



**В. Б. Охотский** /д. т. н./, **А. Д. Зражевский**  
**Л. С. Молчанов** /к. т. н./

ПО «Металлургпром»  
Национальная металлургическая академия  
Украины, г. Днепро, Украина

## Обобщение технологического опыта операции доводки стали

**V. B. Okhotskiy /Dr. Sci. (Tech.)/,**  
**A. D. Zrazhevskiy**  
**L. S. Molchanov /Cand. Sci. (Tech.)/**

АЕ «Metalurgprom»  
National Metallurgical Academy of Ukraine  
(NMetAU), Dnipro, Ukraine

## Generalization of the technological experience in the steel processing

**Цель.** Обобщение информации об особенностях выполнения операции доводки при различных технологических цепочках производства стали с применением продувки ванны по технологии верхнего, донного и комбинированного дутья.

**Методика.** Исследования базируются на теоретическом обобщении технологической информации об особенностях проведения операции доводки при различных технологических схемах производства стали. Базой для проведения исследований послужила технологическая информация, приведенная в научных публикациях.

**Результаты.** Проведен анализ основных технологических параметров операции доводки стали при продувке металлической ванны по технологии донного, верхнего и комбинированного дутья. В ходе выполнения исследований определено отрицательное влияние печного шлака на эффективность процессов раскисления и легирования; положительное влияние на протекание рафинировочных и окислительных процессов в металлической ванне применения технологии комбинированной продувки; установлены особенности протекания физико-химических процессов при производстве стали по различным технологическим схемам.

**Научная новизна.** Впервые проведен комплексный теоретический анализ операции доводки стали при различных технологических схемах ее получения.

**Практическая значимость.** Получены данные о влиянии различных технологических факторов на эффективность технологических операций периода доводки стали. Данная информация может послужить базой для усовершенствования существующих технологических схем производства стали. (Табл. 15. Библиогр.: 10.)

**Ключевые слова:** доводка, рафинирование, окисление, продувка, сталь.

**Постановка проблемы.** Наиболее важным этапом в производственном цикле жидкой стали является операция доводки жидкого металла. В этот период осуществляется окончательное рафинирование расплава от вредных примесей (серы, фосфора и газов), а также нагрев до заданной температуры. Исходя из значительной распространенности на современном этапе развития науки и техники сталей, обладающих специальными служебными свойствами, роль операции по доводке металла значительно возрастает. Указанный аспект очень остро проявляется при производстве сталей класса IF (Interstitial free – не содержащие элементов внедрения).

Одной из тенденций современного металлургического производства является значительное распространение технологий внепечного рафи-

нирования, что приводит к осуществлению основных рафинировочных процессов на стадии внепечной доводки стали. Это требует разработки единого подхода к технологическим аспектам операции доводки стали как на стадии выплавки, так и на стадии внепечной обработки.

**Формулировка цели исследования.** Крупнейшие в мире конвертеры в Beckervert (Германия), работают по технологии комбинированной продувки (кислород подается через верхнюю фурму, а нейтральный перемешивающий газ – через донные продувочные узлы). При этом в соответствии с существующей технологией осуществляется продувка жидкой стали в ковше аргоном и порошковыми реагентами (TN). Дегазация металлического расплава осуществляется по методу порционного вакуумирования (DH). Для

проведения плавки в конверторе применяется десульфурованный магнийсодержащими сплавами чугуна, а охлаждение полученного расплава осуществляется холодным чугуном. При этом произведенная из полученного металла листовая сталь содержит 20–60 ppm азота [1]. Кроме того, современные методы производства качественной стали обеспечивают содержание неметаллических включений на уровне < 100 ppm, размером 50–175 мкм. При этом в процессе перемещения металла от плавильного агрегата к промежуточному ковшу содержание кислорода уменьшается на порядок величины, а азота – почти вдвое [2].

Проведенные исследования процессов легирования стали в ковше марганцем [3–4] показали неоднородность процесса его усвоения, что позволяет определить окончание процесса по стабилизации его содержания в расплаве. Эффективность процессов легирования кремнием определяется температурой металла: при низкой температуре его усвоение идет замедленно во времени, при высокой – закачивается практически мгновенно. Соответственно, при вводе его порошковой проволокой происходит неконтролируемое петлеобразование, или оплавление стальной оболочки прежде, чем проволока с активным наполнителем достигнет дна ковша и обеспечит достаточно высокое усвоение частиц порошка кремнийсодержащего материала.

