

**Товаровский Иосиф Григорьевич**

**Курс познания процессов  
доменной плавки**

**Учебное пособие**

**Москва  
Издательство Нобель Пресс**

УДК 62-63  
ББК 30.6  
Т50

**Товаровский Иосиф Григорьевич**  
Т50 Курс познания процессов доменной плавки: Учебное пособие / Товаровский Иосиф Григорьевич – М.: Lennex Corp, — Подготовка макета: Издательство Нобель Пресс, 2013. – 320 с.

**ISBN 978-5-458-71974-2**

Целью настоящего издания является обобщение знаний о процессах доменной плавки в форме, доступной как для студентов металлургических специальностей, так и для специалистов, желающих углубить свои знания в области теории доменной плавки, для последующего использования в творческой работе по развитию металлургической отрасли. Эволюционное развитие металлургической технологии, относимой иногда к “консервативным”, приносит плодотворные результаты, не менее значимые, чем самые “радикальные” новые технологии. На такой основе следует формировать новые подходы к её освоению и обучению персонала. С этой целью в настоящей книге предпринята попытка рассмотрения развития технологии и познания процессов в большой системе “доменная плавка” в контексте диалектического развития и системной идеологии. Как учебное пособие, она предназначена не взамен аналогичных, а для их дополнения творческими компонентами познания с целью углубления знаний широкого круга специалистов о процессах доменной плавки.

**ISBN 978-5-458-71974-2**

© Издательство Нобель Пресс, 2013  
© Товаровский Иосиф Григорьевич, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Введение в предмет познания .....</b>	<b>4</b>
1.1. Общие положения .....	4
1.2. Схема доменной плавки (ДП) и функциональные особенности элементов комплекса доменной печи (ДП) .....	5
1.3. Основные атрибуты современной технологии доменной плавки .....	7
<b>2. Формирование технологии и основ теории ДП .....</b>	<b>10</b>
2.1. Предистория .....	10
2.2. Становление и развитие .....	18
2.3. Обобщение опыта и начало теоретического осмысления процессов .....	32
<b>3. Тепло- и массообмен .....</b>	<b>55</b>
3.1. Поступление и усвоение теплоты, тепловые балансы .....	55
3.2. Теплообмен в ДП .....	65
3.3. Восстановление железа .....	84
<b>4. Механика противотока материалов и газов .....</b>	<b>99</b>
4.1. Движение материалов .....	99
4.2. Газомеханика .....	110
4.3. Формирование противотока в процессе загрузки шихты .....	118
<b>5. Генерация энергии и формирование продуктов плавки .....</b>	<b>129</b>
5.1. Образование и функционирование фурменных очагов .....	129
5.2. Изменение фазового состояния шихтовых материалов .....	135
5.3. Параметры коксовой насадки, фильтрация и эвакуация продуктов плавки .....	149
<b>6. Развитие расчетных методов анализа процессов .....</b>	<b>157</b>
6.1. Анализ реальных доменных плавков .....	157
6.2. Прогноз показателей плавки .....	158
6.3. Особенности моделирования процессов .....	160
6.4. Система анализа и прогноза показателей и процессов ДП .....	161
<b>7. Системный анализ процессов .....</b>	<b>190</b>
7.1. Общие принципы функционирования доменной плавки .....	191
7.2. Феноменологическая характеристика доменной плавки .....	196
7.3. Аналитическое исследование и познание процессов доменной плавки .....	205
7.4. Альтернативы развития многофункциональной энерго-металлургической технологии .....	223
<b>8. Методические материалы (приложение) .....</b>	<b>230</b>
8.1. Методика составления балансов железа по агломерации, окомкованию и производству чугуна .....	230
8.2. Анализ показателей реальной технологии с учётом невязок балансов .....	242
8.3. Прогнозная оценка показателей плавки .....	256
8.4. Нормативы расхода кокса и производительности доменной печи .....	271
8.5. Результаты расчетной оценки на модели ИЧМ влияния отдельных факторов на показатели ДП .....	280
<b>Библиографический список .....</b>	<b>286</b>

## **1. ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ ПОЗНАНИЯ**

### **1.1. Общие положения**

Облик современной цивилизации определяется использованием в качестве основного конструкционного материала порядка 2,5 млрд тонн железа, в получении которого из руд ключевое значение имеет доменная плавка.

