

И.Г.Товаровский, А.Е.Меркулов

ОЦЕНКА ХОДА ПРОЦЕССОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Расчетно–аналитическое исследование режимов доменной плавки с помощью многозонной модели процессов доменной плавки позволило оценить ожидаемые показатели перспективных технологий, а также определить направление изменений процессов в объеме доменной печи и наметить пути их реализации.

Постановка проблемы. Исследование выполнено на основе разработанной ранее методики многозонного расчета показателей и процессов доменной плавки в объеме доменной печи [1,2] с целью выявления особенностей протекания процессов в различных режимах и их совершенствования по мере сокращения расхода кокса.

Для анализа использованы показатели работы доменных печей объемом 5500 м³ ОАО «Северсталь» (ССт) и 5000 м³ ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (Кр.Рог) в характерные периоды их работы. При этом в соответствии с указанной выше методикой фактические показатели скорректированы исходя из обязательной сходимости балансов железа, шлакообразующих и газифицированных элементов. Отвечающее заданным параметрам загрузки шихты распределение рудных нагрузок (РН) в радиальных кольцевых зонах (РКЗ) на колошнике (относительно общей РН) в этом периоде было следующим:

№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РН _{ССт}	0,45	1,03	1,15	0,97	0,98	1,04	1,08	1,14	1,20	1,24
РН _{Кр.Рог}	0,58	1,21	0,70	0,70	0,91	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31

Изложение основных материалов исследования. Рассмотрены прогнозируемые режимы доменной плавки (табл. 1) с отклонением от базового по следующим параметрам:

- температура дутья 1200⁰С и 1300⁰С (реально достижимая в перспективе);
- отключение природного газа (ПГ) и замена его коксовым газом (КГ) при сохранении обогащения дутья кислородом;
- вдувание пылеугольного топлива (ПУТ 170–200 кг/т) при существующем обогащении дутья кислородом (с O₂), вдуванием КГ;
- совершенствование параметров загрузки шихты на колошник при комплексном применении перспективных решений путем создания увеличенной проницаемости осевой зоны за счет подачи в эту зону кокса улучшенного качества (+КЦ) и рационального перераспределения рудных нагрузок (+РН) в промежуточных радиальных кольцевых зонах (РКЗ).

В табл.1 приведены основные расчетные показатели плавки в указанных режимах, а на рис.1–4 – характеристики процессов в объеме доменной печи. В табл.1 в последней строке показаны №№ вертикальных температурных зон (ВТЗ) и РКЗ, где достигнуты близкие к нулю разности температур газа и шихты ($T_{г}-T_{ш}=\Delta T_{\min}$). На рис.3,4: t_p , $t_{п}$, $t_{ж}$ – температуры начала размягчения, плавления и ожигения шихты соответственно. Толщина ЗРП считается от начала размягчения до начала полного ожигения.

При увеличении температуры дутья до 1300°C экономия составит 1,2 кг/т на каждые 10° температуры дутья, а до 1200°C – 1,5 кг/т на каждые 10° температуры дутья, соответствующее увеличение производительности печи при увеличении температуры дутья составит – 0,15% и 0,21% на каждые 10° температуры дутья.

В случае увеличения температуры дутья температуры в шахте и на колошнике (рис.1) уменьшаются, а в заплечиках и прифурменной зоне увеличиваются. Температуры газов над уровнем засыпи материалов (табл.2) соответственно смещаются, но параллельного смещения температурной кривой не наблюдается в связи со спецификой теплообмена и перетока газов в разных РКЗ, особенно периферийной и осевой.

Зона размягчения и плавления (ЗРП) по мере увеличения температуры дутья смещается в нижние высокотемпературные горизонты печи (рис.3), что более благоприятно для использования энергии газов в твердофазной области столба шихты. Однако в РКЗ с повышенной рудной нагрузкой толщина ЗРП увеличивается, что может тормозить реализацию возможностей лучшего использования газов. В указанных РКЗ может достигать предельных параметров также процесс теплообмена. Поэтому одним из условий достижения высокой экономии кокса от нагрева дутья является нахождение рационального распределения РН. В рассмотренных пределах изменения температуры дутья критических значений параметров теплообмена и ЗРП не наблюдается. Лишь высокое значение теоретической температуры горения при температуре дутья 1200°C может вызвать необходимость добавки в дутьё доступных восстановительных газов или влаги.