Кроме того, при анализе процессов выплавки стали установлено, что восстановительный процесс доводки стали вызывает рефосфорацию, препятствующую получению все более низких содержаний фосфора. А так называемая восстановительная дефосфорация, над которой особенно упорно работали в Японии, по-видимому, не состоялась, и еще в 1981 г. R. Moncel предложил присаживать в ковш смесь извести, руды и плавленого шпата [5].

Исходя из приведенных выше данных, целью настоящей работы является обобщение информации об особенностях выполнения операции доводки при различных технологических цепочках производства стали.

**Методика проведения исследования.** Поставленная цель исследований достигается путем теоретических обобщений технологической информации об особенностях проведения операции доводки при различных технологических схемах производства стали. Базой для проведения исследований послужила технологическая информация, приведенная в научных публикациях.

**Изложение основных материалов исследования.** При анализе процессов доводки стали определено, что существуют следующие параметры, существенно влияющие на особенности протекания рафинировочных процессов: количество

конечного шлака, особенности технологии продувки металлической ванны и технологические особенности проведения операции доводки. Необходимо рассмотреть каждый из факторов более детально.

#### *Количество конечного шлака*

Количество конечного шлака и его состав влияют на процессы доводки стали в сталеплавильном агрегате и ковше, в частности потери раскислителей (легирующих).

В табл. 1 приведены составы конечных шлаков и их количество, рассчитанное по балансам кремния ( $m_1$ ) и марганца ( $m_2$ ), в отечественном (От) и зарубежном бессемеровском процессе. Величина  $m_2$  больше, чем  $m_1$ , примерно, на 30 %. Окисленность конечного шлака ( $FeO_1$ ) согласуется с содержанием углерода в продутом металле ( $C_1$ ) только в шведских экспериментах.

Таблица 1

**Количество конечного шлака в бессемеровском процессе**

Страна	$C_1$ , %	$FeO_1$ , %	$m_1$ , %	$m_2$ , %
Отечественные предприятия	0,05	18	3	3
	0,08	19	4	7
	0,09	13	3	3
	0,10	22	4	7
	0,12	18	3	4
Sweden	0,05	30	5	6
	0,08	31	4	6
	0,10	31	5	8
	0,33	18	4	4
	0,55	9	6	8
USA	0,03	14	8	5
	0,53	24	3	6

Передув томасовских плавок является необходимым условием получения низкой концентрации фосфора в металле. В табл. 2, кроме величин  $m_1$  и  $m_2$ , приведены результаты расчета количества конечного шлака по балансу фосфора –  $m_3$ . Величина  $FeO_1$  минимизируется при 0,02 % C, а при больших содержаниях углерода рост  $FeO_1$  обеспечивает нужную степень дефосфорации. Количество конечного шлака во всех трех балансах – минимально при 0,04–0,05 %  $C_1$ .

В 1952 г. в Dortmund (Германия) были проведены исследования по продувке в томасовских 22–28-т конвертерах воздухом под давлением 4,7–5,8 атм. Вместо обычных 2–2,5 атм. Это увеличивало стойкость днищ и снижало содержание в стали азота на 30–35 %, но выход годного составил 84,4 против обычных 88,3 %.

В конвертерах верхнего кислородного дутья при  $C_1 \leq 0,1$  % с ростом окисленности шлака его

Таблица 2

**Количество конечного шлака в томасовском процессе**

C <sub>1</sub>	0,015	0,015	0,02	0,046	0,06	0,07	0,09
FeO <sub>1</sub>	17	19	10	13	14	12	17
m <sub>1</sub> , %	-	17	22	13	21	21	14
m <sub>2</sub> , %	23	26	32	19	-	35	26
m <sub>3</sub> , %	31	25	26	13	20	42	21

количество увеличивается (табл. 3). В пределах одного конвертера, чаще всего m<sub>1</sub> < m<sub>2</sub> < m<sub>3</sub>. При переделе фосфористых чугунов количество шлака увеличивается в два раза, а его связь с окисленностью шлака пропадает.