Доменному производству предшествовало производство железа в горнах и низкошахтных печах с принудительной подачей дутья в рабочее пространство, а до этого железо получали на кострах, в глиняных горшках или тиглях и в ямах без искусственной подачи дутья.

Трехтысячелетняя эволюция этой технологии вплоть до XIV века н.э., последующее появление доменного производства и его развитие в течение почти шести веков до наших дней стимулированы потребностью общества в конструкционных материалах при непрерывном сокращении ресурсной базы их производства. Противоречие между возрастанием потребности материалов и сокращением ресурсной базы их производства определяет логику развития технологии получения железа. Осмысление этой логики в ходе анализа технических аспектов развития металлургии железа может быть основой научной оценки перспектив ее дальнейшего развития.

Решение указанной задачи является одной из составляющих содержания настоящей книги и выполнено автором путем обобщения известных, но несистематизированных материалов, а также собственных разработок. При этом не ставилось задачи подробного изложения теории и практики доменной плавки и бескоксового получения железа, а сделана попытка рассмотрения эволюции этих технологий и знаний о присущих им процессах. Рассмотрение и изучение материалов в такой форме способствует более глубокому осмыслению процессов с формированием системной идеологии, которая является основой для анализа, прогноза и планирования развития металлургии железа в целом и технологии доменной плавки в частности.

Традиционно сложившийся подход к анализу доменной плавки основан на детальном изучении отдельных его явлений (тепло- и массообмена, газо- и гидродинамики, механики движения и характера превращений шихтовых материалов и др.) с последующим использованием выявленных закономерностей для определения возможных и желаемых тенденций в развитии процессов и управления ими. Такой подход является плодотворным, однако не вполне достаточным для полного познания процессов с целью совершенствования технологии.

Изучение отдельных, даже наиболее существенных, явлений в изолированном виде не может дать оснований для окончательных выводов относительно всего процесса в целом, а дает лишь исходный материал для последующего анализа. Это обусловлено тем, что доменная плавка в целом является не простой совокупностью отдельных явлений, а сложной функцией их связей, природа которых сложнее самих явлений и включает свойства, не присущие отдельным явлениям. Указанные особенности процессов доменной плавки позволяют характеризовать ее как большую систему в современном понимании.

Анализ технологий получения чугуна, альтернативных доменной плавке показал, что автономные агрегаты, являющиеся, по существу, фрагментами доменной печи, не имеют преимуществ в производстве массового металла. Энергетические, экологические, экономические характеристики и интегральные оценки малококсовой доменной плавки превосходят характеристики всех известных способов прямого получения железа. Таким образом, доменная плавка остается определяющим технологическим

модулем черной металлургии, развитие которого будет формировать облик всего металлургического комплекса с последующим переходом в бескоксовую доменную плавку. Такое развитие доменной плавки настолько укрепляет ее определяющие позиции в металлургии, что в обозримой перспективе альтернативных путей не предвидится.

При изложении материалов по доменному производству и анализе литературных материалов авторы испытывают затруднение в использовании термина “доменный процесс”, широко применяемого в доменном производстве. Затруднение связано с тем, что понятие “доменный процесс” включает как подчиненные понятия “процесс теплообмена в доменной печи”, “процесс восстановления железа”, “процессы в фурменных очагах” и множество других. Исходя из этого, автор настоящей книги счел целесообразным употреблять вместо термина “доменный процесс” термин “доменная плавка”, понимая под ним большую систему, которая включает различные процессы как составные части, но не является простой их совокупностью, а квалифицируется как качественно новое образование.

Автор выражает благодарность за сотрудничество соавторам своих предыдущих книг и публикаций, материалы которых использованы в настоящей монографии с существенными реконструктивными изменениями при дополнении их новыми материалами.

