

2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ОБРАБОТКИ СТАЛИ В КОВШЕ-ПЕЧИ

Обработка стали в ковше-печи, в отличие от плавки в конвертере или временной дуговой сталеплавильной печи, процесс восстановительный. Одним из главных требований его проведения является наличие нейтральной или слабо восстановительной атмосферы в ковше. Это дает возможность наведения восстановительного шлака, обеспечивающего низкий угар раскислителей и легирующих материалов, а также глубокую десульфурацию металла в условиях интенсификации процесса продувкой аргоном. К этим операциям и процессам и сводится материальный баланс обработки стали в ковше-печи. В общем виде он может быть описан уравнением

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 = M_6 + M_7 + M_8,$$

где M_1 – масса жидкой стали-полупродукта; M_2 – расход шлакообразующих; M_3 – поступление материалов из футеровки ковша; M_4 – масса вводимых ферросплавов и легирующих; M_5 – расход аргона; M_6 – выход жидкой стали; M_7 – количество образовавшегося шлака; M_8 – количество образовавшегося газа.

Для удобства расчета баланс, как правило, составляется на 100 кг жидкой стали-полупродукта. Если данный расчет является продолжением выполняемого расчета процесса производства стали, то в качестве исходного значения берется определенное ранее количество полупродукта и его состав.

2.1. Исходные данные для расчета

Составить баланс обработки в ковше-печи стали марки 20ХГСА. Дополнительное техническое условие: для гарантии выполнения требования заказчика по технологической пластичности и механическим свойствам (повышенные относительное сужение и ударная вязкость) необходимо иметь в стали не более 0,015% серы.

Пользуясь справочными данными, находим по ГОСТ 4543–71 химический состав стали 20ХГСА и делаем поправку на допустимое содержание серы (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Химический состав готовой стали, масс. %

C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni
0,17...0,24	0,90...1,20	0,80...1,10	0,80...1,10	≤0,015*	≤0,025	≤0,30

* С учетом требований заказчика

Состав жидкого полупродукта, полученного в конвертере с передувом, приведен в табл. 2.2 (в таблице П.7 приведен более подробный пример состава полупродукта после выпуска из конвертера).

Таблица 2.2

Состав жидкого полупродукта, масс. %

C	Si	Mn	Cr	S	P	O
0,08	0	0,20	0	0,030	0,02	0,04

Состав используемых в данном примере ферросплавов и раскислителей приведен в табл. 2.3. В приложении в таблице П.5. представлены составы других ферросплавов и раскислителей.

Таблица 2.3

Химический состав используемых материалов¹, масс. %

Материал	C	Mn	Si	Cr	S	P	Fe	Al
Ферромарганец ФМн0,5	0,5	85,0	2,0	–	0,030	0,30	12,7	–
Ферросилиций ФС75	–	0,4	80	0,4	0,02	0,05	20,0	–
Феррохром ФХ100А	0,01	–	0,8	68	0,02	0,02	30,45	0,7
Алюминий первичный	–	–	1,5	–	–	1,5	–	97

Химический состав прочих шлакообразующих и огнеупорных материалов, используемых в данном расчете взят из табл. 2.4.

Таблица 2.4

Химический состав шлакообразующих и огнеупорных материалов, %

Материал	CaO	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P	S	п.п.п.
Глинозем		0,1			99,4	0,05				0,6
Плавиковый шпат	0,5	3,6	–	–	0,2	1,2	94,0	–	–	0,2
Известь	88,0	1,3	2,0	–	0,8	1,2	–	–	–	6,7
Железная руда	–	10,0	–	–	–	82,9	–	0,014	0,013	–
Периклаз	1,0	3,0	93,0	–	1,0	2,0	–	–	–	–
Периклазо-хромитовый	2,0	6,5	66,0	10,0	4,0	11,5	–	–	–	–
Периклазо-углерод	–	0,2	86,0– 95,0	–	0,5	0,2	–	Углерод 6,0–15,0	–	

Науглероживание стали в случае необходимости производят продувкой порошком молотых остатков (боя) электрода или отсевок кокса с содержи-

¹ В составе ферросплавов для всех элементов, кроме ведущего, показано предельно допустимое содержание. Поэтому при составлении баланса эти элементы, за некоторыми исключениями, не учитывались.

ем: С – 99,795%; SiO₂ – 0,041%; CaO – 0,132%; MgO – 0,032%. Футеровка ковша в зоне шлакового пояса, подвергаемого наиболее интенсивному износу – периклазодоломитовая. Химический состав футеровки: MgO – 87%; CaO – 10%, SiO₂ – 3%. Материальный баланс составим поэтапно на 100 кг жидкого полупродукта.