**Технология комбинированной продувки**

В отечественной практике наиболее полно комбинированная продувка была исследована в ККЦ ДМК сотрудниками ИЧМ [6]. Цех первым в отрасли начал использовать технологию с передувом, останавливая продувку при прекращении окисления углерода. Анализ распределения продувок по величине C<sub>1</sub> (табл. 4) показывает, что рассчитанная по доле плавок с верхней продувкой (D<sub>в</sub>, %) средняя величина C<sub>1</sub><sup>Ф</sup> на 13 % больше, чем с комбинированной (D<sub>к</sub>, %).

Для реакций окисления марганца и серы показатели их распределения между конечным шлаком и металлом K'<sub>Mn</sub> = (MnO)/[Mn](FeO) и K'<sub>s</sub> = L<sub>s</sub>(FeO) представлены в табл. 5. В пределах вида продувки верхней (В) и комбинированной (К) зависимости K'<sub>Mn</sub> от C<sub>1</sub> не замечено. Чаще его величина больше для комбинированной продувки в силу меньшей величины FeO. По этой же причине K'<sub>s</sub> больше для верхней продувки и в обоих случаях они уменьшаются при росте C<sub>1</sub>, минимизируясь при 0,08 % С. При C<sub>1</sub> ≥ 0,09 % сказывается влияние на L<sub>s</sub> уменьшения окисленности металла.

Анализ влияния доли донного дутья D<sub>дон</sub> (табл. 6) показывает, что при 0,02 % С ее рост сопровождается монотонным снижением окисленности шлака. При 0,03 % С и, возможно, 0,04 % С на повалке окисленность минимизируется. Ее минимумы отмечаются также на <0,1 % и 0,04, 0,05 и, вероятно, 0,07 % С. Эти факты в определенной степени согласуются с максимальным снижением удельного расхода чугуна при D<sub>дон</sub> = 12 - 14 % [6], максимизацией дожигания CO→CO<sub>2</sub> в комбинированной продувке LD-НС при D<sub>дон</sub> = 20 - 25 % O<sub>2</sub> [7] и максимизацией доли

Таблица 3

**Количество конечного шлака в конвертерах верхнего кислородного дутья при передуве**

Предприятие	Садка Тип процесса	Содержание углерода, %	Параметры	Значения		
				FeO, %		
ДМетИ	0,05 т LD	0,04-0,10%С	FeO, %	<40	40-50	50-60
			m <sub>1</sub> , %	15	9	21
			m <sub>2</sub> , %	18	14	18
	1 т LD	0,03-0,10%С	FeO, %	<28	28-32	32-36
			m <sub>1</sub> , %	10	10	12
			m <sub>2</sub> , %	15	15	21
G	15 т LD-AC	0,02-0,04%С	m <sub>3</sub> , %	16	16	24
			FeO, %	19	29	32
			m <sub>1</sub> , %	17	22	21
			m <sub>2</sub> , %	25	23	22
ДЗП	35 т LD	0,06-0,09 %С	m <sub>3</sub> , %	21	23	24
			FeO, %	<20	20-25	25-30
			m <sub>1</sub> , %	8	8	10
			m <sub>2</sub> , %	10	12	17
КМЗ-2	125-130 т LD	0,05-0,10 % С	m <sub>3</sub> , %	8	10	9
			FeO, %	<20	20-25	25-30
			m <sub>1</sub> , %	-	12	10
			m <sub>2</sub> , %	9	9	12
			m <sub>3</sub> , %	11	12	16

Таблица 4

**Степень передувки плавки в 250 т кислородных конвертерах ДМК**

10 <sup>2</sup> C <sub>1</sub> , %	2	3	4	5	6	7	8	8-12	10 <sup>2</sup> C <sub>1</sub> cp
D <sub>в</sub> , %	1	18	39	24	10	4	2	2	4,56
D <sub>к</sub> , %	1	39	37	15	6	<1	<1	<1	4,03