В основу архитектоники данной книги положено использование системного подхода к предмету и диалектических начал в познании, которые образно могут быть проиллюстрированы высказываниями одного из классиков философии:

*“Истинное есть целое. Но целое есть только та сущность, которая завершается через свое развитие.” “Понять вещь – это значит знать историю вещи..”*

*Г.В.Ф. Гегель (1770-1831)*

Интерес и значимость предложенной формы рассмотрения доменной плавки предстоит оценить пользователям книги, а достоверность выводов и прогнозов – времени.

## **1.2. Схема доменной плавки (ДП) и функциональные особенности элементов комплекса доменной печи (ДПК)**

Современная доменная печь представляет собой комплекс систем оборудования и технологии, обеспечивающий выплавку чугуна из специально подготовленных железорудного сырья и кокса, а также твердых добавок в шихту и газообразных, жидких и твердых измельченных добавок к дутью. В состав комплекса входят:

1. Система шихтоподачи и загрузки шихты, обеспечивающая транспортирование шихты из бункеров на колошник и её дозирование с последующим распределением по площади колошника в соответствии с заданной программой.
2. Система подачи дутья, обеспечивающая компримирование, нагрев, транспортирование и дозирование дутьевых компонентов.
3. Система эвакуации и транспортирования жидких продуктов плавки к местам их переработки и складирования.
4. Система эвакуации, очистки и транспортирования газообразных продуктов плавки к местам их потребления.

Собственно доменная печь в разрезе по вертикали представляет профиль из ряда сопряженных между собой конусов и цилиндров (рис. 1.1), называемых: колошник (цилиндр), шахта (конус), распар (цилиндр), заплечики (обратный конус), горн (ци-

линдр) с установленными по его окружности фурмами для подачи дутья и летами для выпуска чугуна и шлака.

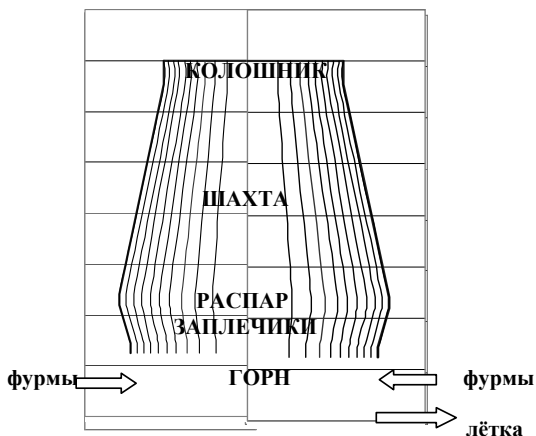


Рис. 1.1. Элементы профиля доменной печи.

Шихта загружается в ДП чередующимися слоями железорудного сырья и кокса. Загрузка осуществляется порциями по мере освобождения объема в результате горения кокса у фурм, окисления углерода кислородом шихты и растворения его в чугуне, газификации кислорода шихты и плавления материалов. Гравитационное движение материалов от колошника к горну происходит в противотоке с поднимающимся из горна к колошнику газом.

Поднимающиеся от фурменных очагов горячие восстановительные газы с примешивающимися к ним газами от окисления углерода кислородом шихты пронизывают столб шихты, передавая шихте тепловую и химическую энергию, необходимую для формирования чугуна и шлака. Опускающаяся шихта в противотоке нагревается, отдает кислород и подвергается фазовым превращениям с образованием чугуна и шлака.

На ДП, сооруженных до середины XX века, комплекс систем и оборудования включает:

- вагон-весы для дозирования и транспортирования сырья из бункеров к подъемнику и скиповый подъем материалов по наклонному мосту на колошник с последующей загрузкой в печь с помощью конусного загрузочного устройства;
- блок воздушнонагревателей с комплексом оборудования для нагрева дутья до 800 - 900 °С и вдувания в ДП через 12-20 фурм (в зависимости от размеров ДП);
- летки для выпуска чугуна (1), шлака (2) и оборудование для их обслуживания, а также система желобов для транспортирования и разделения чугуна и шлака при выпуске и разливке в ковши;
- система очистки и транспортирования колошникового газа к местам потребления, в том числе к воздушнонагревателям.

