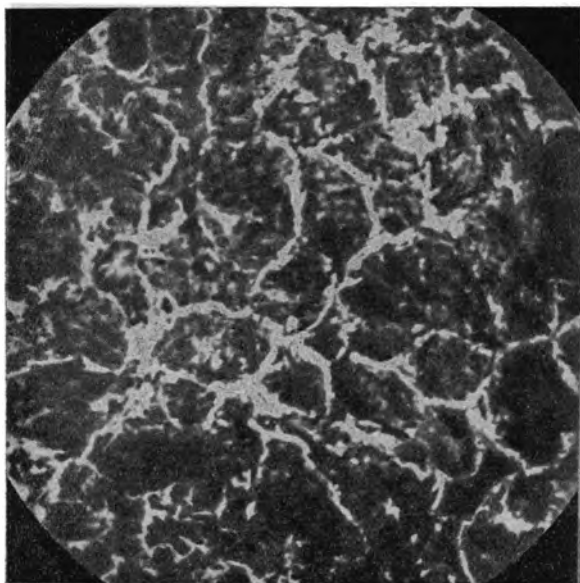


Рис. 134. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 1200 мм от глаза фурмы. Структура: перлит + цементит.

Химический состав (%): С — 2,05; Si — 0,93; Mn — 0,38; P — 0,174. Вес образца 4 г

В табл. 66 приведен состав тех шлаков, в которых определялось металлическое железо и которые отбирались трубкой со штоком и лодочкой.

Как видно из таблицы, содержание закиси и окиси железа (указываемая химиками окись железа является составной частью магнитной окиси) в пределах окислительной зоны весьма

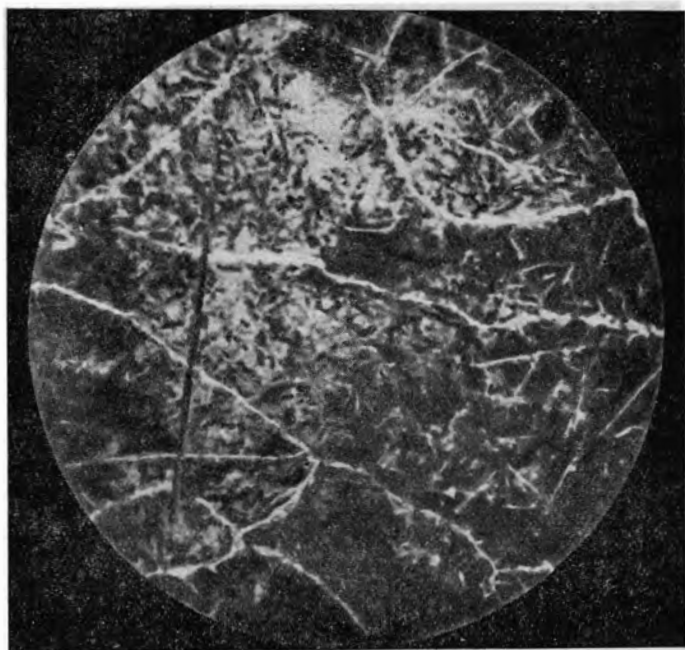


Рис. 135. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 600 мм от глаза фурмы. Структура: перлит + феррит. Увел. 200. Химический состав (%): С — 1,34; Si — 0,13; Mn — 0,37; S — 0,054; P — 0,41. Вес образца 9 г.



Рис. 136. Внешний вид образцов чугуна, взятого из горна доменной печи № 1 Магнитогорского завода на горизонте фурм в различных точках по радиусу. Натур. вел.

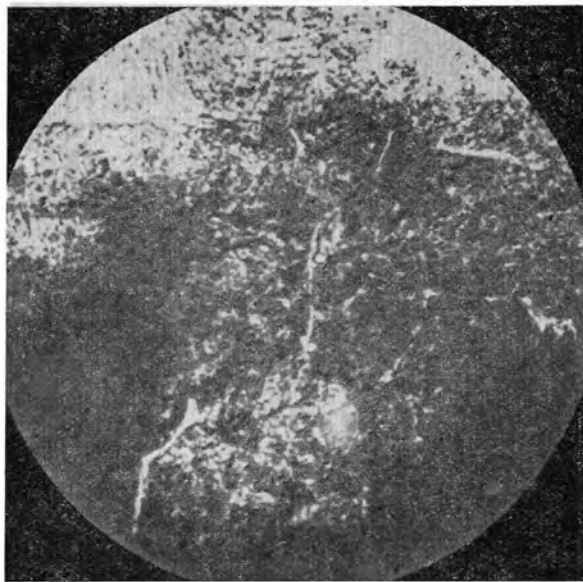


Рис. 137. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 200 мм от глаза фурмы. Структура: перлит + феррит. Увел. 200.

Химический состав (%): С — 0,76; Si — следы; Mn — 0,20; S — 0,035; P — 0,037. Вес образца 11 г

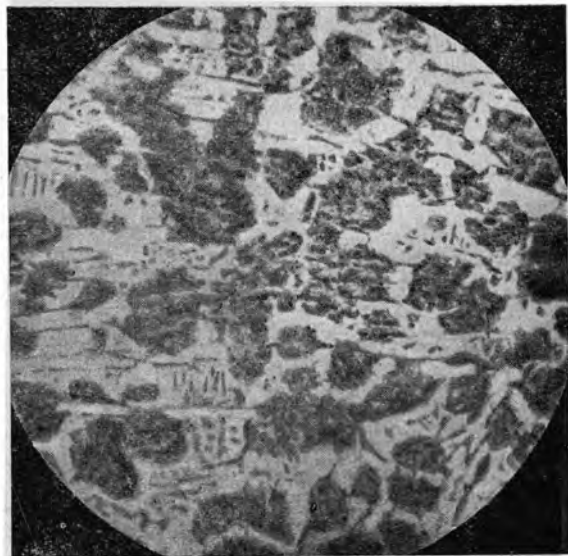


Рис. 138. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 600 мм от глаза фурмы. Структура: перлит + цементит + ледебурит. Увел. 200.

Химический состав (%): С — 2,11; Si — следы; Mn — 0,11; S — 0,022; P — 0,020. Вес образца 16 г

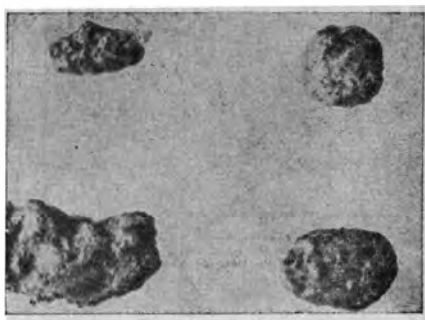


Рис. 139. Внешний вид образцов

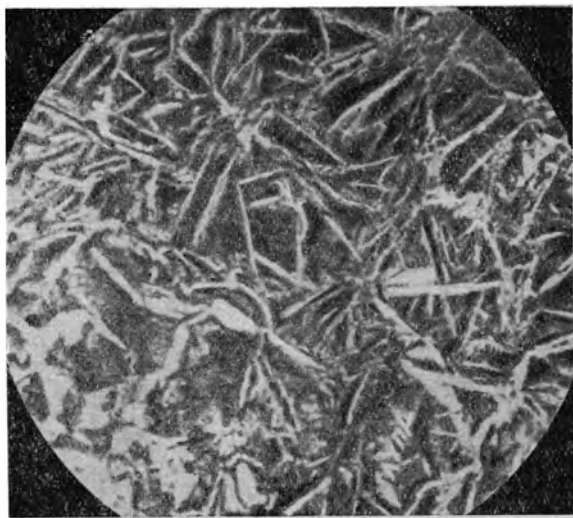


Рис. 140. Чугун на горизонте фурмы на расстоянии 1600 мм от глаза фурмы. Структура: перлит + цементит. Увел. 200.

Химический состав (%): С — 1,86; Si — 0,07; Mn — 0,14; S — 0,097; P — 0,045. Вес образца 17 г

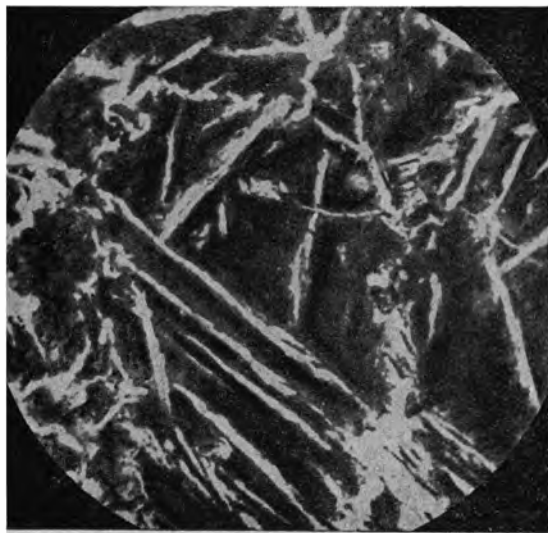


Рис. 141. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 300 мм от глаза фурмы. Структура: перлит + цементит. Увел. 200.

Химический состав (%): С — 1,80; Si — 0,19;
Mn — 0,20; S — 0,058; P — 0,024. Вес образца
18 г

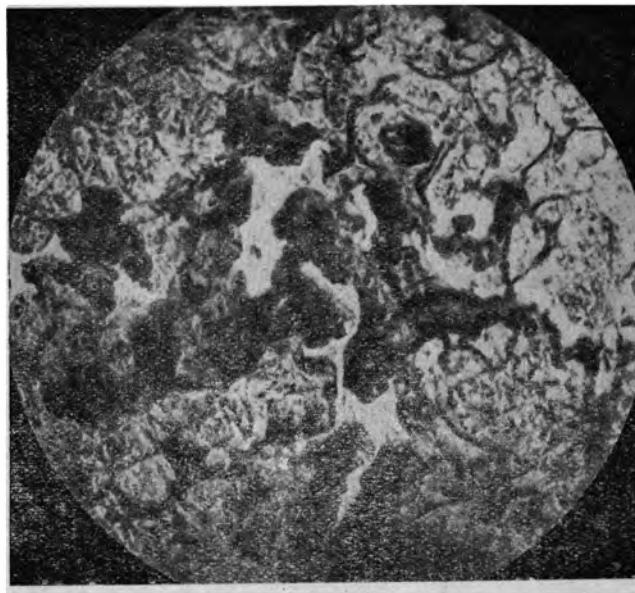


Рис. 142. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 1400 мм от глаза фурмы. Структура: цементит первичный + ледебурит. Заэвтектический белый чугун

Химический состав (%): С — 4,0; Si — 1,84;
Mn — 1,72; S — 0,122; P — 0,362. Вес образца 10 г

