

И.Г.Товаровский, А.Е.Меркулов

**ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНО-КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ
В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ВЫПЛАВКЕ
ПЕРЕДЕЛЬНОГО И ЛИТЕЙНОГО ЧУГУНА**

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

На основе математического моделирования выявлены особенности процессов доменной плавки при выплавке разных видов чугуна – пердеельного и литейного. Установлены особенности распределения температурно-концентрационных полей. Показано, что при переходе с пердеельного на литейный чугун в ДП происходит перемещение температурно-концентрационных полей в направлении снизу вверх высокотемпературных зон, уменьшается теплоотдача газа и экономия топлива от применения различных энергосберегающих мероприятий.

Ключевые слова: доменная плавка, литейный, пердеельный чугун, температурные поля.

Развитие теории доменной плавки, в том числе теории теплообмена в доменной печи, основывалось на изучении процессов при выплавке пердеельного чугуна – наиболее массового. Проблемы технологии другого массового вида чугуна – литейного рассматривались меньше и отдельно.

Целью настоящей работы является попытка рассмотрения технологий доменной плавки в рамках общей теории доменного процесса. Для этого использовали разработанную в ИЧМ НАН Украины математическую модель доменной плавки (ММДП) [Товаровский И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки. Днепропетровск: Журфонд, 2015. – 912 с.], позволяющую определять параметры в прогнозном режиме.

В качестве базового принят период работы ДП-9 ПАО «ArcelorMittal Кривой Рог» в лучший период работы при выплавке пердеельного чугуна (октябрь 2006). Показатели аналогичного периода при выплавке литейного чугуна с содержанием кремния 3%, а также периодов с понижением температуры дутья Тд до 790⁰С, содержания кислорода О₂ до 23,5% и увеличением расхода природного газа ПГ до 187 м³/т получены расчетом по модели. В табл.1 приводятся результаты расчета показателей, а на рис.1-2 – графическая интерпретация изменений температурно-концентрационных полей в рабочем объеме ДП.

Изложение основных результатов исследования. Сопоставление температурно-концентрационных полей в рабочем объеме ДП для вариантов выплавки пердеельного и литейного чугуна (рис.1) показало следующее.

1. Изотермы газа в точках с повышенной рудной нагрузкой (РН) смещаются вверх, что наиболее отчетливо проявляется на низкотемпературных изотермах ($< 900^{\circ}\text{C}$).

Таблица 1. Показатели работы доменной печи

Показатели/Периоды	База	Т _д =790	О=23,5	ПГ=187	База	Т _д =790	О=23,5	ПГ=187
Сорт чугуна	П	П	П	П	Л	Л	Л	Л
Производительность, т/м ³ ·сут	1,91	1,79	1,70	1,73	1,77	1,69	1,62	1,61
Расход топлива, кг/т	483	525	474	428	538	580	519	495
Дутье: расход, м ³ /мин.	6674	7116	7529	6727	6988	7390	7797	6985
температура, °С	1090	790	1090	1090	1090	790	1090	1090
кислород, %	30,5	30,5	23,5	30,5	30,5	30,5	23,5	30,5
Природный газ, м ³ /т	87,1	87,1	87,1	187,1	87,1	87,1	87,1	187,1
Колошниковый газ:								
температура, °С	81	141	163	168	189	192	201	217
содержание, % СО	29,1	29,1	24,2	27,1	29,2	29,5	24,4	28,3
СО ₂	19,8	19,0	17,0	16,5	19,1	18,2	16,5	15,6
Н ₂	7,7	7,2	6,6	13,9	7,3	6,9	6,4	13,2
Железо в шихте, %	55,2	55,2	55,2	55,2	57,2	57,2	57,2	57,2
Рудная нагрузка, т/т	3,68	3,39	3,75	4,14	3,07	2,85	3,18	3,34
В чугуне, %:								
кремний	0,84	0,84	0,84	0,84	3,0	3,0	3,0	3,0
марганец	0,34	0,34	0,34	0,34	0,36	0,36	0,36	0,36
сера	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
углерод	4,74	4,74	4,74	4,74	4,74	4,74	4,74	4,74
В шлаке, %:								
кремнезем	37,0	37,4	37,0	36,8	35,1	35,5	34,9	34,7
глинозем	8,7	8,9	8,7	8,6	12,2	12,4	12,1	12,0
известь	45,0	45,4	45,0	44,7	42,6	43,1	42,4	42,2
магнезия	4,7	4,7	4,7	4,8	6,2	6,1	6,2	6,2
сера	1,0	1,1	1,0	0,9	1,5	1,6	1,5	1,4
Основность шлака	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Кол-во шлака, кг/т	416	419	417	414	302	304	300	299
Т _{теор.} , °С	2219	2085	2019	1840	2268	2120	2049	1914
Фурменный газ, м ³ /т	1502	1684	1765	1852	1668	1837	1908	2017
Сух. колошн. газ, м ³ /т	1607	1775	1865	1829	1766	1927	2006	2013
rd, %	35,9	30,8	35,3	21,4	27,5	24,2	28,8	17,0
η _{СО+Н₂} , %:	40,5	39,5	41,2	37,8	39,6	38,1	40,3	35,5
Приход тепла, кДж/кг	4425	4551	4743	4456	5020	5042	5194	5046
Потребность тепла, кДж/кг	3899	3829	3911	3397	4146	4117	4206	3780
Теплопотери, кДж/кг	302	289	324	519	295	287	316	509
Теплотворность кол. газа, кДж/м ³	4513	4458	3786	4933	4473	4487	3775	5004