К числу перспективных решений можно отнести технологию доменной плавки с заменой природного газа (ПГ) коксовым (КГ). При отключении ПГ и сохранении обогащения дутья кислородом резко увеличивается температура у фурм и в нижних горизонтах печи при уменьшении температур в шахте и на колошнике. Одновременно в нижних горизонтах возрастает теплопотребление шихты за счет увеличения прямого восстановления, что осложняет устойчивость процессов и приводит к вырождению верхней ступени теплообмена. Рациональным режимом работы без ПГ является режим вдувания коксового газа. При этом сохраняются и улучшаются все показатели и параметры процессов плавки (табл.1, рис.1, 3).

Наибольшего сокращения расхода кокса можно достичь при вдувании пылеугольного топлива (ПУТ). Однако реализация технологии вдувания

ПУТ до 200 кг/т чугуна взамен ПГ при сохранении остальных параметров осложнена резким увеличением теоретической температуры горения и температур в нижних горизонтах печи при похолодании шахты. Для эффективного использования технологии вдувания ПУТ необходима корректировка режима, в частности вдувание коксового газа до 100 м³/т. В этом случае расход кускового топлива (кокс+антрацит) сократится до 350 кг/т для печи объемом 5000 м³ и до 284 кг/т для печи объемом 5500 м³.

Важнейшим условием успешной реализации технологии с вдуванием ПУТ до 200 кг/т чугуна является улучшение прочностных свойств шихты, особенно кокса. По мере сокращения доли кокса в столбе шихты потребуются специальная организация работы осевой зоны и рациональное перераспределение рудных нагрузок во всех РКЗ. Первое решается загрузкой к оси печи кокса улучшенного качества (вариант +КЦ), второе – уменьшением РН в наиболее нагруженных РКЗ за счет их увеличения в менее нагруженных (вариант +Р_Н). В последнем случае использовали следующее рациональное РР_Н, отличающееся от исходного (см. выше):

№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»										
РН _{ИСХ}	0,58	1,21	0,70	0,70	0,91	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31
РН _{РАЦ}	0,58	1,0	0,80	0,80	0,91	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31
ОАО «Северсталь»										
РН _{ИСХ}	0,45	1,03	1,15	0,97	0,98	1,04	1,08	1,14	1,20	1,24
РН _{РАЦ}	0,55	1,0	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089	1,045	1,0

Применение такого приема в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» позволяет дополнительно сократить расход кокса и увеличить производительность печи (табл. 1) за счет стабилизации хода процессов в различных РКЗ: увеличивается осевой поток газов, сближаются температуры в промежуточных РКЗ, понижается положение ЗРП с увеличением области твердофазного восстановления и теплообмена (рис. 2, 4).

Результаты расчета для условий ОАО «Северсталь» показали, что достижение расхода кокса 284–253 кг/т при вдувании ПУТ 170 кг/т и КГ 100 м³/т с применением необходимых в этом случае высококачественных сырья и кокса формирует критические условия по теплообмену и близкие к предельным условиям по восстановлению для всей печи в целом, что ужесточает требования к качеству управления процессами, особенно распределением материалов на колошнике.

Таблица 1. Основные расчетные показатели доменной плавки при различных газодутьевых режимах

ПОКАЗАТЕЛИ	База ССт	База КрР	Т _{дутья} , °С		КП=160 м ³ /т		ПУТ=170–200 кг/т:			
			ССт	КрР	ССт	КрР	ССт	КрР	+КЦ +РР _H	
									ССт	КрР
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Удельн. произ-сть, т/м ³ сут	1,832	1,691	1,863	1,744	1,868	1,699	1,787	1,717	2,019	1,824
Расход кокса, кг/т	422	473	408	451	444	474	284	316	275	261
Расход антрацита, кг/т	0,0	50,8	0,0	48,4	0,0	50,9	0,0	34,0	0,0	28,0
Температура дутья, град.	1184	1042	1300	1200	1184	1042	1184	1042	1184	1200
Кислород в дутье, %	25,1	29,74	25,1	29,74	25,1	29,74	25,1	29,74	25,1	29,74
Расход природного газа, м ³ /т	106	80,8	106	80,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Расход коксового газа, м ³ /т	0,0	0,0	0,0	0,0	160	160	100	100	100	150
Расход ПУГ, кг/т	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	200	200	170	200
Температура кол. газа, °С	245	225	244	216	240	226	281	257	103	207
Содерж-е в кол. газе, %: CO	22,0	27,98	21,7	27,47	22,2	27,79	21,12	26,10	19,9	24,14
CO ₂	20,1	20,47	20,6	21,25	20,6	20,07	22,07	22,11	23,97	22,76
H ₂	7,1	5,84	7,2	5,99	6,6	6,93	5,70	6,01	5,55	8,20
Железо в шихте, %	59,65	55,14	59,68	55,17	59,61	55,14	59,96	55,40	59,98	55,50
Количество шлака, кг/т	270	410,5	269	410	271	411	262	404	261	401
Теор. темп-ра горения, °С	2017	2238	2073	2315	2120	2229	2076	2182	2058	2107
Кол-во сух. кол. газа, м ³ /т	1663	1740	1601	1651	1618	1731	1542	1621	1399	1500
Прямое восст-е оксида Fe, %	27,19	32,75	27,94	33,60	29,59	31,88	29,3	29,77	31,0	25,49
Степень использ-я CO+H ₂ , %	47,71	42,20	48,62	43,58	48,19	41,88	51,11	45,83	54,7	48,48
Общий приход тепла, кДж/кг	4366	4761	4360	4716	4413	4743	4411	4656	3943	4339