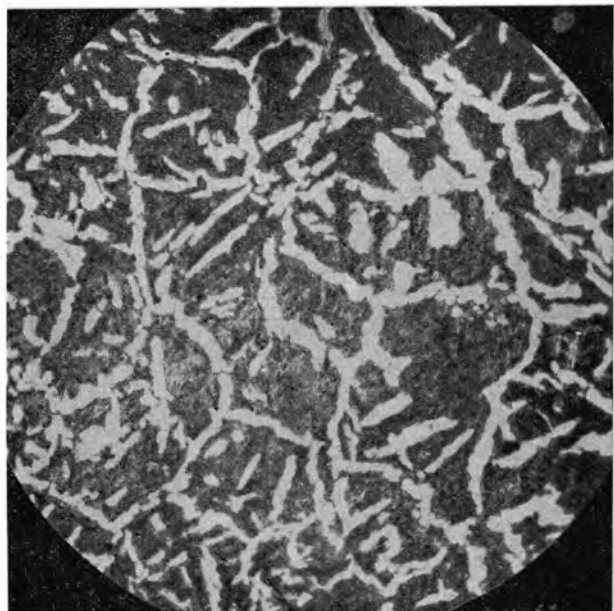


Рис. 143. Чугун на горизонте фурмы, на расстоянии 2000 мм от глаза фурмы. Структура: перлит + цементит + ледебурит (сетка ледебурита и перлита). Доэвтектический белый чугун.
Химический состав (%): С — 2,99; Si — 0,17; Mn — 0,25; S — 0,124; P — 0,094. Вес образца 13 г

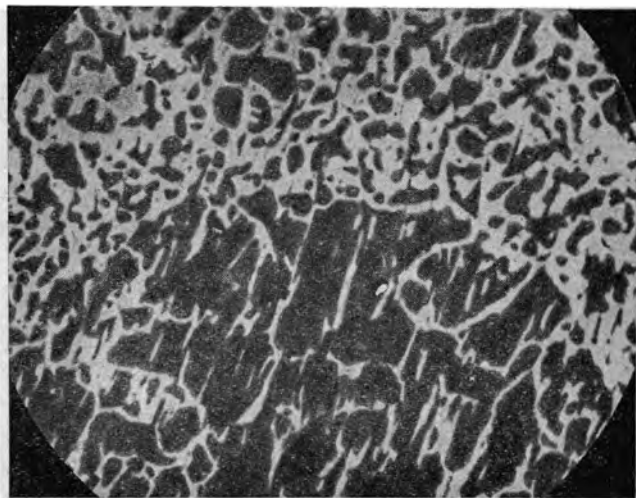


Рис. 144. Чугун на горизонте фурмы на расстоянии 900 мм от глаза фурмы. Структура: вторичный цементит + ледебурит + аустенит.
Химический состав (%): С — 3,05; Si — 1,16; Mn — 0,98; S — 0,15; P — 0,176. Вес образца 21 г

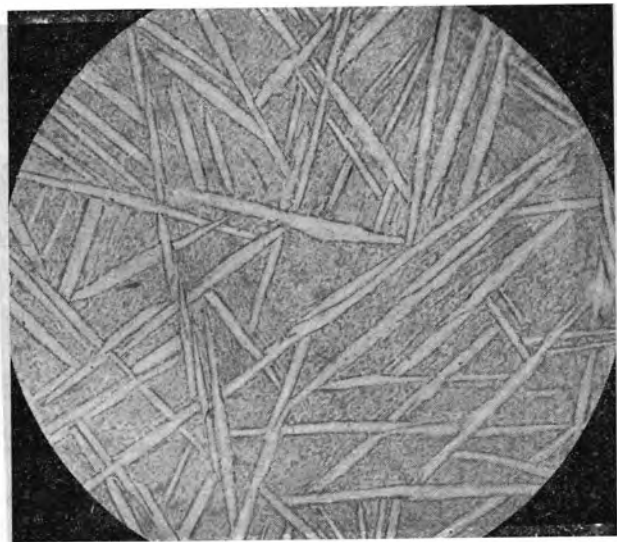


Рис. 145. Чугун на горизонте форм на расстоянии 1400 мм от глаза фурмы. Структура: первичный цементит + ледебурит. Заэвтектический белый чугун. Химический состав (%): Si — 0,92; Mn — 0,82; S — 0,144. Вес образца 26 г

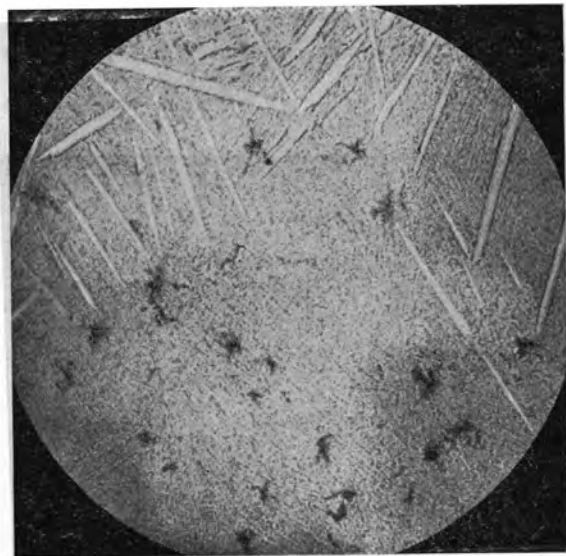
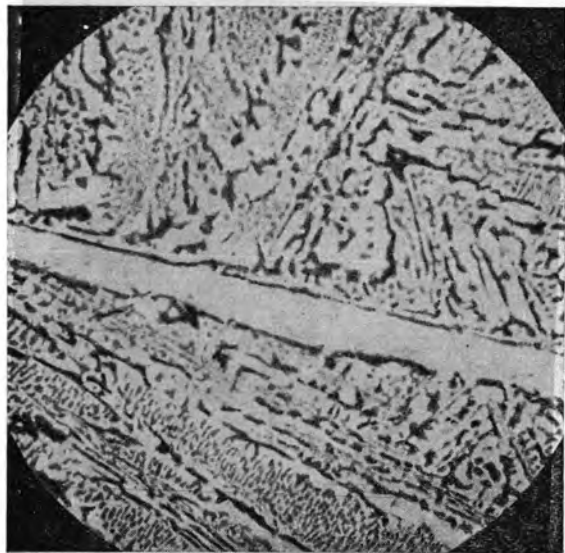


Рис. 146. Чугун на горизонте форм на расстоянии 1500 мм от глаза фурмы. Структура: первичный цементит + ледебурит в одной части и ледебурит + графит — в другой. Увел. 110. Вес образца 31 г



Чугун на горизонте фурм на расстоянии 1500 мм от глаза фурмы.

Рис. 147. Структура: цементит первичный + ледебурит. Увел. 415. Вес образца 31 г.

Рис. 148. Структура: ферритная сетка + графит + включения закиси железа на границах. Вес образца 31 г.

Три снимка одного и того же образца чугуна, взятого из горна доменной печи № 1 Магнитогорского завода. Химический состав (%): Si—0,93; Mn—0,80; S—0,092. Внешний вид — капли чугуна с блестящей поверхностью, излом плотный (рис. 146, 147, 148)

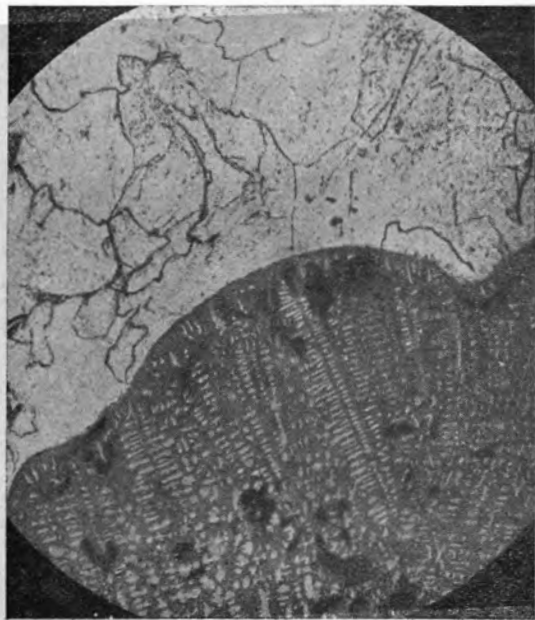


Рис. 149. Чугун на горизонте фурмы на расстоянии 3200 мм от глаза фурмы. Структура: ферритная сетка + шлак.

Химический состав (%): С — 0,11; Si — 0,52; Mn — 0,31; P — 0,030. Вес образца 40 г.

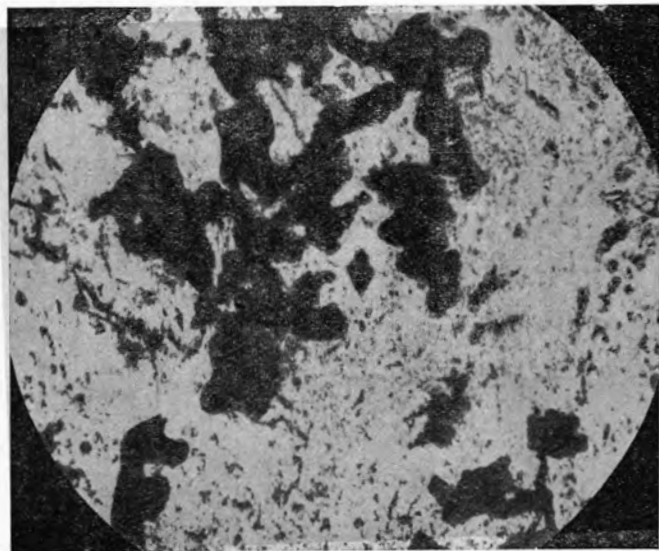


Рис. 150. Чугун на горизонте фурмы на расстоянии 3500 мм от глаза фурмы. Структура: ферритная сетка, много закиси железа, нет графита.

Химический состав (%): С — 0,22; Si — 0,16; Mn — 0,15; P — 0,026; S — 0,028. Вес образца 43 г.