2.2. Раскисление и легирование

Определим количество ферросплавов (см. табл. 2.3), которое необходимо присадить в металл для получения заданного состава стали. При этом, учитывая увеличение массы металла в процессе обработки, зададим содержание легирующих несколько выше среднего (см. табл. 2.1). Величину присадок определим по формуле

$$M_{\text{фспл}} = \frac{M_{\text{ж.ст}} ([C]_{\text{гот.ст}} - [C]_{\text{исх}}) \cdot 100}{[C]_{\text{фспл}} (100 - K_{\text{уг}})},$$

где $M_{\text{ж.ст}}$ – масса жидкой стали, кг; $[C]_{\text{гот.ст}}$, $[C]_{\text{исх}}$ и $[C]_{\text{фспл}}$ – содержание легирующего элемента в готовой стали (среднее по данной марке стали), в ковше перед раскислением, и в ферросплаве соответственно, %; $K_{\text{уг}}$ – угар элемента при раскислении (легировании), %. При обработке в ковше-печи угар ниже, чем при легировании в ковше на выпуске и в среднем составляет: для алюминия и науглероживателя около 30%, для кремния – 15%, для фосфора – 2%, для марганца, железа и хрома – 0%. Фосфор практически весь переходит в металл, в связи с этим необходимо учесть его содержание в конечном сплаве в пределах марки. Если содержание будет превышено необходимо использовать более чистые по фосфору компоненты для раскисления и легирования. Коэффициенты усвоения других элементов при внепечной обработке представлены в таблице П.6.

Количество присаживаемого ферромарганца

$$M_{\text{ФМn05}} = \frac{100 \cdot (1,0 - 0,20) \cdot 100}{85 \cdot (100 - 0)} = 0,941 \text{ кг.}$$

Он дополнительно внесет в расплав, с учетом угара: Si: $0,941 \cdot 0,02 \cdot 0,85 = 0,016$ кг; Fe: $0,941 \cdot 0,127 = 0,120$ кг; С: $0,941 \cdot 0,005 \cdot 0,7 = 0,003$ кг; Р: $0,941 \cdot 0,003 \cdot 0,98 = 0,0028$ кг.

Аналогично расход феррохрома

$$M_{\text{ФХ100А}} = \frac{100 \cdot (1,0 - 0) \cdot 100}{68 \cdot (100 - 0)} = 1,471 \text{ кг.}$$

Он дополнительно внесет в расплав, с учетом угара Si: $1,471 \cdot 0,008 \cdot 0,85 = 0,010$ кг; Fe: $1,471 \cdot 0,3045 = 0,448$ кг; Р: $1,471 \cdot 0,0002 \cdot 0,98 = 0,0003$ кг.

Расход алюминия без расчета принимается 0,7 кг/т или 0,07 кг на 100кг полупродукта. С ним в металл также поступит $0,07 \cdot 0,015 \cdot 0,85 = 0,001$ кг кремния

и $0,07 \cdot 0,015 \cdot 0,98 = 0,0010$ кг фосфора. С учетом 30% угара в металл перейдет 0,049 кг алюминия.

Эти ферросплавы и алюминий попутно внесут в металл $0,016 + 0,010 + 0,001 = 0,027$ кг кремния. С учетом этого количества кремния расход ферросилиция при усвоении кремния 85% составит

$$M_{\text{ФС75}} = \frac{100 \cdot (1,10 - 0,027) \cdot 100}{80 \cdot (100 - 15)} = 1,578 \text{ кг.}$$

Он внесет в сталь $1,578 \cdot 0,2 = 0,316$ кг железа, P: $1,578 \cdot 0,0005 \cdot 0,98 = 0,0008$ кг.

Всего в сталь поступит $0,120 + 0,448 + 0,316 + 99,660 = 100,484$ кг железа, из которых 99,660 кг вносится полупродуктом.

Всего в сталь поступит $0,0028 + 0,0003 + 0,0010 + 0,0008 + 0,02 = 0,0249$ кг фосфора, из которых 0,02 кг вносится полупродуктом.