2. Возрастает разность температур газа и шихты в верхних горизонтах ДП, а границы зон теплообмена (точки перегиба кривых разности температур газа и шихты по высоте) смещаются вниз. Возрастает рекуперативная функция верхней ступени теплообмена.

3. В зонах повышенных РН увеличивается толщина зоны размягчения и плавления (ЗРП).

4. За счет увеличения количества восстановительных газов сокращается степень прямого восстановления.

В целом картина перестройки технологии на выплавку литейного чугуна выглядит как расширение снизу вверх высокотемпературных зон с увеличением температуры колошникового газа и соответствующим уменьшением теплоотдачи газа в ДП. Последнее приводит к сокращению экономии кокса от различных мер по сбережению теплоты.

Рассмотрим процесс подробнее, иллюстрируя результаты расчетов данными табл.2 и рис.1 и 2.

Таблица 2. Изменение расхода кокса ΔK , производительности $\Delta П$, температуры колошникового газа ΔT_k , степени прямого восстановления Δr_d и теплопотерь доменной печи Δq_L при увеличении температуры дутья T_d , содержания в нем кислорода O_2 и расхода природного газа ПГ

Параметр и его диапазон	Вид чугуна	ΔK , кг/т (%)	$\Delta П$, %	ΔT_k , °C	Δr_d , %	Δq_L , %
Тд: 790-1090 °C	П	-42 (-8,7)	+6,7	-60	+5,0	+3,0
	Л	-41 (-7,6)	+4,7	-4	+3	+2
O ₂ : 23,5-30,5 %	П	+9,3 (+2)	+12,2	-82	+0,3	-6
	Л	-20 (-3,8)	+9,8	-10	-4,5	-5
ПГ: 87-187 м ³ /т	П	-55 (-11,4)	-9,4	+88	-14,5	+4,87
	Л	-43(-8)	-9,4	+39	-10,5	+4,22

Повышение температуры дутья и содержания в нем кислорода приводят к характерному, наблюдаемому на рис.1 и 2 увеличению скорости охлаждения газа (град/м) в противотоке. В случае увеличения расхода ПГ наблюдается уменьшение указанной скорости. В первом случае сокращается температура колошникового газа и увеличивается теплоотдача газа в ДП, во втором - теплоотдача уменьшается.

Трансформация верхней ступени теплообмена при добавке температуры и кислорода в дутье происходит в направлении сокращения рекуперативной функции и «вырождения» при некотором уменьшении толщины ЗРП в зонах повышенной РН. При добавке ПГ трансформация идет в обратном направлении.

При выплавке пердедельного и литейного чугуна процессы идут аналогично, а результативность по экономии кокса (Δk , %) и приросту производительности ($\Delta П$, %) больше для пердедельного:

- при повышении T_d на каждые 10° : $\Delta k = 0,29$, $\Delta П = 0,22$ против $\Delta k = 0,25$ и $\Delta П = 0,16$ для литейного;