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Потребность тепла, кДж/кг	3211	3874	3222	3885	3275	3853	3211	3741	3221	3610
Теплосодержание кол. газа	709,4	692	683,9	633	679,2	697	739	722	243	546
Остаточное тепло (потери)	446	196	453	198	459	193	461	193	479	183
Отн-е теплоемкостей потоков	0,79	0,821	0,82	0,856	0,84	0,819	0,81	0,801	0,851	0,805
№№ ВТЗ / РКЗ, где $\Delta T_{\min}=1$	3 / 9	3 / 9	4 / 9	6 / 9	4 / 9	3 / 9	1 / 10	3 / 9	1 / 3-9	3 / 9

Таблица 2. Распределение температуры газа ($^{\circ}\text{C}$) над уровнем материалов на колошнике в РКЗ № 1–10 для разных вариантов технологий

Варианты /№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
База Кр. Пор	338	181	277	281	229	185	173	165	158	351
Кр.Пор $T_{\text{д}}=1200^{\circ}\text{C}$	305	182	247	250	208	182	173	169	168	325
ССт $T_{\text{д}}=1300^{\circ}\text{C}$	575	251	216	269	264	243	231	214	194	185
Кр.Пор КГ=160 м ³ /т	336	181	276	280	229	185	173	166	160	351
ССт КГ=160 м ³ /т	568	250	217	269	264	242	230	215	195	186
База ССт	556	251	219	272	267	243	230	216	196	184
ССт ПУТ=200, КГ=100	818	316	252	344	337	306	286	255	212	76
Кр.Пор ПУТ=200, КГ=100	311	209	266	270	215	214	201	195	168	319
ССт ПУТ=170, КГ=100 +КЦ+РР _Н	508	207	54	58	55	56	57	57	79	135
Кр.Пор ПУТ=200, КГ=100 +КЦ+РР _Н	523	177	210	212	194	215	205	202	166	321