Таблица 5  
Влияние степени передувки плавки на  $K'_{Mn}$  и  $K'_S$  конечного шлака при продувке В и К в 250 т КК ДМК

$10^2 C_{1r}, \%$		2	3	4	5	6	7	8	9-12
В	$K'_{Mn}$	2,4	2,8	2,8	2,4	2,2	2,7	2,8	2,3
	$K'_S$	102	57	44	40	41	36	23	37
К	$K'_{Mn}$	2,4	3,6	3,3	2,6	2,9	-	2,9	1,6
	$K'_S$	48	34	31	34	26	21	-	39

Таблица 6  
Влияние  $D_{дон}$  на окисленность конечного шлака в 250 т конвертере ДМК

$D_{дон}/C_1 \cdot 10^2$	2	3	4	5	6	7
0	34	26	20	22	20	21
<0,1	24	19	18	16	20	14
0,1-0,2	21	19	20	22	-	-
0,2-0,3	20	16	16	-	-	-
>0,3	18	17	-	-	-	-

лома, перерабатываемой в 160-т конвертерах ЗСМК при доле кислорода, подаваемой через верхний ярус двухъярусной фурмы в 18 % [8].

При переработке чугунов с содержанием  $Si > 1$  окисленность конечного шлака зачастую ниже, чем при  $Si_{\text{ч}} < 1$ , как для верхней, так и для комбинированной продувки, вследствие увеличения в шлаке содержания  $SiO_2$ . Количество конечного шлака ( $m_1$ ) стабильно больше. Это оказывает двойное влияние на десульфурацию металла и в результате, положительный и отрицательный результат становятся равновеликими (табл. 7).

Таблица 7  
Сравнение верхней и комбинированной продувки в 250 т КК ДМК (числитель -  $Si_{\text{ч}} < 1\%$ ; знаменатель -  $Si_{\text{ч}} > 1\%$ )

Способ	$C_1 \cdot 10^2$	2	3	4	5	6	7	8-11
В	$FeO_{1r}, \%$	$\frac{32}{-}$	$\frac{29}{26}$	$\frac{23}{22}$	$\frac{24}{19}$	$\frac{21}{20}$	$\frac{25}{12}$	$\frac{22}{-}$
	$m_{1r}, \%$	$\frac{12}{-}$	$\frac{9}{13}$	$\frac{9}{14}$	$\frac{10}{12}$	$\frac{8}{17}$	$\frac{10}{16}$	$\frac{10}{-}$
	$S_{\text{к}}/S_{\text{н}}$	$\frac{2,0}{-}$	$\frac{1,4}{1,4}$	$\frac{1,5}{2,0}$	$\frac{1,5}{1,7}$	$\frac{1,7}{1,4}$	$\frac{1,6}{1,4}$	$\frac{0,6}{-}$
К	$FeO_{1r}, \%$	$\frac{22}{-}$	$\frac{19}{22}$	$\frac{21}{18}$	$\frac{18}{14}$	$\frac{16}{20}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{=}{19}$
	$m_{1r}, \%$	$\frac{9}{-}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{10}{16}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{10}{14}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{=}{9}$
	$S_{\text{к}}/S_{\text{н}}$	$\frac{1,8}{-}$	$\frac{1,4}{2,0}$	$\frac{1,4}{1,2}$	$\frac{1,1}{-}$	$\frac{1,5}{-}$	$\frac{0,7}{0,7}$	$\frac{=}{1,2}$

### Технологические особенности операции доводки

По литературным данным проанализировано 9 работ (4 немецких, 3 отечественных, по одной шведской и американской), опубликованных в

1958–1979 гг. и посвященных раскислению стали в тигле, печи и ковше как отдельными раскислителями ( $Si, Mn, Al$ ), так и их сочетаниями. Масса металла в тиглях составила 0,6–12 кг, в ИП – 60 кг, в ЭДП – 3–4 т, ковшах – 3–4 т. Футеровка печей –  $SiO_2, Al_2O_3, MgO$ .