### 1.3. Основные атрибуты современной технологии ДП

На ДП, сооруженных в 70-х годах и к концу XX века, указанный выше комплекс систем и оборудования существенно усовершенствован и включает:

- транспортную систему подачи и дозирования сырья из бункеров с отсевом мелких фракций (- 5 мм) и подъемом освобожденных от мелочи материалов на ковшник наклонным конвейером; загрузку шихты в ДП бесконусным загрузочным устройством с лотковым распределителем, открывающим широкие возможности распределения материалов по площади ковшника;

- блок воздушонагревателей с комплексом оборудования для нагрева дутья до 1200 - 1300 °С, добавки в дутье кислорода, азота, а также топливных компонентов (газообразных, жидких, твердых измельченных) и вдувания в ДП через 12-42 фурм (в зависимости от размеров ДП); систему подготовки и распределения по окружности ДП твердотопливных компонентов дутья;

- летки для выпуска чугуна (4 по окружности печи), шлака и оборудование для их обслуживания (пушки, буры и др.), а также систему желобов для транспортирования и разделения чугуна и шлака при выпуске и разливке в ковши и установку грануляции шлака;

- систему очистки и транспортирования ковшникового газа к местам потребления, в том числе к воздушонагревателям.

Основные параметры современной технологии ДП приводятся в таблице 1.1. в виде показателей работы некоторых доменных печей ПАО «АрселорМитталКривойРог» (далее «АМКР») и Corus IJmuiden (Нидерланды) в характерные периоды.

Таблица 1.1. Показатели работы некоторых доменных печей в характерные периоды

ПОКАЗАТЕЛИ	АрселорМитталКривойРог			Corus IJmuiden	
	ДП-7	ДП-8	ДП-9	ДП-6	ДП-7
Объем, м <sup>3</sup> (полез. или раб.)*	2000 (п.)	2700 (п.)	5000 (п.)	2328 (р.)	3790 (р.)
Диаметр горна, м. (площадь, м <sup>2</sup> )	9,75 (74,65)	11,0 (95,0)	14,7 (169,7)	11,0 (95,0)	13,8 (149,5)
Количество фурм, шт	24	28	42		42
Количество леток чугуна	1	2	4	4	4
Производство чугуна, т/сут.	3400	4420	9826	8228	10886
То же, на 1 м <sup>2</sup> площ. горна	45,5	46,5	57,9	86,6	72,8
Расходы, кг/т чуг.: кокса	473,7	472	426,8	256	277
кускового антрацита	37,1	17,4	56,0	-	-
пылеугольного топлива	-	-	-	253	233
природного газа, м <sup>3</sup> /т	82,1	79,2	87,1	-	-
Дутьё: температура, °С	1057	984	1090	1165	1249
содержание кислорода, %	25,5	25,2	30,5	38,3	33,7
Кол-й газ: температура, °С	270	270	93	106	141
давление, кПа	91	134	139	166	209
Перепад: дутьё-кол-к, кПа	147	148	198	170	181
Количество шлака, кг/т чуг.	453	491	402	199	214

В шлаке: CaO/SiO <sub>2</sub>	1,17	1,20	1,22	1,17	1,17
MgO, %	5,7	6,0	5,0	10,1	9,5
В чугуна, %: Si	0,72	0,71	0,84	0,41	0,44
S	0,019	0,20	0,025	0,027	0,030
Температура чугуна, °C	1450	1450	1500	1500	1500
В коксе, %: зола	12	12,2	11,2	11,8	11,8
сера	0,9	0,89	0,63	0,6	0,6
показатель прочности CSR	41	42	55	65-70	65-70
Фр-я -5 мм в агломерате, %	10	10	8	5	5

\*В России и Украине прямо сравнивать полезный объем (между уровнями загрузки и леток чугуна), в других странах – рабочий объем (между уровнями загрузки и фурм).