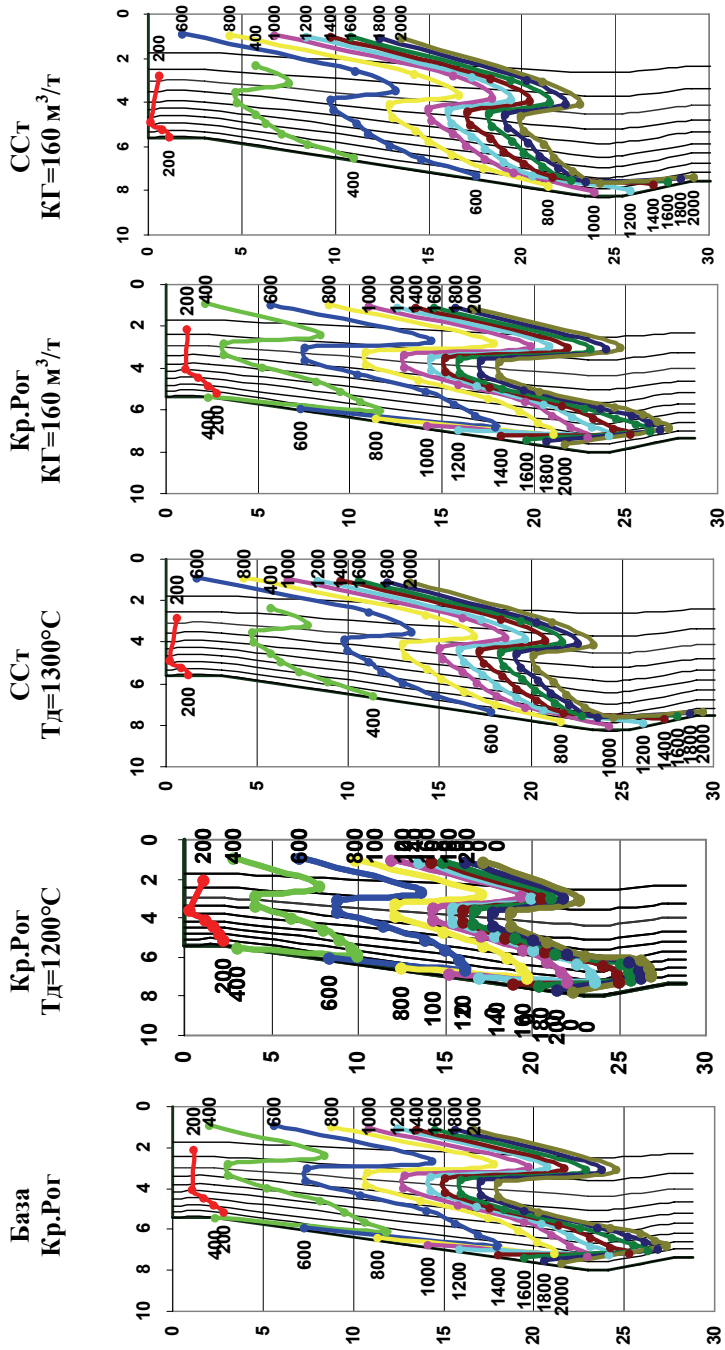


Рис.1. Изотермы газа в объёме доменной печи при различных газодутьевых параметрах: по вертикали – расстояние от верха печи («технологический ноль»), по горизонтали – расстояние от оси печи, м.

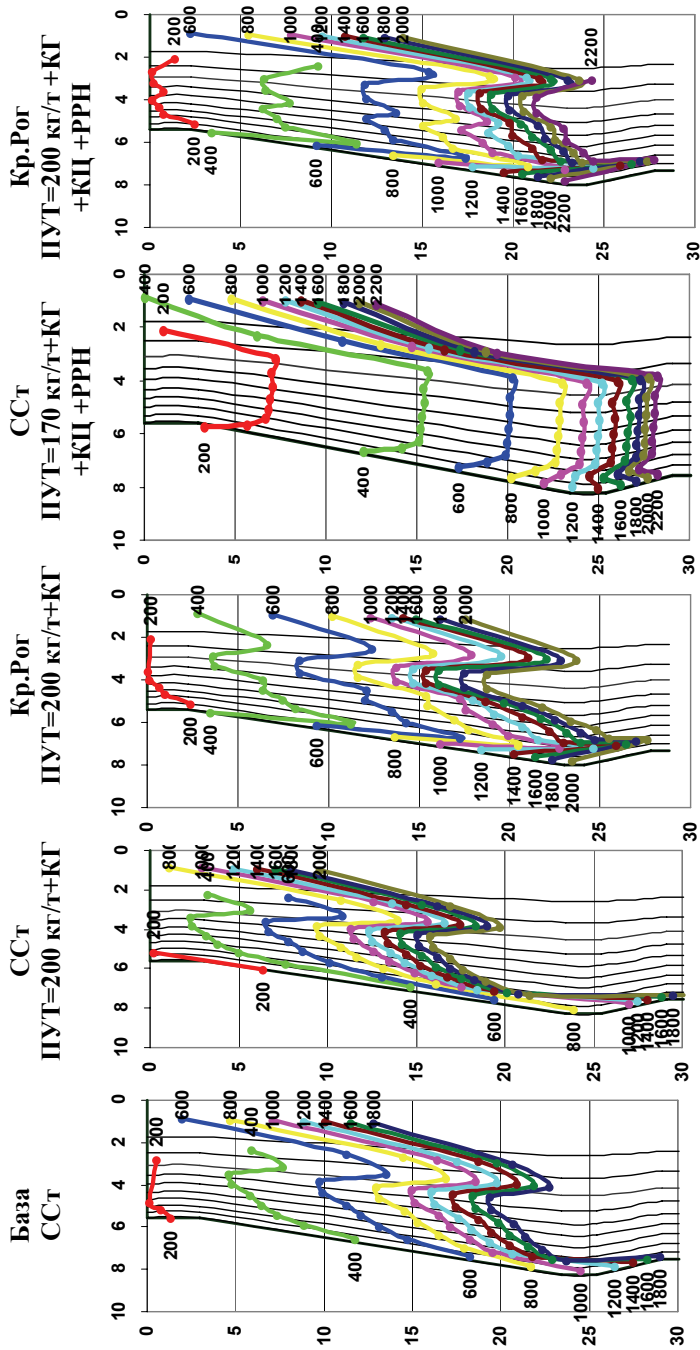


Рис.2. Изотермы газа в объёме доменной печи при различных газодутьевых параметрах:

по вертикали — расстояние от верх печи («технологический ноль»), по горизонтали — расстояние от оси печи, м.

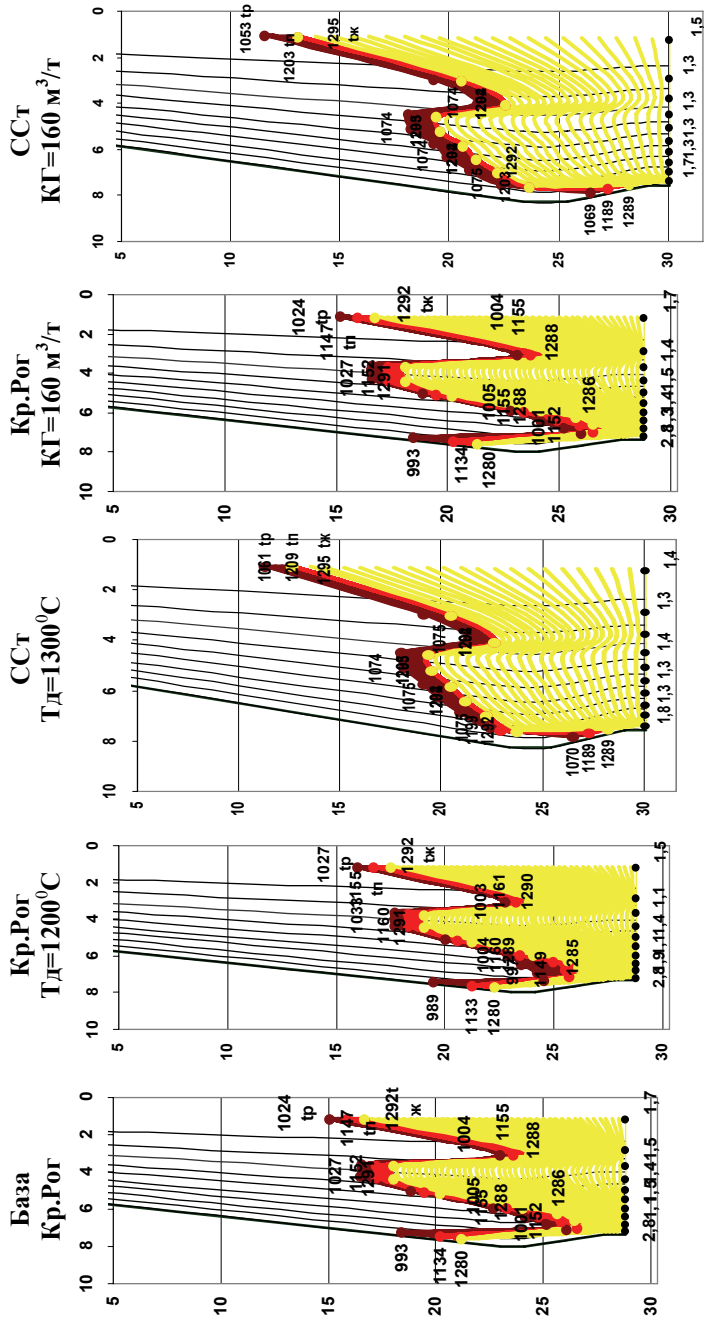


Рис.3. Зона размягчения и плавления в объёме доменной печи при различных газодутьевых параметрах: по вертикали – расстояние от верха печи («технологический ноль»), по горизонтали – расстояние от оси, м, внизу – толщина ЗРП, м.