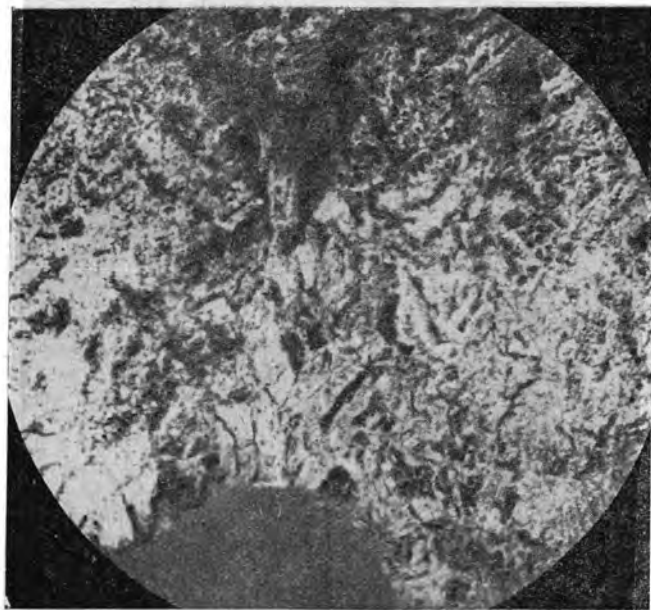


Рис. 151. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 2700 мм от глаза фурмы. Структура: ферритная сетка, включения закиси железа. Вес образца 48 г

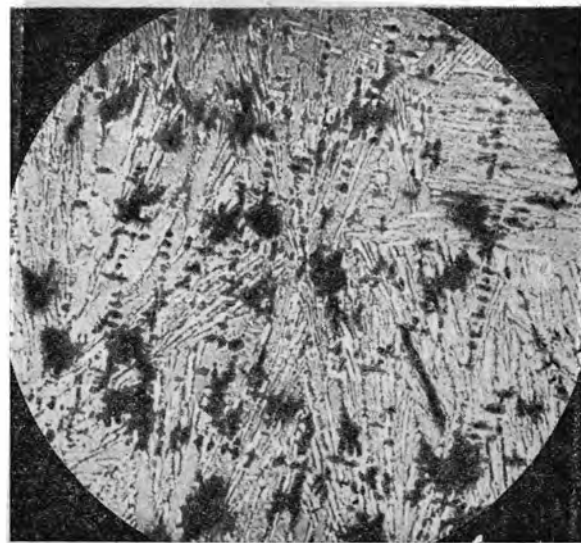


Рис. 152. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 1000 мм от глаза фурмы. Структура: половинчатый чугун. Химический состав (%): С — 2,34; Si — 0,05; Mn — 0,05; P — 0,03. Вес образца 191 г

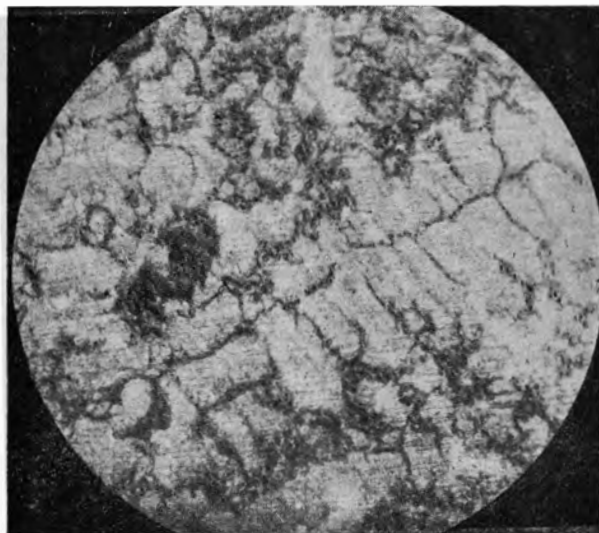


Рис. 153. Чугун на горизонте фурмы на расстоянии 3000 мм от глаза фурмы. Структура: серый чугун, графит, фон мартенситовый. Химический состав (‰): С — 3,74; Si — 2,28; Mn — 2,13; P — 0,10; S — 0,053. Увел. 415. Вес образца 201 г

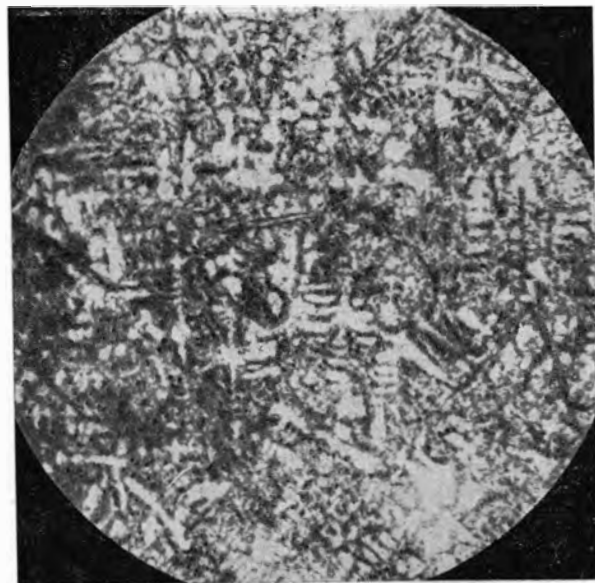


Рис. 154. Чугун из распара. Структура: серый чугун (вытянутые включения графита с сохранением дендритного строения). Вес образца 51 г

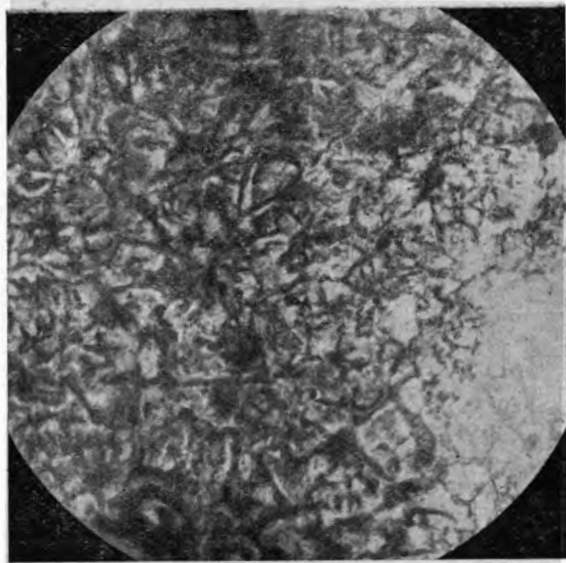


Рис. 155. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 3200 мм от глаза фурмы. Структура: серый чугун + графит (удлиненные мелкие пластинки, основа сорбитовая), очень мелкие включения фосфидной эвтектики.

Химический состав (%): С — 4,16; Si — 1,97; Mn — 1,64; S — 0,065; P — 0,14. Вес образца 202 г

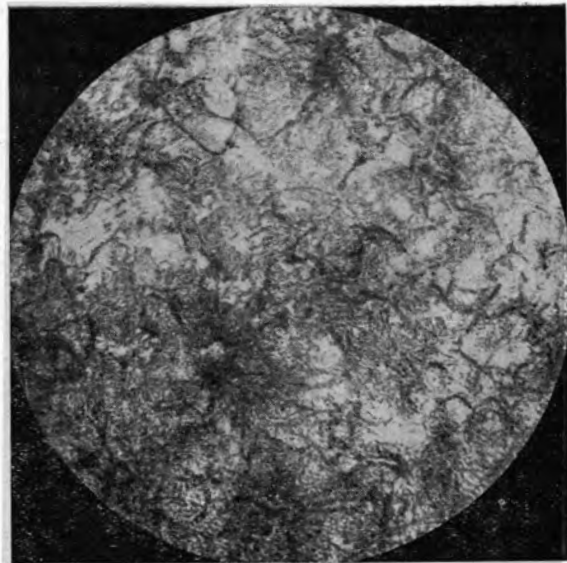


Рис. 156. Чугун на горизонте фурм на расстоянии 3400 мм от глаза фурмы. Увел. 415. Структура: серый чугун, графит, фон мартенситовый. Химический состав (%): С — 4,3; Mn — 1,42; S — 0,016; P — 0,22. Вес образца 203 г

высокое, за пределами ее — значительно меньше и у оси — совершенно ничтожное.

Состав шлака на горизонте фурм, как и состав чугуна, подтверждает весьма интенсивное окисление составляющих чугуна и образование сильножелезистых шлаков в окислительной области, у фурм меньшее, у фокуса горения — большее.

Таблица 66

Состав шлака (%) на горизонте фурм (взятого трубкой с внутренней лодочкой)

Расстояние от глаза фурмы мм	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	S	Fe _{мет}	Сумма FeO + Fe ₂ O ₃
200	30,37	15,12	25,71	2,70	6,09	9,79	9,89	0,21	0,14	19,68
400	29,95	16,50	20,32	2,55	6,34	14,10	10,34	0,18	0,04	24,44
600	16,46	9,80	14,86	1,60	2,92	41,80	12,86	0,11	0,06	54,66
800	10,92	6,92	12,02	1,40	2,18	25,40	40,66	0,12	0,22	66,06
1000	21,53	17,30	18,35	1,00	3,00	5,23	32,65	0,36	3,80	37,88
1200	20,17	20,50	12,40	1,38	4,50	5,98	34,63	0,35	0,21	40,61
1400	16,50	9,40	12,76	1,45	6,52	8,00	45,20	0,20	0,95	53,20
1600	28,20	19,50	16,78	1,63	5,90	3,19	24,20	0,29	3,80	27,39
1800	38,25	23,90	25,30	2,60	6,35	0,14	3,30	0,70	0,41	3,44
2000	24,80	20,20	20,30	2,40	2,00	8,40	20,60	0,34	0,71	29,00
2200	32,85	15,90	25,60	2,70	4,03	5,80	12,65	0,41	0,52	18,45
2400	28,90	20,00	19,60	1,80	5,68	3,40	20,20	0,31	3,40	23,60
2600	28,30	23,10	27,25	2,80	4,93	2,39	7,75	0,53	0,72	10,14
3000	37,80	20,30	31,70	3,40	2,50	0,10	3,45	1,20	0,30	3,55
3400	36,50	23,35	30,18	3,20	3,63	0,11	2,55	1,13	0,23	2,66
При вы- пуске	36,55	17,98	32,69	5,00	4,52	Нет	1,20	0,84	—	—

При работе доменной печи на магнитогорской руде процесс восстановления ее почти заканчивается в распаре, и шлаки приходят на горизонт фурм с небольшим содержанием закиси железа, о чем свидетельствует состав шлака, приведенный в табл. 67. Это объясняется тем, что состав пустой породы руды обеспечивает своевременное шлакообразование в шахте печи и быстрый переход шлака в жидкое состояние. Все шлаки близки по своему составу к конечному шлаку и содержат ничтожное количество закиси железа, за исключением одного, взятого на расстоянии 3000 мм от кладки печи.