Более высокая производительность и меньший расход топлива на ДП Cogus Jmuiden определяется прежде всего высоким уровнем подготовки сырья и кокса.

Для иллюстрации температурно-концентрационных полей ДП на рис. 1.2 приводятся изотермы шихты и газа, а также изолинии зоны размягчения и плавления (ЗРП) для одного из периодов работы ДП-9 «АМКР», полученные расчетом на модели, разработанной в Институте черной металлургии НАН Украины.



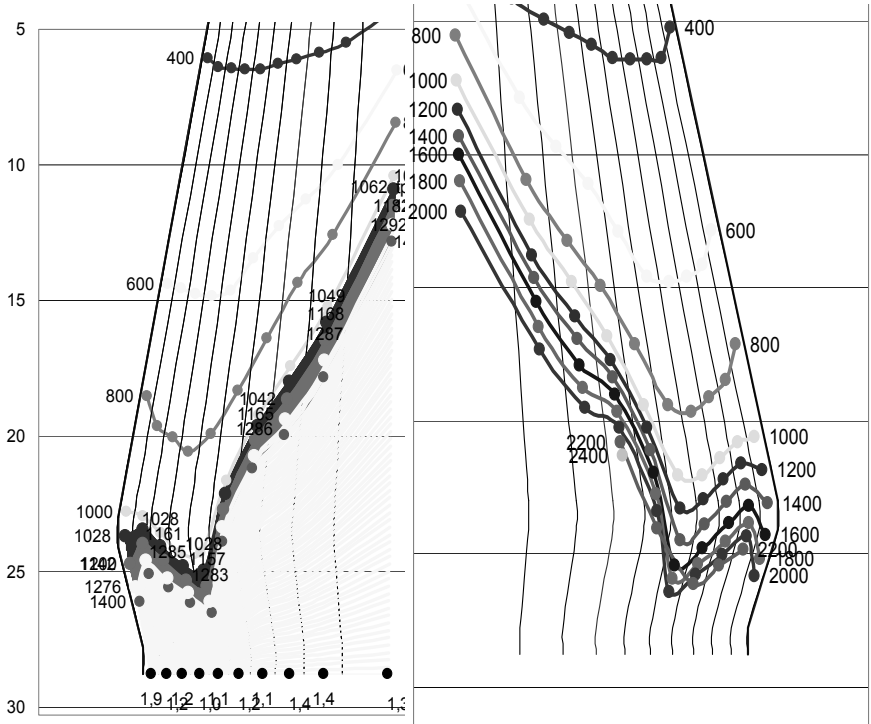


Рисунок 1.2. Изотермы шихты (слева) и газа (справа), зона размягчения и плавления (ЗРП, слева) по радиусу (горизонталь) и высоте (вертикаль) ДП. Внизу по радиусу слева – толщина ЗРП, м. По вертикали – расстояние от нулевого уровня загрузки.

*“ Задача теории заключается в конструировании существующего исключительно в нас отражения внешнего мира, которое должно служить путеводной звездой во всех наших мыслях и экспериментах. “*

*Л. Больцман (1844-1906)*

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОСНОВ ТЕОРИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

### 2.1. Предыстория

Возникновение доменного производства относят обычно к середине XIV века. Ему предшествовал почти 25-вековой период (со II тысячелетия до н.э.) получения железа сыродутным способом, который можно считать предысторией доменного производства. Сущность этого способа изучалась по описаниям археологов и наиболее обстоятельно изложена Д.К. Черновым [1] и А.А. Байковым [2].

Приводим описание сыродутного способа в изложении Д.К. Чернова.