Рассчитывалась фактическая степень экстракции из металла элемента – раскислителя  $E_d$  и кислорода  $E_o$  ( $E \equiv (C_{\text{н}} - C_{\text{к}}) / C_{\text{н}}$ ) и теоретическая по моделям Vermeulen, Calderbank, упрощению Newman, Hobbler, результаты которых представлены в табл. 8 в функции от числа Фурье ( $F_{\text{н}} = D\tau/d^2$ ). Коэффициент молекулярной диффузии вещества определялся по [9], характерный размер ванны  $d = (6M/\pi\rho_M)^{1/3}$ , где  $M$  – масса металла;  $\rho_M$  – его плотность.

Таблица 8  
Степень экстракции при раскислении стали

Источник	$F_{\text{н}}$					
		3(-6)	3(-5)	3(-4)	3(-3)	3(-2)
Факт	$E_d$	-	0,72	0,69	0,41	-
	$E_o$	0,59	0,81	0,82	0,87	0,78
Теория	$E_d - E_o$	0,011–0,608	0,034–0,607	0,108–0,600	0,33–0,54	0,26–0,85

Фактические величины  $E_d$  с ростом  $F_{\text{н}}$  изменяются приблизительно, как рассчитанные по модели Hobbler

$$\Sigma = (6/\pi^2)\exp(-4\pi^2 D\tau/d^2), \quad (1)$$

а  $E_o$  имеют такой же порядок величины.

В конвертерном процессе доводка прежде всего связана с получением заданного содержания углерода ( $C_3$ ). При  $C_3 < C_1$  это додувка; при  $C_1 = C_3$  – эта часть доводки соответствует заданию; при  $C_1 < C_3$  необходимо науглероживание. В табл. 9 представлены удельные расходы металлошихты при периклазовошпинельной футеровке (ПШ) в зависимости от содержания кремния в чугуне. Удельный расход чугуна в 1970-х годах минимален при  $Si_{\text{ч}} < 0,6\%$  и  $> 0,8\%$ . Выход годного ( $Y, \%$ ), при  $Si_{\text{ч}} < 0,6\%$  и  $> 0,6\%$  растет при передувке.

В 2000-х годах при работе конвертеров ДЗП на периклазоуглеродистой футеровке достигнуто увеличение продолжительности кампании на порядок величины, при замене железной руды ломом (ср. табл. 9) при 0,6–0,8 %  $Si_{\text{ч}}$  доля плавков с остановкой на заданном содержании углерода уменьшилась с 59 до 24–35 %, а с передувом и науглероживанием выросла с 22 до 44–65 %. При  $Si_{\text{ч}} > 0,8\%$  доля плавков с додувками увеличилась с 5 до 11–14 %, с заданным содержанием углерода упала с 69 до 24–32 %, а передутых – увеличилась с 26 до 41–65 %.

В условиях сохраняющегося ручного управления продувкой и нестабильности состава чугуна

Влияние условий окончания продувки на удельный расход металлошихты в ККЦ ДЗП

Футеровка	Si <sub>ч</sub> , %	Доводка	Доля случаев, %	m <sub>ч</sub> , кг/т	m <sub>л</sub> , кг/т	m <sub>р</sub> , кг/т	Y, %
ПШ*	<0,6	Д	6	1050	63	69	88,7
		З	70	1042	66	105	88,4
		Н	24	1038	49	116	90,7
	0,6-0,8	Д	19	1150	29	10	90,6
		З	59	1166	36	109	89,5
		Н	22	1171	13	101	90,7
	>0,8	Д	5	1105	0	89	89,4
		З	69	1074	30	77	90,9
		Н	26	1068	23	88	91,0
ПУФ (2008)	0,6-0,8	Д	18	971	118	-	89,9
		З	35	980	116	-	90,8
		Н	44	911	126	-	89,9
	0,8-1,0	Д	17	983	132	-	87,6
		З	32	970	140	-	90,7
		Н	41	961	127	-	90,2

ПШ - периклазошпинелидная, ПУФ - периклазоуглеродистая;  
Д - додувка, З - заданное, Н - науглероживание.

возрастает роль оператора конвертера. Несколько лет тому назад НМетАУ-ДЗП организовали переподготовку работников завода, намеченных на выдвижение. В зарубежной практике такая переподготовка для операторов агрегатов и квалифицированных рабочих (наши мастера) осуществляется регулярно с интервалом приблизительно в 5 лет, а служебный рост происходит в соответствии со сравнительной оценкой производственных результатов [10].