Таблица 67

Состав шлака из распара (%)

Расстояние от кладки, мм	№ пробы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	S
Северная сторона								
У кладки	22	36,50	15,73	1,33	7,93	33,56	2,17	0,55
500	40в	33,92	19,64	1,12	3,43	39,04	1,25	0,88
2500	71в	37,32	21,90	1,45	7,62	25,76	3,46	0,61
3000	76а	36,44	22,09	11,43	11,89	14,54	0,72	0,51
Южная сторона								
У кладки	84а	40,00	21,14	1,32	7,49	24,72	3,78	0,50
500	52в	35,40	19,92	4,90	6,83	25,71	5,22	0,80

На рис. 157 и в табл. 68 приведен состав шлака в горне на горизонте фурм после пересчета на 1% FeO и для сравнения — средний состав шлака, выпускавшегося из доменной печи в период исследований. В конечном шлаке содержалось 1,2% закиси железа.

Таблица 68

Средний состав шлака (%) на горизонте фурм (после пересчета на 1% FeO)

Расстояние от глаза фурмы, мм	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	FeO	S
200	37,95	20,97	28,22	3,69	7,75	1,00	0,42
400	36,80	24,46	27,58	2,84	7,04	1,00	0,28
600	36,46	23,10	23,55	3,14	8,46	1,00	0,29
800	35,52	23,67	30,70	3,46	6,10	1,00	0,15
1000	36,51	21,00	31,24	3,19	6,56	1,00	0,48
1200	36,50	23,11	23,55	3,33	5,70	1,00	0,51
1400	37,60	17,69	29,61	3,32	10,29	1,00	0,49
1600	35,74	16,60	32,30	4,30	9,70	1,00	0,36
1800	39,00	22,62	27,43	3,07	6,14	1,00	0,74
2000	35,50	22,22	31,11	3,00	6,68	1,00	0,49
2200	37,80	15,10	34,70	3,79	7,33	1,00	0,28
2400	35,70	24,92	27,15	3,00	7,75	1,00	0,48
2500	36,12	19,52	30,20	3,71	9,05	1,00	0,40
3000	39,29	21,77	27,75	3,00	6,69	1,00	0,50
3400	35,08	18,57	31,76	3,51	9,48	1,00	0,60
3600	37,80	21,27	25,90	3,66	9,80	1,00	0,57
При выпуске	36,55	17,98	32,69	5,00	4,52	1,20	0,84

Из приведенных данных видно, что состав шлака несколько отличается от состава конечного шлака, хотя и близок к нему. Объясняется это тем, что в золе кокса отношение кремнезема

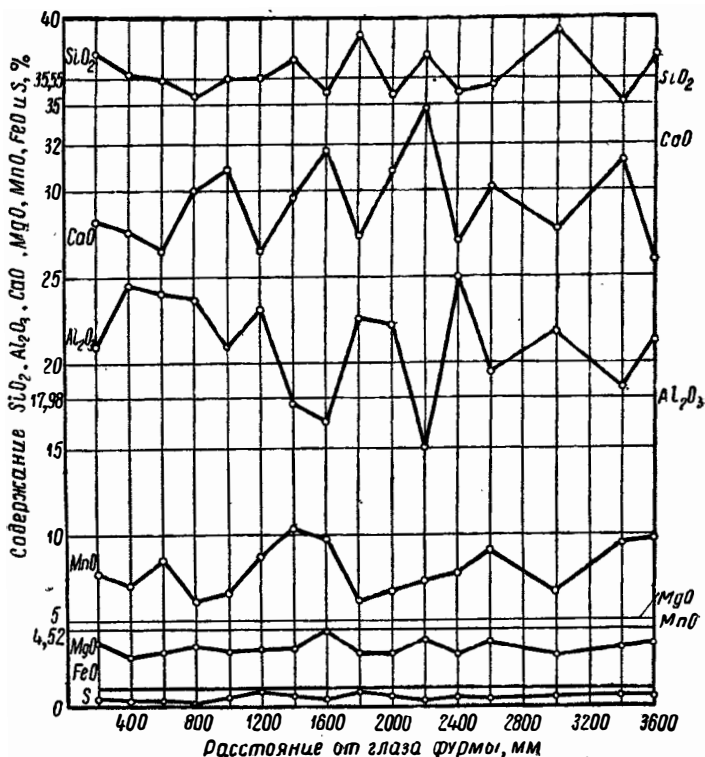


Рис. 157. Состав шлака в горне на горизонте фурм

к глинозему близко к такому же отношению в руде. В золе кокса оно равно 1,8, а в руде 1,4—1,5. В связи с этим во всех точках по радиусу, за исключением трех, содержание глинозема больше, чем в конечном шлаке.

Содержание извести в шлаке на горизонте фурм во всех точках (за исключением одной) меньше, чем в конечном шлаке, так как не вся известь флюса прореагировала со шлаком, и некоторое количество свободной извести дошло до фурм; при взятии проб из горна доменной печи очень часто попадались совершенно изолированные кусочки извести. Магнезии в шлаке на горизонте фурм также меньше, так как она вносится флюсом вместе с известью. Закиси марганца во всех точках по радиусу на горизонте фурм больше, чем в конечном шлаке; окончательное

восстановление марганца и переход его в чугун происходит ниже фурм. Кривая содержания кремнезема на горизонте фурм показывает колебания, близкие к среднему содержанию его в конечном шлаке. Серы в шлаке во всех точках меньше, чем в конечном шлаке. Как было указано ранее, процесс обессеривания чугуна происходит ниже фурм, вследствие этого в шлаке на горизонте фурм серы меньше, чем в конечном шлаке.

Вместе с чугуном и шлаком в лодочку попадали также кусочки кокса, которые чаще всего оказывались с мелкими вкраплениями корольков чугуна и шлака или были обсыпаны известью. Попадался и кокс, в котором не были заметны посторонние вкрапления. Такие пробы кокса подвергались анализу. Результаты анализа приведены в табл. 69.

Таблица 69

Состав кокса на горизонте фурм (%)

Расстояние от глаза фурмы мм	Летучие	Зола	Сера	Расстояние от глаза фурмы мм	Летучие	Зола	Сера
800	0,95	15,13	0,15	2200	0,85	19,67	0,32
1000	0,25	18,80	—	2400	1,14	15,85	0,25
1200	0,98	19,31	0,345	2800	0,26	14,33	0,40
1350	0,17	14,60	—	3000	0,93	21,07	0,41
1600	0,17	20,15	—	3100	0,19	20,20	—
1600	0,86	15,55	0,41	3100	1,68	21,00	—
2000	0,95	14,07	0,30	3100	0,26	19,70	—
2000	0,25	19,60	0,32	3300	0,78	17,01	0,44
2100	0,45	19,60	0,38	3400	0,97	16,87	0,45

В загружаемом в доменную печь коксе содержалось 0,7—4,8% летучих, 11,10—14% золы, 0,5—0,7% серы. Как видно из табл. 69, количество золы в коксе увеличилось. Это произошло потому, что, с одной стороны, на пути до фурм часть углерода выгорела, и кокс относительно обогатился золой, с другой стороны, мелкие частицы чугуна и шлака, невидимые под лупой, все же были вкраплены в коксе. На это указывает и состав золы кокса, взятого на горизонте фурм, в котором содержание Fe_2O_3 доходит до 28%, а в золе загружаемого кокса оно около 13%. Следует оговориться, что химики дают содержание окислов железа в золе кокса в виде окиси железа, на самом деле после коксования в золе кокса вместо окиси железа находится закись

железа, а вполне возможно — металлическое железо. В золе кокса на горизонте фурм окислы железа, тесно перемешанные в коксе с твердым углеродом, при температуре, господствующей в горне, восстановятся, и железо будет в металлическом состоянии.

В табл. 70 приведен состав золы кокса, взятого на горизонте фурм, и заводский анализ золы — средний за месяц.

Таблица 70
Состав золы кокса на горизонте фурм (%)

Расстояние от глаза фурмы, мм	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO
3300	39,30	27,85	18,95	9,57	2,56	0,77
3000	32,40	25,31	28,31	9,03	3,37	0,21
Средний состав золы кокса за месяц						
	50,72	27,60	13,05	4,80	1,50	0,06

Серы в коксе на уровне фурм меньше, чем в загружаемом коксе. В среднем кокс теряет около 50% серы на пути от ковшника до горизонта фурм.

При исследовании на той же доменной печи № 1 Магнитогорского завода в 1937 г. извлекались пробы чугуна и шлака на горизонте фурм. На рис. 158 приведены кривые изменения состава чугуна в различных точках по радиусу. Кривые вычерчены по среднему составу чугуна, приведенному в табл. 71.

Таблица 7
Средний состав чугуна на горизонте фурм (‰)

	Расстояние от глаза фурмы, мм													при выпуске
	0	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000	2200	2250	2400	2600	
C	2,05	2,57	0,46	2,33	1,91	—	2,70	3,40	3,50	2,25	4,11	—	—	—
Si	0,19	0,47	0,07	0,26	0,26	1,18	0,66	0,36	2,01	0,02	1,40	—	0,77	1,14
Mn	0,02	0,02	0,02	0,59	0,41	0,24	0,36	0,275	1,96	0,02	1,84	1,48	—	2,20
P	0,090	0,13	—	0,017	0,155	0,09	0,16	0,152	0,356	0,135	0,204	—	—	—
S	0,20	—	—	0,070	0,072	—	0,14	0,143	0,013	0,091	0,088	—	—	0,059

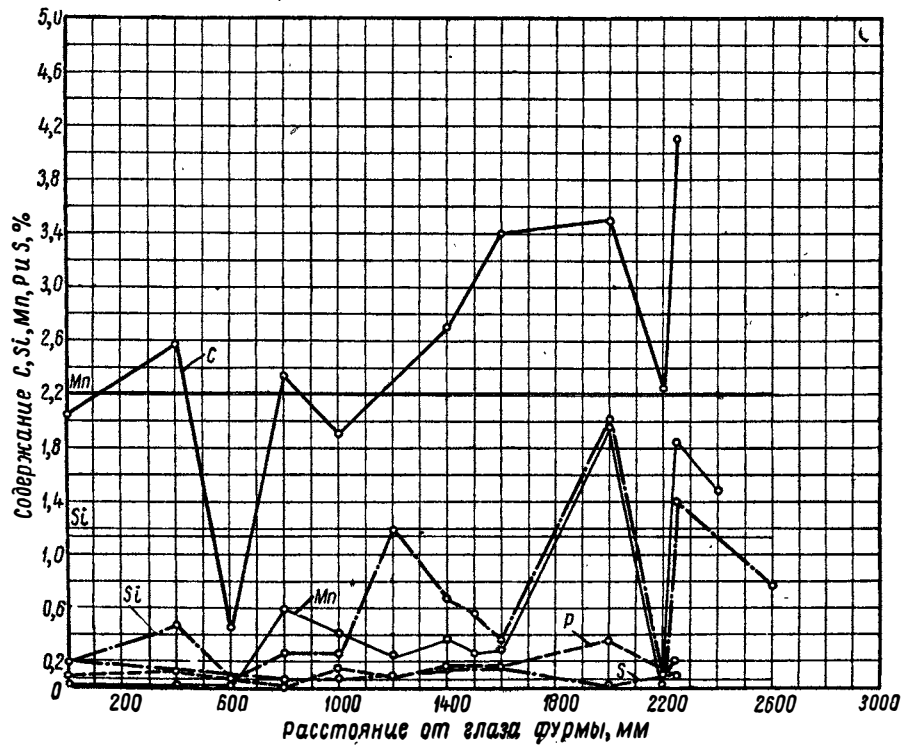


Рис. 158. Состав чугуна в горне на горизонте фурм.
Состав конечного чугуна: 1,14% Si, 2,21% Mn, 0,059% S

Как видно из данных, в пределах окислительной зоны происходит весьма интенсивное выгорание кремния и марганца (до сотых долей процента в отдельных точках) и менее интенсивное — углерода и фосфора. Содержание серы в чугуна на горизонте фурм, как и в предыдущих случаях, значительно больше чем в конечном чугуна.