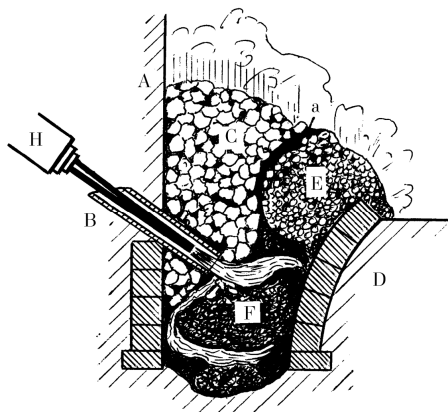


Рис. 2.1. Схема сыродутного процесса

Возьмем одно из простейших устройств для получения железа из руд – сыродутный каталонский горн, изображенный на рис.2.1 и представляющий небольшое углубление квадратной или прямоугольной формы (шириной и длиной около 70-80 см, глубиной около 40-50 см), прилегающее к стенке А, за который помещается кожаный мех Н, доставляющий воздух в горн через наклонную фурму (сопло) В. Средине горна заполняется древесным углем С, а со стороны D, противоположной фурме, засыпается отсеянная от мелочи руда Е. Для лучшего разграничения руды от угля поверхность первой покрывается слоем смоченной и плотно прибиваемой угольной мелочи. Во время дутья из фурмы на раскаленный уголь этот последний сгорает непосредственно около фурмы в углекислый газ, который, распространяясь по дальнейшей массе раскаленного угля и, превращаясь в углеродную окись, направляется большей частью сквозь слой довольно рыхло лежащей руды; при этом происходит восстановление железа при помощи окиси углерода, о котором мы говорили раньше.

Руда по мере восстановления сдвигается ниже, подводится под дутье в фокус горения, где восстановленное железо нагревается до температуры сваривания и где происходит вытапливание шлаков.

При дальнейшем притоке сюда восстановленной руды рабочий скатывает железный ком, постоянно нарастающий; получается железная крица F, пропитанная, как губка, постоянно вытапливающимися шлаками.

По мере накопления известного количества шлаков они выпускаются через шлаковое отверстие около дна горна. Так как восстановление железа при таких условиях не может достигаться в полной мере, кроме того, и восстановленное железо отчасти окисляется под воздействием свежей струи воздуха около фурмы, то естественно, что шлаки содержат большое количество железных окислов, и таким образом происходит значительный угар железа.

Когда вся засыпь руды будет переработана, собираются отдельные, не соединившиеся с крицей, куски железа в оставшемся шлаке и присоединяют их к крице; затем последнюю вытаскивают из горна, обжимают под молотом и после расчески на 3-4 куска проваривают в сварочном горне и проковывают в полосы. Горн, по вынутии крицы, освобождают от шлаков, очищают и приступают к следующей операции.

Весь процесс продолжается около 5-6 час; в горнах вышеуказанного размера за один раз обрабатывается около 15-18 пудов руды. Для горнов почти вдвое большей величины, где за один раз перерабатывается до 500 кг (30 пудов) руды, наблюдения дают следующие числа: продолжительность процесса 6 час, причем испаряется около 100 кг воды, идущей на смачивание угольной мелочи и мелкой руды; воздуха вдвухается около 2800 кг (около 7,7 кг в минуту); угля сжигается 545 кг (около 4 куб. м); прокованных полос железа получается около 152 кг. Средним числом, на 100 кг железной полосы сжигается 340 кг древесного угля; 100 кг руды, содержащей 44,6 % железа, дают 31 кг железной полосы; следовательно, угар составляет  $(44,6-31) / 44,6 = 0,305$  или 30,5 % содержащегося в руде железа.

Понятно, что такой потери не могла выдержать все больше и больше развивавшаяся железная промышленность, когда начали преследоваться экономические интересы производства; небольшая производительность таких маленьких печей делала рабочую плату большим налогом на производство, так как на одного рабочего приходилась очень малая доля продукта. Расход угля был чрезвычайно большой вследствие весьма значительной потери теплоты, уносимой продуктами горения и лучеиспускания в пространство из открытого мелкого горна.