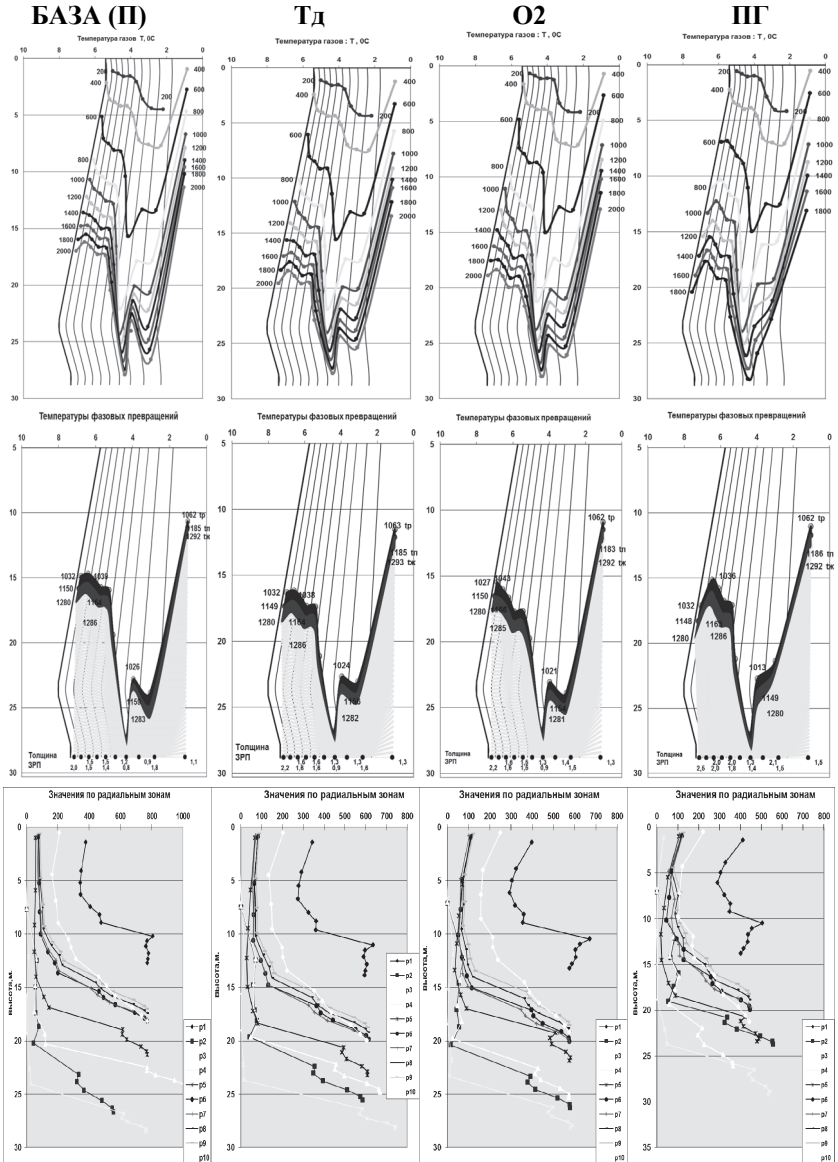


Рис.1. Изотермы газа в объеме ДП (верхние графики) при выплавке передельного чугуна, разность температур газа и шихты (нижние) и положение зоны размягчения и плавления (средние). Температура начала размягчения – $t_{р}$, плавления – $t_{п}$, жидкофазного течения – $t_{ж}$