За пределами окислительной зоны содержание всех составляющих в чугуна значительно возрастает.

В табл. 72 приведен средний состав чугуна из распара; из сопоставления состава чугуна в распаре, на горизонте фурм и при выпуске следует, что начавшееся выше распара науглероживание чугуна протекает до горизонта фурм, где в окислительной области углерод частично выгорает; ниже горизонта фурм происходит науглероживание чугуна до того состава, который наблюдается при выпуске. Кремний и марганец частично восстанавливаются и переходят в чугуна уже в распаре, но содержание их в распаре значительно меньше, чем в конечном чугуна.

Таблица 72

Состав чугуна из распара (%)

	C	Si	Mn	P	S
С северной стороны	1,57	0,26	0,98	0,052	0,022
С южной стороны	2,64	0,34	1,18	0,149	0,036
Из горна при выпуске	—	1,14	2,21	—	0,059

Процесс восстановления этих элементов и переход их в чугуна совершается также и на пути до горизонта фурм. В окислительной области кремний и марганец весьма интенсивно окисляются, причем до фокуса горения больше, чем за ним. Содержание кремния и марганца за пределами окислительной зоны близко к содержанию их в конечном чугуна. Окончательное образование чугуна того состава (по кремнию и марганцу), который получается при выпуске, происходит ниже горизонта фурм.

Фосфор частично выгорает в окислительной зоне.

Содержание серы на горизонте фурм превышает содержание ее в конечном чугуна; процесс обессеривания происходит в нижней части горна при взаимодействии жидкого чугуна со шлаком.

В табл. 73 приведен средний состав шлака на горизонте фурм в различных точках по радиусу горна.

Таблица 73

Средний состав шлака (%) на горизонте фурм (без Fe и C)

	Расстояние от глаза фурмы, мм								
	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1500
FeO	22,27	16,50	26,88	32,10	23,32	21,20	41,78	27,90	29,34
Fe ₂ O ₃	1,73	10,52	11,48	12,65	12,84	11,37	3,15	4,53	4,63
SiO ₂	30,14	26,90	21,49	19,12	20,63	23,53	19,36	22,05	23,68
Al ₂ O ₃	12,38	18,55	14,11	14,76	18,15	17,14	11,27	15,24	14,16
CaO	22,57	20,40	19,89	16,89	20,30	19,48	16,65	22,39	21,29
MgO	5,27	4,10	3,61	2,28	2,50	2,34	4,52	4,90	4,23
MnO	5,64	2,77	2,54	2,20	2,26	4,92	3,18	2,99	2,31
S	0,16	0,16	—	—	—	0,02	0,08	—	0,30
Сумма									
FeO+Fe ₂ O ₃	24,00	27,02	38,36	34,75	36,16	32,57	44,93	32,43	33,97

Продолжение табл. 73

	Расстояние от глаза фурмы, мм								при выпуске
	1600	1800	2000	2200	2250	2400	3000	3200	
FeO	18,86	8,27	1,57	1,07	1,98	1,68	3,23	0,65	1,00
Fe ₂ O ₃	14,52	3,47	0,28	Нет	1,44	2,79	1,62	0,80	Нет
SiO ₂	24,80	23,05	34,15	38,94	40,50	33,94	41,19	34,85	36,07
Al ₂ O ₃	16,42	33,10	23,46	20,87	14,71	20,72	15,55	23,30	19,45
CaO	18,40	28,64	30,69	25,79	27,22	31,85	20,45	30,00	34,80
MgO	3,00	2,04	5,67	5,21	5,75	4,70	5,98	5,00	4,65
MnO	4,00	1,33	3,98	8,11	8,40	3,68	11,98	5,40	3,32
S	—	—	0,20	—	—	—	—	—	0,90
Сумма									
FeO+Fe ₂ O ₃	33,38	11,74	1,85	1,07	3,42	4,47	4,85	1,45	1,00

В пределах окислительной зоны содержание закиси и окиси железа в сумме доходило до 45%. Наличие закиси и окиси железа в шлаке свидетельствует о том, что металл, проходя через окислительную область, может окисляться как до закиси, так и до магнитной окиси. За пределами окислительной зоны количество окислов железа в шлаке уменьшалось, снижаясь до 1,5% на расстоянии 3200 мм от глаза фурмы.

В соответствии с большим или меньшим содержанием окислов железа в шлаке находятся и кривые других составляющих шлака. В табл. 74 приведен средний состав шлака на горизонте фурм без закиси и окиси железа.

Таблица 74

Средний состав шлака (%) на горизонте фурм (без FeO и Fe₂O₃)

	Расстояние от глаза фурмы, мм								
	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
SiO ₂	39,90	37,20	34,96	35,34	32,80	35,42	34,07	33,73	37,62
Al ₂ O ₃	16,18	26,22	24,63	25,49	26,54	28,37	19,83	22,10	24,41
CaO	29,62	27,50	30,68	29,93	31,94	26,77	30,97	32,44	27,48
MgO	6,90	5,56	5,20	4,56	4,54	3,27	8,87	7,05	4,42
MnO	7,40	3,32	4,53	4,68	4,18	6,11	6,13	4,68	6,07
S	0,20	0,20	—	—	—	0,03	0,11	—	—

Продолжение табл. 74

	Расстояние от глаза фурмы, мм							при выпус- ке
	1800	2000	2200	2400	2600	3200		
SiO ₂	26,04	34,82	39,33	35,44	43,16	35,36	36,38	
Al ₂ O ₃	37,64	23,84	21,08	21,42	16,40	23,64	19,61	
CaO	32,50	31,20	26,03	33,52	21,54	30,44	35,10	
MgO	2,31	5,78	5,26	5,09	6,28	5,08	4,67	
MnO	1,51	4,05	8,28	3,87	12,62	5,48	3,34	
S	—	0,22	—	—	—	—	0,90	

Из данных таблицы видно, что содержание кремнезема и магнелии в шлаке на горизонте фурм примерно такое же, как и в конечном шлаке.

Закиси марганца почти во всех точках по радиусу больше, чем в конечном шлаке. При сравнении шлаков из распара (табл. 75), горизонта фурм и конечного шлака видно, что процесс восстановления марганца из шлака и переход его в чугун

Таблица 75.

Состав шлака (%) из распара (без окислов железа)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S
С северной стороны	38,20	17,75	29,80	6,30	7,60	0,31
С южной стороны	35,80	14,25	38,00	5,85	5,95	0,11
При выпуске из горна	36,38	19,61	35,10	4,67	3,34	0,90

совершался все время на различных горизонтах доменной печи от первичного шлака до конечного, но не закончился в горне на уровне фурм; здесь, хотя и не намного, но закиси марганца было больше, чем в конечном шлаке, т. е. восстановление марганца и переход его в чугун продолжались и ниже горизонта фурм.

Довольно резко отличалось и содержание извести и глинозема в шлаке на горизонте фурм от содержания их в конечном шлаке. Так, в большинстве случаев извести на горизонте фурм было на 2—6% меньше, чем в конечном шлаке; в отдельных случаях колебания составляли 2—14%. Извести в шлаке во всех точках по радиусу горна содержалось меньше потому, что часть ее на горизонте фурм была еще в свободном состоянии. Это подтверждается тем, что в пробах материалов из горна извлекалась известь в кусочках или в порошке.

Конечный шлак оказывался беднее глиноземом потому, что ниже горизонта фурм к нему присоединялась зола кокса, а в ней отношение кремнезема к глинозему было больше, чем в руде (в золе 1,8 и в руде 1,4—1,5).

Вместе с пробами чугуна и шлака на горизонте фурм извлекались также и кусочки кокса, в них в среднем содержалось 17,53% золы и 0,39% серы. Часть углерода выгорела выше фурм, и кокс обогатился золой, серы на горизонте фурм было примерно в два раза меньше, чем в загружаемом в доменную печь коксе.

В 1938 г. при исследовании доменной печи № 3 Запорожстали, работавшей на донецком коксе и криворожских рудах, извлекались пробы материалов на горизонте фурм в различных точках по радиусу.

Углерод и особенно кремний и марганец в окислительной зоне выгорали так же интенсивно, как и в разобранных выше случаях. Высокое содержание окислов железа в шлаке в окислительной области свидетельствовало о весьма энергичном окислении и железа чугуна.

В табл. 76 приведен состав чугуна на горизонте фурм в различных точках по радиусу горна доменной печи № 3 Запорожстали.

Состав чугуна не является средним, так как проб было взято мало, но все же эти пробы отражают высказанное выше положение, что в окислительной зоне горна весьма интенсивно выгорают кремний, марганец и фосфор и в меньшей мере углерод.

За пределами окислительной зоны кремния, марганца и фосфора в чугуне было значительно больше, чем в окислительной зоне, но все же меньше, чем в выпускаемом чугуне, а именно: кремния — 0,26; 0,32; 0,76%, марганца — 0,48; 0,67; 0,77%.

Таблица 76

Состав чугуна на горизонте фурм (%)

	Расстояние от глаза фурмы, мм						
	50	200	800	900	900	1100	1200
C	2,96	0,36	2,56	1,76	2,43	2,48	2,44
Si	0,086	0,20	0,088	—	0,080	—	0,064
Mn	0,040	0,17	0,24	0,09	0,039	0,07	0,06
P	0,020	—	—	0,012	0,019	0,036	0,12

Продолжение табл. 76

	Расстояние от глаза фурмы, мм						
	1200	1300	1300	1500	2000	3000	при выпуске
C	0,73	3,49	2,90	4,13	4,58	3,85	4,0—4,5
Si	0,082	0,080	0,047	0,26	0,32	0,76	0,5—0,9
Mn	0,15	0,26	0,070	0,77	0,48	0,67	2,0—3,0
P	—	—	0,028	0,15	0,08	0,23	—

Углерода же в чугуне за окислительной зоной было почти столько же, сколько и в выпускаемом чугуне — 3,85; 4,13; 4,58%. К сожалению, нельзя привести сравнимых данных состава чугуна в распаре с составом его в горне. Чугуна в распаре, кроме одной пробы, так же как и шлака (за исключением нескольких проб, извлеченных при временном понижении нагрева дутья) не было. Объясняется это своеобразием пустой породы криворожской руды, преимущественно кремнеземистой, препятствующей нормальному течению процессов восстановления в нижней части шахты и в распаре (в зоне шлакообразования). Поэтому чугун при криворожской руде образовывался ниже распара.