Сравнение выхода годного (Y, % при одинаковом содержании Si<sub>ч</sub> 0,6-0,8 % и >0,8 % в табл. 9 показывает, что в большинстве случаев его величина уменьшилась в среднем на 3 %.

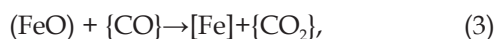
Анализ влияния S<sub>ч</sub> на удельный расход МШ в условиях ККЦ ДЗП (табл. 10) показал, что ее увеличение практически при любом варианте доводки сопровождается ростом m<sub>ч</sub> и уменьшением m<sub>л</sub>. Тем не менее, при нормативном содержании S<sub>ч</sub> <0,05 % выход годного максимален при остановке продувки на заданном содержании углерода.

#### Сравнение технологических схем производства стали

В сталеплавильных процессах главным источником информации о металле является углерод, а о шлаке - оксиды железа. Их взаимодействие происходит через газовую фазу, в которой на стороне металла идет реакция



а оксидов железа:



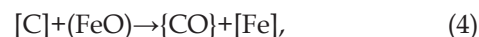
из которых вторая является лимитирующей и определяет состав газовой фазы.

Таблица 10

Влияние S<sub>ч</sub> на удельный расход металлошихты в ККЦ ДЗП (2008 г.)

Футеровка	S <sub>ч</sub> , %	Доводка	Доля случаев, %	m <sub>ч</sub> , кг/т	m <sub>л</sub> , кг/т	Y, %
ПУФ	<0,03	Д	21	965	123	88,2
		З	38	975	125	90,7
		Н	41	973	136	90,3
	0,03-0,04	Д	22	983	122	90,5
		З	44	994	118	90,7
		Н	35	977	101	90,1
	0,04-0,05	Д	20	988	109	90,0
		З	44	986	115	90,4
		Н	36	980	131	90,4
	>0,05	Д	-	-	-	-
		З	12	1060	127	88,7
		Н	88	990	125	89,2

Формально сумма реакций (2) и (3) имеет вид



и можно предположить  $[C] \cdot (FeO) = \text{const}$ .

Фактически многочисленные исследования этой связи показывают, что в конце продувочных сталеплавильных процессов

$$(FeO) = k/C^m, \quad (5)$$

где k и m определяются конкретными обстоятельствами процесса.

Если в зависимости FeO-C есть две реперные точки с известными величинами C<sub>1</sub>, FeO<sub>1</sub> и C<sub>2</sub>, FeO<sub>2</sub>, то

$$m = \lg(FeO_1/FeO_2) / \lg(C_1/C_2). \quad (6)$$

Результаты обработки экспериментальных данных авторов и опубликованных в литературе по модели (6) приведены в табл. 11-15, для фосфористых и передельных чугунов, продувавшихся в отечественных и конвертерах Германии (G), Японии (J), Франции (Fr) Люксембурга (Lux) и Бельгии (Bel) снизу, сверху (ВД) и комбинированно известными процессами [8].

Теоретически согласно (4) должно быть  $m = 1$ . Фактически  $m \rightarrow 1$  только в отдельных отечественных (табл. 12) и зарубежных (табл. 13, 15) конвертерах. Обобщение данных табл. 16а-д показало, что при  $m < -0,543$   $k = -2,5-2,5$   $m$ , а при  $m > -0,543$   $k = -12-20$ .

**Выводы.** Проведен анализ основных технологических параметров операции доводки стали

Таблица 11

Зависимость FeO-C в зарубежных конвертерах донного дутья

Страна	Год	Чугун	Процесс	$i_{в}, \text{м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$	k	m
G	1958	Ф	T	22	1,9(-10)	-0,19
G	1976	Ф	ОВМ	-	2,1(-6)	-0,28
Fr-Lux	1983	П	Q-ВОР	-	5,9(-5)	-0,36
Bel	1984	П	Q-ВОР	-	2,8(-7)	-0,38

Ф - фосфористый чугун, П - передельный чугун.