Расход углеродистого порошка с учетом угара

$$M_c = \frac{100 \cdot (0,210 - 0,083) \cdot 100}{99,795 \cdot (100 - 30)} = 0,182 \text{ кг.}$$

2.3. Состав и количество шлака

Шлаковая смесь, загружаемая в ковш, состоит из извести и глинозема в соотношении 65:35. Расход смеси обычно составляет 20...30 кг/т или 2...3 кг на 100 кг полупродукта. Однако данный расчет ведется для стали, легированной кремнием. Это вызывает необходимость ввода в ковш повышенного количества ферросилиция, а также учета кремнезема в шлаке. Поэтому для ошлакования этого кремнезема примем повышенный расход смеси – 5 кг. Шлаковая смесь внесет (см. табл. 2.4) из извести:

$$\begin{array}{ll} \text{CaO: } 0,88 \cdot 5 \cdot 0,65 = 2,860 \text{ кг,} & \text{SiO}_2: 0,013 \cdot 5 \cdot 0,65 = 0,042 \text{ кг,} \\ \text{MgO: } 0,02 \cdot 5 \cdot 0,65 = 0,065 \text{ кг,} & \text{Al}_2\text{O}_3: 0,008 \cdot 5 \cdot 0,65 = 0,026 \text{ кг,} \\ \text{Fe}_2\text{O}_3: 0,012 \cdot 5 \cdot 0,65 = 0,039 \text{ кг;} \end{array}$$

из глинозема:

$$\text{Al}_2\text{O}_3: 0,992 \cdot 5 \cdot 0,35 = 1,736 \text{ кг,} \quad \text{SiO}_2: 0,001 \cdot 5 \cdot 0,35 = 0,002 \text{ кг.}$$

Содержащимся в глиноземе Fe_2O_3 за малостью пренебрегаем.

В шлак переходит оксидов – продуктов раскисления в результате присадки ферросплавов:

$$\begin{array}{l} \text{в результате угара окислится кремния: } 1,578 \cdot 0,80 \cdot 0,15 = 0,189 \text{ кг,} \\ \text{из остальных ферросплавов: } 0,027 \cdot 0,15 = 0,004 \text{ кг.} \end{array}$$

Всего окислится кремния: $0,189 + 0,004 = 0,193$ кг. При этом образуется $0,193 \cdot 60/28 = 0,414$ кг SiO_2 . Помимо кремния в шлак перейдет $0,07 \cdot 0,30 \cdot 102/54 = 0,040$ кг Al_2O_3 в результате окисления алюминия.

При износе футеровки в зоне шлакового пояса 1,2 кг/т или 0,12 кг на 100 кг полупродукта в шлак перейдет:

$$\text{MgO: } 0,12 \cdot 0,87 = 0,104 \text{ кг,} \quad \text{CaO: } 0,12 \cdot 0,1 = 0,012 \text{ кг,}$$

$\text{SiO}_2: 0,12 \cdot 0,03 = 0,004 \text{ кг.}$

Переходит в шлак из вдуваемого в металл углеродистого порошка

$\text{MgO}: 0,182 \cdot 0,00032 = 0,000 \text{ кг,}$ $\text{CaO}: 0,182 \cdot 0,00132 = 0,000 \text{ кг,}$

$\text{SiO}_2: 0,182 \cdot 0,00041 = 0,000 \text{ кг.}$

Переходом этих оксидов в шлак с допустимой точностью можно пренебречь.

По результатам проведенных расчетов можно определить количество и состав образующегося шлака. Результат оформим в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Количество и состав шлака в ковше-печи

Источник поступления	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Итого
Известь	2,860	0,026	0,042	0,039	0,065	3,032
Глинозем	—	1,736	0,002	—	—	1,738
Продукты раскисления	—	0,040	0,414	—	—	0,454
Футеровка	0,012	—	0,004	—	0,104	0,120
Итого, кг	2,872	1,802	0,462	0,039	0,169	5,344
Итого, %	53,743	33,720	8,645	0,730	3,162	100

Рассматривая результаты расчетов, приведенные в табл. 2.5, следует сделать два замечания:

1. По сравнению с обычным для обработки стали в ковше-печи содержанием SiO_2 (3...7%), фактическое значение более высокое. Это связано с тем, что обработке подвергали сталь, легированную кремнием. Присадка большого количества ферросилиция вызвала и образование большого количества кремнезема. Понизить его содержание в шлаке можно присадкой большого количества шлаковой смеси ($\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$). Это в определенной мере и было учтено в расчете, что привело к образованию большого для условия обработки в ковше-печи количества шлака (5,3 кг, хотя обычно его количество не превышает 3...4% от массы металла). Дальнейшее увеличение количества присаживаемой шлаковой смеси нецелесообразно.