В табл. 77 приведен средний состав шлака на горизонте фурм, из которого видно, что в окислительной зоне шлак содержал очень много закиси и магнитной окиси железа. До фокуса горения сумма закиси и окиси железа в пробах шлака была наибольшей, за фокусом горения до конца окислительной зоны — несколько меньшей. За окислительной зоной до оси горна сумма закиси и окиси железа в отдельных пробах в шлаке была в основном незначительной, гораздо меньшей, чем в окислительной зоне, но были пробы и с высоким содержанием окислов железа. Так, например, встречались пробы с 25,43; 38,10% и наряду с этим 1,39; 1,73; 2,39; 3,39% окислов железа.

Таблица 77

Средний состав шлака на горизонте фурм (%)

	Расстояние от глаза фурмы, мм									
	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Fe _{мет}	0,12	0,17	1,53	0,12	0,12	0,15	0,17	0,10	0,16	0,49
FeO	19,92	35,34	21,15	33,10	20,45	29,72	20,30	18,06	22,40	34,05
Fe ₂ O ₃	39,63	22,47	8,99	34,67	40,65	39,16	31,66	40,77	23,25	18,93
SiO ₂	11,87	11,43	23,32	10,23	13,77	11,99	12,12	11,74	17,75	14,62
Al ₂ O ₃	4,91	4,11	7,47	3,10	3,83	4,38	3,26	2,73	6,04	4,96
CaO	19,34	22,40	29,98	15,73	17,04	22,20	26,77	21,68	24,65	22,15
MgO	1,27	1,13	1,27	0,64	0,95	0,50	2,24	1,66	0,98	1,13
MnO	2,72	2,39	5,71	2,18	3,03	1,64	2,84	2,54	3,79	3,02
S	0,22	0,23	0,54	0,23	0,16	0,26	0,15	0,34	0,66	0,27
Сумма FeO+Fe ₂ O ₃	59,55	57,81	30,14	67,77	61,10	68,88	51,96	58,83	55,65	52,98

Продолжение табл. 77

	Расстояние от глаза фурмы, мм									
	1000	1100	1200	1300	1500	2000	2500	3000	3700	при вы- пусе
Fe _{мет}	1,23	4,97	0,21	0,72	0,13	0,78	0,28	11,70	0,17	—
FeO	26,83	43,16	29,24	46,56	31,60	37,00	2,01	18,21	1,38	0,53
Fe ₂ O ₃	20,35	8,31	14,87	13,18	11,06	10,83	0,87	7,22	0,35	Нет
SiO ₂	14,89	18,91	17,98	15,17	15,94	16,76	37,42	13,31	35,19	38,25
Al ₂ O ₃	5,39	5,14	5,36	4,45	6,55	8,02	12,04	9,33	12,63	13,49
CaO	26,09	13,37	26,75	15,55	28,92	21,65	39,02	30,78	35,48	38,35
MgO	1,19	0,80	0,72	0,60	1,80	1,31	0,90	1,32	2,93	1,87
MnO	3,41	4,75	4,05	3,28	3,21	2,87	5,77	7,11	10,18	5,58
S	0,38	0,50	0,82	0,48	0,39	0,55	1,69	0,70	1,69	1,99
Сумма FeO+Fe ₂ O ₃	47,18	51,47	44,11	59,74	42,66	47,83	2,88	25,43	1,73	0,53

Следует особо отметить, что при цеховых производственных неполадках, не имеющих отношения к работе печи, а связанных с несвоевременной подачей чугуновозных и шлаковозных ковшей, доменную печь иногда переводили на тихий ход. В этом случае окислительная зона, как было показано выше, резко сокращалась и простиралась не далее 500 мм от глаза фурмы. В один из моментов такой работы печи на «снорте» была взята проба шлака на расстоянии 800 мм от глаза фурмы; шлак по внешнему виду был светлый, легкий. Анализ показал, что сумма закиси и окиси железа в нем составляет только 5,23%, тогда как на том же расстоянии в среднем составе шлака эта сумма равнялась 55,65%, а в отдельных пробах колебалась в пределах 45,13—65,42%.

Этот пример является ярким доказательством образования сильножелезистого шлака в окислительной области горна под воздействием кислорода дутья.

При исследовании древесноугольной доменной печи Ашинского завода были взяты отдельные пробы чугуна на горизонте фурм. Состав их приведен в табл. 78.

Таблица 78

Состав чугуна на горизонте фурм (%)

	Расстояние от глаза фурмы мм			
	300	500	600	при выпуске
C	0,46	2,16	—	—
Si	0,06	0,33	0,53	0,62
Mn	0,08	0,44	0,28	0,82
P	0,019	0,064	0,016	0,075
S	0,017	0,015	0,014	0,019

Вследствие загромождения горна большего количества проб взять не удалось. Анализ проб показывает, что чугун содержал незначительное количество кремния и марганца непосредственно за фурмами, при значительно большем содержании их в выпускаемом чугуне. По существу, чугун,

взятый на расстоянии 300 мм от глаза фурмы, представлял сталь, почти совершенно рафинированную от кремния и марганца. Так как горн был загроможден и перед выпусками чугун накапливался у фурм, то поступавшее через фурмы дутье проходило непосредственно над чугуном и происходил своеобразный процесс малого бессемерования.

По мере удаления от глаза фурмы, выгорание кремния и марганца уменьшалось и содержание их увеличивалось, но все же оставалось меньше, чем в конечном чугуне. Дальше, к оси горна, проб чугуна из-за загромождения горна взять не удалось.

В табл. 79 приведен состав отдельных проб шлака, взятых на горизонте фурм в различных точках по радиусу горна.

Таблица 79

Состав шлака на горизонте фурм (%)

	Расстояние от глаза фурмы, мм						
	300	400	400	500	500	500	600
FeO	19,13	11,24	20,55	9,57	11,24	32,40	38,91
Fe ₂ O ₃	4,46	3,23	6,89	5,09	1,80	31,14	2,49
SiO ₂	36,18	40,48	33,36	38,60	42,24	15,80	26,72
Al ₂ O ₃	10,69	15,27	10,97	14,93	13,09	8,05	8,58
CaO	20,09	20,58	19,34	21,57	23,50	7,69	16,22
MgO	4,96	5,28	4,54	5,58	5,20	2,40	4,62
MnO	2,24	3,20	2,84	3,02	2,45	2,07	1,88
Сумма FeO+Fe ₂ O ₃	23,59	14,47	27,44	14,66	13,04	63,54	41,40

Продолжение табл. 79

	Расстояние от глаза фурмы, мм					при выпуске
	600	700	700	1000	1000	
FeO	31,99	20,59	15,43	28,05	25,71	1,53
Fe ₂ O ₃	1,60	6,29	14,30	36,69	8,00	Нет
SiO ₂	34,52	33,92	33,08	15,12	30,68	46,24
Al ₂ O ₃	11,68	13,62	11,13	6,57	9,82	14,34
CaO	10,42	15,72	18,20	7,44	15,97	26,69
MgO	3,22	3,70	3,92	2,90	3,04	5,10
MnO	5,03	5,08	3,02	1,95	5,47	4,67
Сумма FeO+Fe ₂ O ₃	41,59	26,88	29,73	64,74	33,71	1,53

Из состава шлака видно, что в окислительной зоне горна, благодаря окислению железа кислородом дутья, образуются железистые шлаки. За пределами же окислительной зоны вследствие загромождения горна недовосстановленными материалами в шлаке сохраняется высокое содержание окислов железа, чего при нормальном состоянии горна не должно быть.

Приведенные выше многочисленные примеры состава чугуна и шлака в горне на горизонте фурм различных доменных печей с полной убедительностью показывают, что в окислительной зоне происходит процесс окисления углерода, кремния, марганца, фосфора и железа чугуна с образованием сильножелезистых шлаков. Процесс этот в одних случаях протекает более интенсивно, в других менее интенсивно; различные элементы чугуна выгорают по-разному. Зависит это в значительной мере как от хода процессов восстановления руд в вышележащих горизонтах доменной печи, так и от состава чугуна, приходящего к фурмам. Но во всех случаях окисление чугуна у фурм является неизбежным.

До фокуса горения окисление происходит более интенсивно, благодаря большей концентрации свободного кислорода в газе, за фокусом горения — менее интенсивно.

За пределами окислительной зоны горна шлак, как правило, содержит мало окислов железа.

Процесс окончательного формирования чугуна, так же как и обессеривание его, протекает ниже горизонта фурм. Высокие температуры горна способствуют весьма быстрому восстановлению сильножелезистых шлаков на пути от горизонта фурм до лещади.

Это подтверждают исследования Н. И. Красавцева [117], изучавшего в лабораторных условиях скорость восстановления

сильножелезистых шлаков, образующихся в окислительной зоне горна. Исследования показали, что при взаимодействии жидкого чугуна со шлаком, скорость восстановления окислов железа при температурах, существующих в горне ниже фурм, настолько велика, что процесс восстановления почти полностью заканчивается в течение нескольких минут.

Поэтому выпускаемый из горна доменной печи шлак в нормальных условиях всегда содержит ничтожное количество закиси железа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных нами в разные годы исследований можно прийти к следующим выводам.

1. Восстановление изучавшихся нами руд в современных мощных доменных печах начинается непосредственно в верхней части шахты. Дальнейшее развитие восстановительного процесса определяется составом пустой породы руд.

2. Восстановление магнитогорских руд, начинаясь в верхней части шахты, идет непрерывно, без замедления, и полностью заканчивается в основном в распаре. В распаре встречается очень мало руды, составной частью проб являются чугун, шлак, известь и кокс.

3. Восстановление руды на разных расстояниях от стен шахты на всех горизонтах идет весьма неравномерно, в зависимости от распределения газов и от физического состояния руд, загружаемых в печь; рудная мелочь всегда восстановлена больше, чем куски руды. Куски восстанавливаются с поверхности в глубину, и при полном восстановлении с поверхности внутренняя часть куска в большинстве случаев или совсем не восстановлена или восстановлена слабо.