Таблица 12

Зависимость FeO-C в отечественных конвертерах верхнего дутья

Завод	Год	Чугун	Процесс	$i_{в}, \text{м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$	k	m
ДЗП	1964	П	ВД	3-3,1	4,0	-1,26
ДЗП	1970	П	ВД	2,7-3,2	3,1	-1,16
КМЗ-2	1970	П	ВД	2,4-2,6	3,8	-1,14
ДМК	1986	П	ВД	2,4-3,8	2,4(-3)	-0,38
МКА	1997	П	ВД	3,2-4,0	2,0(-3)	-0,39
ДМК	2001	П	ВД	2,4-3,2	2,8(-8)	-0,21
ДМК	2003	П	ВД	2,2-4,0	7,2(-7)	-0,24

Таблица 13

Зависимость FeO-C в зарубежных конвертерах верхнего дутья

Страна	Год	Чугун	Процесс	$i_{в}, \text{м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$	k	m
G	1964	Ф	LD-АС	3,3	0,16	-0,57
J	1982	П	LD	-	2,1	-1,0
Fr-Lux	1983	П	LD	-	3,4(-4)	-0,48
Bel	1984	П	LD	-	9,4(-7)	-0,28

Таблица 14

Зависимость FeO-C при комбинированной продувке в отечественных конвертерах

Завод	Год	Чугун	Процесс	$i_{в}, \text{м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$	$i_{г}, \text{м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$	k	m
ДМК	1986	П	ИЧМ	2-3,8	0,3-0,7	3,0(-3)	-0,40
ЗСМЗ-2	1992	П	ИЧМ	2,7-2,8	0,04-0,05	1,0(-24)	-0,05

Таблица 15

Зависимость FeO-C при комбинированной продувке в зарубежных конвертерах

Страна	Год	Чугун	Процесс	$i_{в}, \text{м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$	$i_{г}, \text{м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$	k	m
J	1982	П	LD-ОВ	4,0	0,12	1,3	-0,85
					0,18	0,36	-0,75
					0,25	0,31	-0,79
					0,30	0,10	-0,67
J	1983	П	К-ВОР	1-2	0,7-1,3	5,1(-5)	-0,38
Fr-Lux	1983	П	LBE	3,3	0,07-0,30	3,2(-9)	-0,25
J	1984	П	К-ОВМ	1-2	0,7-1,3	3,4(-7)	-0,22
J	1984	П	LD-ОВ	4,0	0,1-0,3	1,3(-6)	-0,26
Bel	1984	П	LD-НС	-	0,05-1,0		
J	1984	П	LD-КГ	2,8-3,0	0,07-0,05	1,1(-8)	-0,20

при продувке металлической ванны по технологии донного, верхнего и комбинированного дутья. Определены основные технологические параметры, обеспечивающие оптимальные условия для протекания окислительных и рафинировочных процессов.

### Библиографический список / References

1. Изменение содержания азота от передельного чугуна в доменной печи до стали в конвертере / Э. Шюрман, Ф. Мюншер, Р. Хаммер, Х.-Д. Пфлинсен [и др.] // Черные металлы. – 1989. – № 7. – С. 18–24.

Shyurman E., Myunsher F., Hammer R., Pflinsen H.-D. Pflinsen *Izmenenie sodержaniya azota ot peredelnogo chuguna v domennoy pechi do stali v konvertere*. Chernyye metallyi. 1989, no. 7, pp. 18-24.

2. Вюнненберг К. Повышение чистоты стали при непрерывной разливке / К. Вюнненберг, Ю. Кампель // Черные металлы. – 2010. – № 5. – С.42–48.

Vyunnenberg K., Kampel Yu. *Povyishenie chistoty stali pri nepreryivnoy razlivke*. // Chernyye metallyi. 2010, no. 5, pp. 42-48.

3. Плавление и смешение ферромарганца в ковшевой металлургии / Н. Банненберг, Г. Лахмунд, Ф. Оэтерс, Лю Чжан // Черные металлы. – 1999. – № 7. – С. 22–29.