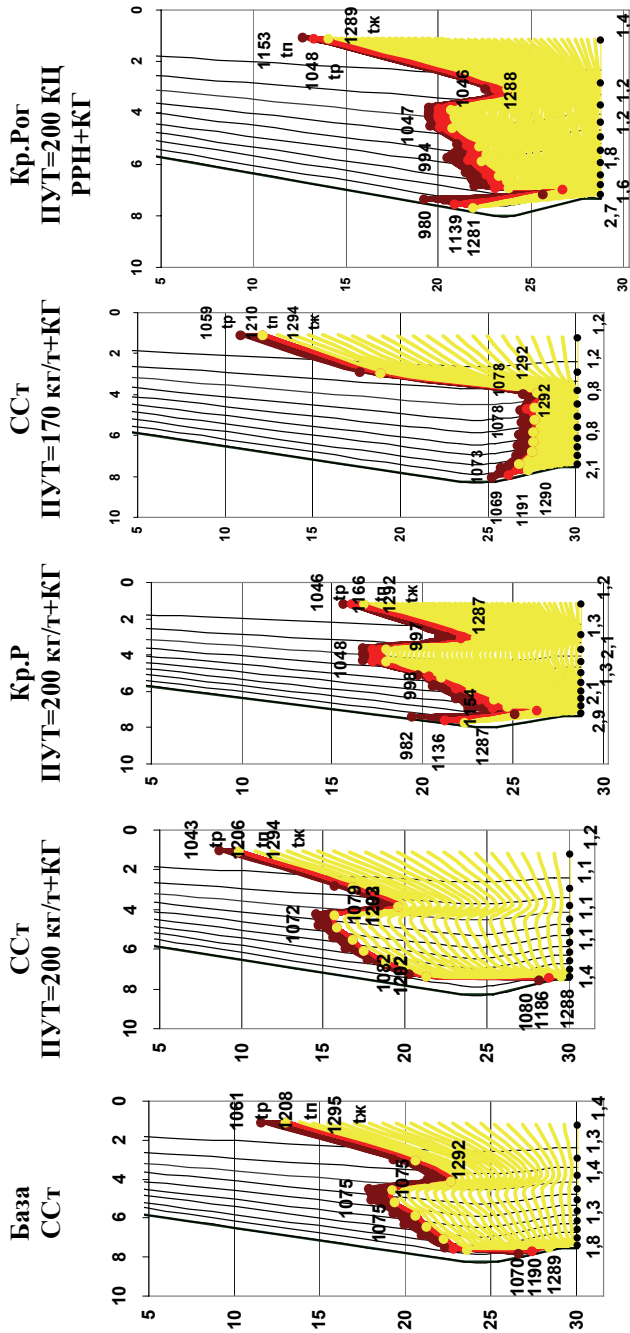


Рис. 4. Зона размягчения и плавления в объёме доменной печи при различных газодутьевых параметрах. по вертикали – расстояние от верха печи («технологической ноль»), по горизонтали – расстояние от оси, м, внизу – толщина ЗРП, м.

Заключение. Расчетно–аналитическое исследование режимов доменной плавки с помощью многозонной модели процессов доменной плавки позволило оценить для условий ОАО «Северсталь» и ОАО «Арселор-Миттал Кривой Рог» не только ожидаемые показатели перспективных технологий, но также определить направление изменений процессов в объеме доменной печи и наметить пути преодоления возможных затруднений при их реализации.

По мере сокращения доли кокса в столбе шихты потребуется улучшение его прочностных свойств и специальная организация работы осевой зоны печи, а также рациональное перераспределение рудных нагрузок во всех радиальных зонах. Первое решается загрузкой к оси печи кокса улучшенного качества, второе – уменьшением рудных нагрузок в наиболее нагруженных зонах за счет их увеличения в менее нагруженных.

Показано, что возможное достижение на доменной печи объемом 5500 м³ расхода кокса 284 кг/т при вдувании ПУТ 170 кг/т и КГ 100 м³/т с применением необходимых в этом случае высококачественных сырья и кокса формирует критические условия по теплообмену и близкие к предельным условия по восстановлению для всей печи в целом, что ужесточает требования к качеству управления процессами, особенно распределением материалов на колошнике.

1. *Товаровский И.Г.* Системный анализ показателей доменной плавки // Познание процессов доменной плавки. Коллективный труд под ред. В.И.Большакова и И.Г.Товаровского. – Днепропетровск: «Пороги», 2006. – С.296–321.
2. *Совершенствование* распределения рудных нагрузок на основе комплексного анализа процессов в объеме доменной печи / И.Г.Товаровский, В.И.Большаков, Д.Н.Тогобицкая, А.Ф.Хамхотько // Бюллетень «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация». – 2008.– № 7.– С.10–15.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук А.В.Бородулиным