4. Шлакообразование начинается несколько выше середины шахты; в пробах материалов, взятых с этого горизонта, ясно видны отдельные капли и кусочки шлака; очень часто пустая порода ошлакована с поверхности. Интенсивное шлакообразование происходит в нижней части шахты. Первичные шлаки бывают как мало железистые, так и со значительным количеством закиси железа.

5. Металл в жидком виде встречается уже в нижней части шахты. В распаре пробы металла представляют чугун, содержащий в различном количестве все составляющие конечного чугуна.

6. Известняк в шахте разлагается полностью и, превратившись в известь, находится в мелкораздробленном состоянии между кусками руды и кокса.

7. Восстановление криворожских руд начинается так же, как и магнитогорских, в верхней части шахты. До середины шахты процесс протекает весьма интенсивно. В нижней же части шахты и в распаре восстановление криворожских руд, по сравнению с магнитогорскими, замедляется и заканчивается только ниже распара. Объясняется это тем, что до горизонта распара не происходит шлакообразования и плавления пустой породы.

8. Неравномерность восстановления криворожских руд в различных местах на разных горизонтах такая же, как и магнитогорских; связано это с тем, что в разных точках по радиусу находится газ различного состава и температуры.

9. При понижении температуры дутья на 150—200° (с 750—800 до 600°) в распаре (при криворожских рудах) появляется шлак; это свидетельствует о том, что нагрев дутья, так же, как качество пустой породы руды, регулирует высоту зоны шлакообразования.

10. Исследования показали, что состав газа и температура его в различных точках по радиусу и на различных горизонтах в современных мощных доменных печах резко отличаются от состава газа и температуры его в малых печах со старым профилем. Многочисленные немецкие исследования не отражают сущности процессов, происходящих в современных доменных печах, и поэтому имеют малую теоретическую и практическую ценность. Что же касается американских исследований печей с современным профилем, то противоречия между составом газа и температурой его на различных горизонтах, а также определения степени восстановления руд, далекие от истинной, делают и эти исследования мало пригодными для теоретических и практических выводов о составе газа, температуре его и развитии восстановительных процессов на различных горизонтах доменных печей.

11. В американской и английской металлургической литературе господствуют следующие взгляды: 1) размеры окислительной зоны постоянны и не зависят от количества дутья, давления его и температуры; 2) у оси горна настолько низкая температура, что там существует недействительная («мертвая») зона, которая тем больше развита, чем больше абсолютный диаметр горна; 3) большие доменные печи технически менее совершенны и экономически менее рентабельны по сравнению с печами малых и средних размеров.

Взгляд этот основывается на исследованиях Кини, Леннингса и Рейнлендера, пользовавшихся неправильными методами и аппаратурой, что и привело их к порочным результатам и выводам.

12. Исследования современных мощных доменных печей Советского Союза показали, что размеры окислительной зоны находятся в прямой зависимости от количества дутья и давления его и в обратной зависимости от температуры дутья.

Состав газа, давление его и температура по радиусу горна на горизонте фурм указывают на вполне нормальное состояние горна современных мощных доменных печей и работу его по всему сечению.

Эти исследования показали несостоятельность взглядов заграничных металлургов на работу горна доменных печей, что свидетельствует о превосходстве в этой области советской металлургической науки перед иностранной.

13. Определять зависимость окислительной зоны от количества дутья, давления его и температуры можно только на одной и той же доменной печи, сохраняя постоянными все условия работы ее и меняя лишь одно из них. Показатели же размеров окислительной зоны различных доменных печей, работающих в разных условиях, могут быть весьма различны.

14. Противодействие газов в горне доменной печи, связанное с газопроницаемостью проплавленных материалов и состоянием горна, при нормальной работе печи падает от периферии до оси горна незначительно.

При одинаковом количестве дутья и постоянной газопроницаемости материалов противодействие газов в горне находится в прямой зависимости от давления дутья.

15. Впервые примененные для исследования мощных доменных печей в СССР графит-вольфрамовые термпары оказались вполне пригодными для измерения температуры горна по всему его радиусу.

Самая низкая температура горна на горизонте фурм современных мощных доменных печей находится у оси горна и при работе печи на передельный чугун колеблется в пределах 1370—1400°; от оси горна к периферии температура плавно повышается до наибольшей — 1900°, характеризующей фокус горения, в котором максимальная температура совпадает с максимальным содержанием углекислоты в газах.

16. Состав чугуна в горне на горизонте фурм в различных точках по радиусу не одинаков, причем в окислительной зоне происходит окисление углерода, кремния, марганца, фосфора и железа чугуна.

В современных больших доменных печах науглероживание чугуна, восстановление кремния и марганца и переход их в чугун совершается выше горизонта фурм.

Шлак на горизонте фурм в окислительной зоне горна является сильножелезистым, содержащим до 60% окислов железа; за пределами же окислительной области и ближе к оси горна шлак преимущественно маложелезистый, содержащий лишь несколько процентов окислов железа.

17. Кокс на горизонте фурм, вследствие потери части углерода выше горна и проникновения в поры кокса мельчайших частиц железа, содержит значительно больше золы и железа, чем загружаемый в доменную печь. На пути от колошника до фурм кокс теряет половину содержащейся в нем серы.

18. Образование недействительной («мертвой») зоны у оси горна наблюдается и в малых доменных печах; зависит это, как показали исследования ашинской древесноугольной доменной печи, только от методов ведения печи, а не от размеров горна.

19. Из всего изложенного вытекает, что при проектировании новых доменных печей можно безбоязненно увеличивать диаметр горна сверх 8,5 м, не опасаясь загромождения горна и образования недействительной зоны.

20. При работе доменной печи на дутье, обогащенном кислородом, скорость горения увеличивается по мере увеличения содержания кислорода и размеры окислительной зоны сокращаются. В фокусе горения содержание углекислоты резко увеличивается, и температура повышается.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Байков, «Металлург», 1926. № 3.
2. И. А. Соколов, О восстановимости железных руд, изд. 1, 1909; изд. 3, 1933; Сырые материалы доменной плавки, ч. 1, 1934.
3. Акад. М. А. Павлов, Металлургия чугуна, 1945, ч. 2, стр. 49.
4. Ф. Вюст. «Миттайлунген аус дем К. В. Инст. фюр Айзенфоршунг», 1924, 5.
5. В. Бон, Л. Рив, Г. Саундерс, «Джорнел оф Айрон энд Стيل Инститют», 1927, 1, 127; 1930, 1, 43; 1934, 1, 33.
6. Р. Шенк и Дингман, «Цайтшрифт фюр анорганише унд альгемайне Хеми», 1927, 113, 166. Р. Шенк, Р. Франц и Г. Виллике, «Цайтшрифт фюр анорганише унд альгемайне Хеми», 1929, 184, 1—38.
- Р. Шенк, Р. Франц, А. Цойман, «Цайтшрифт фюр анорганише унд альгемайне Хеми», 1932, 206, 129.
7. Мейер, «Миттайлунген аус дем К. В. Инст. фюр Айзенфоршунг», 1928, 107.
8. Г. Зигель, «Архив фюр дас Айзенхюттенвезен», 1930, 12, 557.
9. Е. Дипшлаг, М. Циллген, Г. Поттер, «Советская металлургия», 1933, 258.
10. Т. Джозеф, «Трансэкшнс оф Америкен Инститют Майнинг энд Металлурджикл Инджинирс», 1936, 120; «Новости иностранной металлургии», 1937, № 3, 8.
11. Проф. И. А. Соколов и инж. П. Н. Круглов, Исследовательские работы по металлургии чугуна, стали и железа, Свердловск, 1930, вып. IV.
12. Проф. И. А. Соколов и инж. Д. С. Хорунов, Изучение восстановимости агломератов Темир-Тау, «Кузнецстрой», 1934, № 1—2.
13. Проф. И. А. Соколов, инж. В. В. Куминов и П. И. Паско, «Известия Сибирского института металлов», 1935, т. 1, вып. 5.
14. Проф. И. А. Соколов, Доменный процесс, ГОНТИ, 1938, Свердловск, стр. 123.
15. Доц. А. С. Тумарев, «Металлург», 1933, № 3.
16. С. Т. Ростовцев, Ф. С. Таранов, Г. Е. Понюхно, Исследование руд КМА, Сборник, 1933.
17. А. Н. Похвиснев, М. С. Гончаревский, «Домез», 1934, № 7.
18. А. Н. Похвиснев, М. С. Гончаревский, «Домез», 1934, № 11—12.
19. А. Н. Похвиснев, М. С. Гончаревский, Восстановимость железных руд Кривого Ропа, ОНТИ, Харьков, 1935.
20. Л. М. Цылев, «Советская металлургия», 1935, № 9.
21. Проф. И. А. Соколов, В. В. Куминов, «Известия Сибирского института металлов», 1935, т. 1, вып. 5.
22. Проф. И. А. Соколов, Д. С. Хорунов, С. И. Голосов, «Труды Сибирского металлургического института», 1938.
23. Проф. И. А. Соколов, Д. С. Хорунов, А. И. Александров, «Труды Сибирского металлургического института», 1938.
24. Проф. И. А. Соколов и инж. В. В. Куминов, Восстановимость руд при высоких температурах, «Кузнецстрой», 1935, № 1—2.