*Plavlenie i smeshenie ferromargantsa v kovshevoy metallurgii* / Bannenberg N., Lahmund G., Oeters F., Lyu Chzhan. Chernyye metallyi. 1999, no. 7, pp. 22-29.

4. Оптимизация процессов производства стали – применение новых способов моделирования нестационарных состояний процесса / К. Маркс, О. Пютс, З. Реул [и др.] // Черные металлы. – 2001. – № 10. – С. 42–46.

Marks K., Pyuts O., Reul Z. *Optimizatsiya protsessov proizvodstva stali – primenenie novyih sposobov modelirovaniya nestatsionarnyih sostoyaniy protsessa*. Chernyye metallyi. 2001, no. 10, pp. 42-46.

5. Technical note “Rephosphorisation of steel in Indie” / A.S. Venkatadri, E.K. Singhal, C.R. Srinivasan // Ironmaking & Steelmaking. – 1989. – Vol. 16. – № 3. – P. 193–194.

Venkatadri A. S., Singhal E. K., Srinivasan C. R. *Technical note “Rephosphorisation of steel in Indie”*. Ironmaking & Steelmaking. 1989, vol. 16, no. 3, pp. 193-194.

6. Комбинированная продувка металла кислородом в большегрузных конверторах / Я. А. Шнееров, К. Г. Носов, Ю. Н. Борисов [и др.] // Сталь. – 1986. – № 1. – С. 21–24.

Shneerov Ya.A., Nosov K.G., Borisov Yu.N. *Kombinirovannaya produvka metalla kislorodom v bolshegruznyih konvertorah*. Stal. 1986, no. 1, pp. 21-24.

7. Development and application of the LD-NC top and bottom blowing process / H. Jacobs, B. Ceschin,

P.H. Dauby, J. Claes // Iron and Steel Engineering. – 1981. – № 12. – P. 39–43.

Jacobs H., Ceschin B., Dauby P. H., Claes J. *Development and application of the LD-NC top and bottom blowing process*. Iron and Steel Engineering. 1981, no. 12, pp. 39-43.

8. Смоктий В. В. Комбинированные процессы выплавки стали в конвертерах / В. В. Смоктий, В. В. Лапицкий, Э. С. Белокуров. – К.: Техника, 1992. – 163 с.

Smoktiy V. V., Lapitskiy V. V., Belokurov E. S. *Kombinirovannyye protsessyi vyiplavki stali v konvertorah*. Kiev, Tehnika, 1992, 163 p.

9. Охотский В. Б. Модели металлургических систем / В. Б. Охотский. – Днепропетровск: Системные технологии. – 268 с.

Ohotskiy V. B. *Modeli metallurgicheskikh sistem*. Dnepropetrovsk, Sistemnyie tehnologii, 268 p.

10. Менеджмент раскисления и легирования кислородно-конвертерной стали / В. Б. Охотский, М. В. Чуйко // МГП. – 2010. – № 3. – С. 21–23.

Ohotskiy V. B., Chuyko M. V. *Menedzhment raskisleniya i legirovaniya kislorodno-konverternoj stali*. MGP, 2010, no. 3, pp. 21-23.

**Purpose.** Generalization of information on the features of the processing for various technological chains of steel production with using of top, bottom and combined blowing of a bath.

**Methodology.** The studies are based on a theoretical generalization of technological information on the features of the steel processing for the various technological schemes of its production. The base for the research is the technological information given in scientific papers.

**Findings.** The analysis of the main technological parameters of the steel processing operation during the blowing of the bath using bottom, top and combined blowing technology was carried out. During the research, the negative effect of furnace slag on the effectiveness of deoxidation and alloying processes was determined; positive influence on the refining and oxidation processes in a metal bath using combined blowing; the features of physical and chemical processes in the production of steel according to various technological schemes have been established.

**Originality.** For the first time, a complex theoretical analysis of the steel processing was carried out under various technological schemes for its production.

**Practical value.** Data on the influence of various technological factors on the efficiency of steel processing are obtained. This information can serve as a basis for the improvement of existing technological schemes for the steel production.

**Key words:** processing, refining, oxidation, blowing, steel.

**Рекомендована к публикации  
д. т. н. К. Г. Низяевым**

**Поступила 19.12.2017**