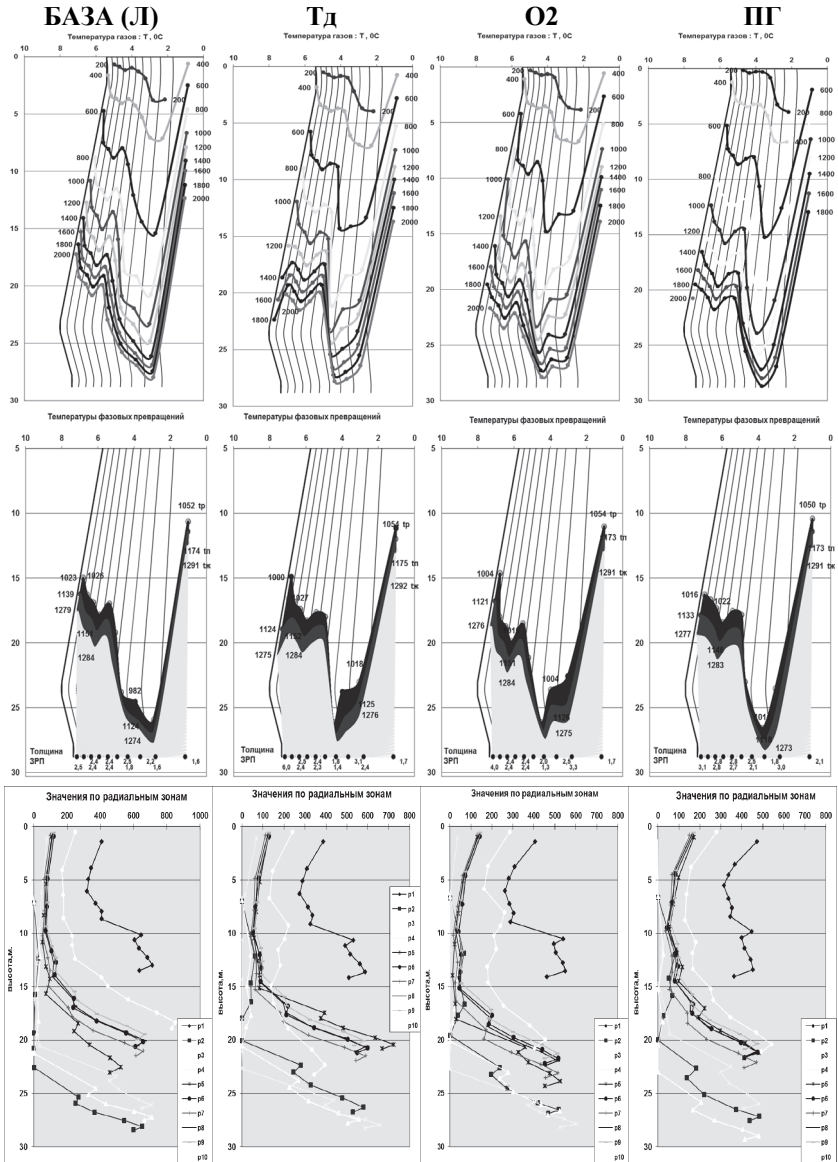


Рис.2. Изотермы газа в объеме ДП (верхние графики) при выплавке литейного чугуна, разность температур газа и шихты (нижние) и положение зоны размягчения и плавления (средние). Температура начала размягчения – t_p , плавления – $t_{п}$, жидкофазного течения – $t_{ж}$

- при повышении O_2 на каждый 1% : $\Delta k = -0,29$ (перерасход), $\Delta П = 1,8$ против $\Delta k = 0,52$ и $\Delta П = 1,4$ для литейного;

- при повышении ПГ на каждый 1 м^3 : $\Delta k = 0,55$ кг, $\Delta П = -0,09\%$ (сокращение) против $\Delta k = 0,43$ кг и $\Delta П = -0,09\%$ (сокр-е) для литейного.

Особенности температурно-концентрационных полей ДП при выплавке передельного и литейного чугуна определяют не только величину влияния параметра на расход кокса, но, в случае кислорода, также знак. Так, увеличение O_2 в случае передельного чугуна способствует перерасходу кокса $0,29 \text{ \%/\%}$, а в случае литейного – экономии $0,52 \text{ \%/\%}$.

Закключение. На основе математического моделирования процессов доменной плавки выявлены их особенности при выплавке разных видов чугуна – передельного и литейного. Установлено, что при переходе с передельного на литейный чугун происходит перестройка температурно-концентрационных полей в направлении перемещения снизу вверх высокотемпературных зон, включающее:

- смещение вверх изотерм газа в точках с повышенной рудной нагрузкой при возрастании разности температур газа и шихты в верхних горизонтах ДП и смещении вниз границы зон теплообмена, что отражает возрастание рекуперативной функции верхней ступени теплообмена;

- увеличение толщины зоны размягчения и плавления в зонах повышенных рудных нагрузок и общее сокращение прямого восстановления за счет увеличения количества восстановительных газов.

Интегральный результат перестройки технологии на выплавку литейного чугуна выражается в уменьшении теплоотдачи газа в ДП и сокращении сбережения горючего от применения различных мер.

Показано, что при добавке температуры дутья, природного газа и кислорода процессы трансформации температурно-концентрационных полей ДП при выплавке передельного и литейного чугуна проходят аналогично с большей конечной эффективностью для передельного. Особенности этих полей определяют не только величину влияния параметра на расход кокса, но, в случае кислорода, также и знак.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. Д.Н. Тогобицкой*

I.G.Товаровський, О.Є.Меркулов

Особливості температурно-концентраційних полів у робочому просторі доменної печі при виплавлянні передільного і ливарного чавуну

На основі математичного моделювання виявлено особливості процесів доменної плавки при виплавці різних видів чавуну - передільного і ливарного. Встановлено особливості розподілу температурно-концентраційних полів. Показано, що при переході з передільного чавуну на ливарний у ДП відбувається переміщення температурно-концентраційних полів у напрямку високотемпературних зон знизу вгору, зменшується тепловіддача газу та економія палива від застосування різних енергозберігаючих заходів.

Ключові слова: доменна плавка, ливарний та передільний чавун, температурні поля.

I.G.Tovarovsky, A.E.Merkulov

Features temperature and concentration fields in a blast furnace in the smelting of pig iron and foundry

Features blast furnace processes identified on the basis of mathematical modeling for various types of cast iron - pig and cast. Features of the distribution of temperature and concentration fields are set. It is shown that the transition from pig to the cast iron in BF there is a moving temperature and concentration fields in the upward direction of high temperature zones, reduced heat transfer gas and fuel savings from the use of various energy-saving measures.

Keywords: blast-furnace smelting, f cast and pig iron, temperature fields.