25. Проф. И. А. Соколов, Доменный процесс, ГОНТИ, 1938, стр. 155—161.
26. М. М. Лейбович, «Металлург», 1936, № 2.
27. Акад. А. А. Байков, А. С. Тумарев, «Известия ОТН АН СССР», 1927, № 1.
28. Проф. А. Н. Похвиснев, Г. А. Воловик, «Теория и практика металлургии», 1937, № 2.
29. А. М. Зайцев, «Уральская металлургия», 1937, № 7.
30. Д. С. Хорунов, «Советская металлургия», 1937, № 9.
31. А. С. Тумарев, Сборник работ молодых ученых, 1940, стр. 28—40.
32. Л. И. Шушпанов, «Металлург», 1940, № 11—12, стр. 1—14.
33. Г. И. Чуфаров, А. П. Лохвицкая, Б. Д. Авербух, «ЖФХО», 1934, т. V.
34. Г. И. Чуфаров, Б. Д. Авербух, «Металлург», 1936, № 4; 1937, № 1.
35. Г. И. Чуфаров, Е. П. Татиевская, «ЖФХО», 1936, т. III.
36. Г. И. Чуфаров, А. Н. Куликов, «Металлург», 1937, № 3.
37. Г. И. Чуфаров, Е. П. Татиевская, «Металлург», 1940, № 7.
38. Г. И. Чуфаров, «Известия ОТН АН СССР», 1946, № 6.
39. Г. И. Чуфаров, Е. П. Татиевская, «Известия ОТН АН СССР», 1946, № 7.
40. А. П. Любан, «Известия ОТН АН СССР», 1943, № 9—10.
41. П. В. Гельд, О. А. Есин, «Сталь», 1946, № 7—8.
42. М. А. Павлов, Исследование плавильного процесса доменных печей Климковского завода, Екатеринбург, 1902.
43. И. А. Соколов, Технические исследования работы древесноугольных доменных печей, Екатеринбург, 1922.
44. Н. Метц, «Шталь унд Айзен», 1912, 1; «ЖРМО». 1912, ч. II, 517.
45. М. Левин и Г. Нидт, «Металлурджи», 1911, 515 и 555; «ЖРМО», 1911, ч. II, 442.
46. Шлезингер, «Шталь унд Айзен», 1911, 1182; «ЖРМО», 1911, ч. II, 456.
47. Г. Булле и В. Леннингс, «Хохофенхаузшус», 1926, Б. 78.
48. С. Кини, П. Ройстер и Т. Джозеф, «Бюллбюро оф Майнс», 1926, серия 2747.
49. И. Бом, «ЖРМО», 1928, ч. II.
50. С. Кини, «Бюро оф Майнс», техн. п. 442, 1929; «Домез», 1930, № 3, 4, 5, 6, 7.
51. И. З. Козлович, Я. М. Гольмшток, В. Т. Басов, И. П. Семик, «Советская металлургия», 1935, № 5—6.
52. Я. М. Гольмшток, «Советская металлургия», 1936, № 9.
53. В. Т. Басов, «Советская металлургия», 1936, № 10.
54. Я. М. Гольмшток, М. М. Лейбович, «Советская металлургия», 1937, № 6.
55. М. М. Лейбович, «Труды ЛИИ», 1938, № 6.
56. Л. М. Цылев, Н. Е. Новоселов, «Советская металлургия», 1937, № 8.
57. Акад. М. А. Павлов, Металлургия чугуна, ч. 2, Metallurgizdat, 1945, стр. 149.
58. Г. Шенк, Физико-химия металлургических процессов, 1935, ч. I, стр. 232.
59. И. П. Семик, «Советская металлургия», 1938, № 2.
60. М. Я. Остроухов, «Сталь», 1939, № 10—11.
61. А. Д. Готлиб, Нагрев дутья и расход кокса при выплавке чугуна, Metallurgizdat, 1947.

62. Б. И. Китаев, Теплообмен в шахтных печах. Металлургиздат, 1945, стр. 113; Теплообмен в доменной печи, Metallurgizdat, 1949, стр. 19.
63. В. Люйкен и Л. Кребер, Агломерация железных руд, Горго-
лнефтеиздат 1934, стр. 21.
64. З. Ф. Чуханов, Л. Н. Хитрин, С. Э. Хайкина и др. Сбор-
ник «Процесс горения угля», ГОНТИ, 1938.
65. Хаслам и Руссель, Топливо и его сжигание, ОНТИ, 1934.
66. Ауфгайзер, Топливо и его горение, Энергоиздат, 1933.
67. С. Э. Хайкина, «Журнал технической физики», 1930, т. 8, вып. 1.
68. С. Т. Ростовцев, Теория металлургических процессов, Метал-
лургиздат, 1945, стр. 117—127.
69. Н. В. Лавров, «Известия ОТН АН СССР», 1940, № 8.
70. Эбельман, «Анн. дес Майнс», 1841, т. XX; Веддинг,
«Аусфюрлихес Хандбук дер Айзенхюттенкунде», т. III, стр. 234.
71. Фан-Флотен, «Шталь унд Айзен», 1893, стр. 27.
72. Г. Пирот и С. Кини, «Трансекшнс оф Америкен Инститют
Майнинг энд Металлурджикл Инджинирс», 1923, 543; «ЖРМО», 1926, ч. 2,
стр. 256—261. С. Кини, П. Ройстер, Т. Джозеф, «Айрон Блэст,
Фарнес реакшнс, Техн. п.» 1927, 391. С. Кини, «Блэст Фарнес Сток
Колом. Техн. п.», 1929, 422; перевод «Домез», 1930, № 3, 4, 6.
73. В. Леннингс, «Архив фюр дас Айзенхюттенвезен», 1928, 540.
74. Р. Рейнлендер, «Архив фюр дас Айзенхюттенвезен», 1930,
№ 8, стр. 487—503; перевод «Гипромез», 1930, № 7, стр. 106—116.
75. Г. Эйхенберг и В. Эйлендер, Реферат «Советская метал-
лургия», 1933, № 10—11.
76. А. Михель, Реферат «Советская металлургия», 1933, № 12.
77. И. З. Козлович, «Советская металлургия», 1936, № 9; «Труды
ЛПИ», 1938, № 6; «Сталь», 1939, № 4, 5 и 6. И. З. Козлович,
Я. М. Гольмшток, В. Т. Басов, И. П. Семик, «Советская метал-
лургия», 1935, № 5—6. И. З. Козлович, Н. М. Якубцинер,
И. А. Горелик, «Советская металлургия», 1937, № 5.
78. З. И. Некрасов, «Теория и практика металлургии», 1936,
№ 7; 1938, № 4.
79. Н. И. Красавцев и А. П. Любан, «Советская металлургия»,
1937, № 5.
80. Л. М. Цылев, «Советская металлургия», 1937, № 2 и 5.
81. В. Т. Басов «Советская металлургия», 1936, № 10.
82. Д. С. Хорунов и А. П. Афанасьев, «Советская металлур-
гия», 1937, № 2.
83. Проф. И. А. Соколов и Н. Н. Круглов, «Уральская метал-
лургия», 1937, № 1.
84. Акад. М. А. Павлов, Металлургия чугуна, ч. 2, Metallurgiz-
дат, 1945, стр. 183.
85. А. П. Любан, «Сталь», 1946, № 9 и 10.
86. И. З. Козлович, «Советская металлургия», 1936, № 9.
87. Д. В. Ефремов, «Советская металлургия», 1937, № 7.
88. Ю. Р. Тишбейн, «Советская металлургия», 1937, № 4.
89. М. К. Гродзовский, Проблемы черной металлургии, сборник
XXIII, 1946.
90. Акад. М. А. Павлов, Металлургия чугуна, ч. 2, Metallurgiz-
дат, 1945, стр. 440.
91. В. Леннингс, Реферат «Новости иностранной металлургии»,
1935, № 4.
92. В. Леннингс, «Кислород», 1945, № 6.
93. А. С. Мак-Ки, «Айрон энд Стил Инджинир», 1935, № 1, реферат
«Новости иностранной металлургии», 1935, № 3.

94. Т. Джозеф, «Метелс Текнолоджи», 1946, № 3.
 95. Проф. А. И. Соколов, Доменный процесс, ГОНТИ, 1938.
 96. М. А. Шаповалов, «Теория и практика металлургии», 1940, № 1.
 97. М. А. Шаповалов, «Кислород», 1944, № 1.
 98. Проф. А. Н. Похвиснев, С. К. Трекало и Г. А. Воловик, «Теория и практика металлургии», 1938, № 5.
 99. Ле-Шателье, «Конт Рандю», 1892, СХІУ.
 100. П. Ройстер, Т. Джозеф, «Трансэкшнс оф Америкен Инститьют Майнинг энд Металлурджикл Инджинирс», 1919. П. Ройстер, «Трансэкшнс оф Америкен Инститьют Майнинг энд Металлурджикл Инджинирс», 1919, т. 62. Т. Джозеф, «Трансэкшнс оф Америкен Инститьют Майнинг энд Металлурджикл Инджинирс», 1925, т. 71.
 101. Джемс-Дейль, «Блэст Фарнес энд Стил Плэнт», 1945, № 5.
 102. Проф. И. А. Соколов, Доменный процесс, 1938, стр. 273—274.
 103. Проф. И. А. Соколов, Советская металлургия, 1936, № 4.
 104. В. А. Сорокин, Устройство и оборудование доменных цехов, 1944, стр. 227.
 105. Н. М. Якубцинер и М. М. Ворович, Вольфрамо-графитовый пирометр, Металлургиздат, 1945.
 106. Г. Ватсон и Г. Абрамс, «Трансэкшнс оф Америкен Электрокэмикл Сосайти», 1928, 54.
 107. Н. М. Якубцинер и М. М. Ворович, «Труды ЛИИ», 1938, № 6.
 108. А. П. Любан, «Известия ОТН АН СССР», 1941, № 4.
 109. А. П. Любан, «Известия ОТН АН СССР», 1941, № 6.
 110. П. Гладкий, «Горный журнал», 1890, ч. II, стр. 329.
 111. Л. Белл, «Принсиплес», стр. 171.
 112. Ф. Вюст, «Металлуржи», 1910, 403; «Шталь унд Айзен», 1926, 1213; 1927, 1009; 1928, 109; 1928, 319; 1928, 1084; «ЖРМО», 1927, ч. 2; 1928, 505; 1928, ч. 2, 319.
 113. С. Кини, Р. Ройстер, Т. Джозеф, «Техн. Бюро оф Майнс», 1926, 397.
 114. Х. Банзен, «Архив фюр дас Айзенхюттенвезен», 1929, т. 4.
 115. Г. Эйхенберг, «Архив фюр дас Айзенхюттенвезен», 1929, т. 5.
 116. А. Мунд, С. Штеккер и В. Эйлендер, «Шталь унд Айзен», 1931, т. 48; «Советская металлургия», 1932, № 2.
 117. Н. И. Красавцев, «Известия ОТН АН СССР», 1941, № 5.

Редактор В. В. Жолобов

Технический редактор И. П. Щедрина

Сдано в производство 14/XI — 1950 г. Подписано к печати 24/V — 1951 г.

Бумага 60 × 92¹/₁₆ — 9,38 б. л. — 18³/₄ п. л.

Учет. изд. л. 18,90

Зн. в п. л. 40,040

Т-04027

Тираж 3000 экз.

Заказ 1373

Цена 15 р. 30 к.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
41	1 св.	шихты	шахты	Тип.
44	1 сн.	шахт	шахты	Корр.
99	12 св.	таблица 1	таблица 18	Тип.
119	4 св.	S	SO ₂	Авт.
122	5 св.	11,0	11,6	„
122	18 сн.	13,0	13,6	„
160	1 сн.	рис.	стр.	Корр.
169	12 св.	μ	η	Авт.
169	16 св.	μ	η	„
169	9 сн.	μ	φ	„
169	1 сн.	μ _{ср}	φ _{ср}	Корр.

При обнаружении дефекта в
книге просим вернуть ее
вместе с этим ярлыком для
обмена.

Типография Металлургиздата,
Москва, 51, Цветной бульвар, д., 30.

Контролер № 8