2. Полученное расчетом содержание $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,7\%$ высоко и может быть лишь в начале процесса. По ходу его развития этот оксид расходуется на окисление раскислителей и вдуваемого углерода. Таким образом, Fe_2O_3 выступает как дополнительный окислитель, дополняя растворенный в стали кислород.

2.4. Десульфурация

Вследствие наводки в ковше-печи активного шлака с высокой десульфурующей способностью в условиях интенсивного перемешивания вдуваемым

аргоном коэффициент распределения серы между шлаком и металлом $L_s = (S) / [S]$ достигает 500...1000. Учитывая повышенное содержание в шлаке SiO_2 и высокие требования заказчика, принимаем эту величину равной 250, т.е. в два раза меньше нижнего значения. Рассчитаем содержание серы в стали после обработки в ковше-печи:

$$[S] = [S]_0 / (1 + L_s \cdot a / 100),$$

где a – количество шлака в % от массы металла, $[S]_0$ и $[S]$ – содержание серы в стали в исходном (до обработки) и конечном (после обработки) состояниях. Вносимой ферросплавами серой можно на данном этапе пренебречь.

Тогда конечное содержание серы в металле гарантированно не превысит

$$[S] = 0,030 / (1 + 250 \cdot 5,344 / 100) = 0,002\%.$$

Это содержание серы при обычной технологии обработки значительно ниже допустимого техническими условиями и дополнительных мер по снижению серы в металле принимать не требуется.

2.5. Количество газа

В процессе обработки в ковше-печи газ образуется в основном в результате окисления углерода и потерь при прокаливании шлаковых материалов. При наведении шлака выделится:

из извести: $6,7 / 100 \cdot 5 \cdot 0,65 = 0,218$ кг,

из глинозема: $0,6 / 100 \cdot 5 \cdot 0,35 = 0,011$ кг,

30% угара углерода, вдуваемого в металл с образованием CO:

$$0,182 \cdot 30 / 100 \cdot 28 / 12 = 0,127 \text{ кг},$$

30% угара углерода, вносимого ферромарганцем:

$$0,941 \cdot 0,5 / 100 \cdot 0,3 \cdot 28 / 12 = 0,003 \text{ кг}.$$

Итого образуется газа:

$$0,218 + 0,011 + 0,127 + 0,003 = 0,359 \text{ кг}.$$

Используемый при продувке аргон не учитывается, так как инертный газ с компонентами стали и шлака не взаимодействует. Аргон проходит ванну и без изменения количества из нее уходит.

2.6. Выход жидкой стали

Для составления баланса металла определим, сколько всего внесено компонентов полупродуктом, ферросплавами с учетом фактического химического состава ферросплавов. При этом учтем, что углерод в графитовом порошке – неметалл и не растворен в жидком металле. Однако он переходит в жидкий металл и после этого является компонентом стали.

Углерод поступает с полупродуктом, ферросплавами и порошком науглероживателя в количестве $0,08 + 0,941 \cdot 0,005 + 0,182 = 0,267$ кг. Остальные элементы вносятся полупродуктом и ферросплавами с учетом их содержания, но без учета угара. Результаты оформим в виде табл. 2.6.

Таблица 2.6

Баланс металла

Элемент	Поступило, кг*	Перешло в шлак, кг	Перешло в газ, кг	Содержится в металле	
				кг	%
C	0,267	–	0,080	0,187	0,180
Si	1,274	0,193	–	1,083	1,043
Mn	1,006	–	–	1,006	0,969
Cr	1,000	–	–	1,000	0,963
S	0,030	0,028	–	0,002	0,002
P	0,0249	0,0005	–	0,0244	0,023
Al	0,068	0,020	–	0,048	0,046
Fe	100,484	–	–	100,484	96,773
Итого	104,154	0,2415	0,080	103,8344	100,000

* Без учета угара.

Невязка $104,154 - (0,2415 + 0,080 + 103,8344) = 0,0019$.

Выход жидкой стали $103,8344 / 104,154 \cdot 100 = 99,69\%$ от введенных в печь-ковш исходных материалов. Материальный баланс обработки стали в ковше-печи приводится в табл. 2.7. Невязка 0,295 кг, или 0,27%.

Таблица 2.7

Материальный баланс плавки

Поступило		Получено	
Материал	Количество, кг	Продукт	Количество, кг
Полупродукт	100,000	Сталь	103,834
Известь	3,250		
Глинозем	1,750	Шлак	5,344
Ферромарганец	0,941		
Феррохром	1,471	Газ	0,359
Ферросилиций	1,578		
Алюминий	0,07	Невязка	–0,295
Углеродистый порошок	0,182		
Итого	109,242	Итого	109,242