Все подобные обстоятельства привели к тому, что этот маленький открытый горн стал постепенно расти, преимущественно увеличиваться в высоту; в одном и том же аппарате стала увеличиваться производительность и уменьшаться потеря теплоты; таким образом и непосредственные расходы на приготовление железа и накладные, вследствие уменьшения количества рабочей силы и возрастания производительности, стали уменьшаться. Появился род небольших шахтных печей, называвшихся крестьянскими (в Швеции, Финляндии), еще выше строились печи в Германии, в Штирии, Каринтии, получившие там название штучных печей. Эти штучные печи, в свою очередь, также увеличивались в размерах; вместе с тем увеличивалась и их производительность; но так как последняя тесно связана с количеством теплоты, развиваемой в печи в данную единицу времени, а следовательно, и с количеством угля, сжигаемого в ту же единицу времени, то прямым последствием явилась необходимость вдвухать в печь все большее и большее количество воздуха под более усиленным давлением и с большею затратою механической силы. Для того дутья, которое требовалось в небольшой сыродутный горн, в былые времена, пожалуй, достаточно было силы мальчика или девочки, помогавших в работе отцу, теперь же не только силы взрослого

рабочего было недостаточно, но уже нескольких человек было мало, - потребовались топчак и ворота, наконец, была применена водяная сила, до тех пор служившая лишь для действия мельниц. Наконец, после штучных печей появились так называемые “блаофены” и “флоссофены”, которые были больших размеров, нежели штучные печи.

Здесь я хотел бы обратить ваше внимание на то, какими изменениями в процессе восстановления, сварки и плавки сопровождался рост этих печей и какие изменения происходили в качествах получаемых продуктов. В маленьком сырודутном горне так называемый “фокус горения” занимает очень небольшой объем, приток воздуха незначительный, количество горящего угля тоже небольшое; непосредственно под фурмой происходит полное горение, - здесь уголь сгорает в углекислый газ, развивается высокая температура, которая и необходима для сваривания лежащего около фурмы куска железа. Далее, на очень незначительном расстоянии от фурмы, углекислый газ под влиянием большого количества раскаленного угля превращается в углеродную окись, но как это превращение связано с поглощением большого количества теплоты, то в близком соседстве с фокусом горения быстро падает температура. Такой быстрый переход весьма благоприятен для данного процесса потому, что в районе очень высокой температуры, в прикосновении с раскаленным углем, как сказано было раньше, железо могло бы значительно обуглеродиться, если бы тому не воспрепятствовал избыток углекислого газа, отчасти и свободного кислорода в этом районе. Раннее вступление в эту жаркую область горна железо могло лишь восстановиться вполне из окисла при помощи углеродной окиси, которая действует сильно восстанавливающим образом при более низких температурах, когда обуглероживающее действие твердого угля очень слабо или даже вовсе не обнаруживается. Таким образом, при быстром переходе из области сравнительно низкой температуры в жаркую часть горна железо лишается защиты углеродной окиси от окисления, а это последнее не допускает железо до обуглероживания твердым углем в жарком поясе горна, где оно лишь сваривается в компактную массу и освобождается от оплавливающихся пустых пород и шлаков.

При этом необходимо иметь в виду, что здесь восстановление совершается почти исключительно в районе действия углеродной окиси, а не твердого углерода; это обстоятельство имеет то весьма важное значение, что углеродная окись действует восстановительно или, по крайней мере, вполне восстанавливает из руды лишь одно железо, оставляя в окисленном состоянии кремний, и марганец, и фосфор. Вот почему сырודутный горн вообще дает чистое, высоких качеств сварочное железо даже в тех случаях, когда руда содержит довольно много фосфора.

*(Конец изложения Д.К. Чернова).*

Анализ, выполненный А.А. Байковым, базировался на следующих материалах:

1) описание производства сырודутного железа в Якутском округе в районе рек Ботомы и Лютенги (около 100 км юго-восточнее Якутска), составленное А.А. Гайдучком (ЖРМО, 1911, №3, стр. 292);

2) описание такого же производства в той же области по берегам р. Вилюя (западнее г. Якутска), составленное Ф.П. Славинским во время этнографической экспедиции Академии Наук в 1928 г. (неопубликованная рукопись);

3) образцы железных руд, шлаков, криц и готовых изделий, доставленные из обих указанных мест; образцы эти были подвергнуты химическим и металлографическим исследованиям, результаты которых не были опубликованы.