

РАСЧЕТ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

С использованием метода линейного программирования исследован расход компонентов аглошихты, обеспечивающих требуемый химсостав агломерата, с заданными содержанием цинка. Рассчитаны составы аглошихты с минимальной и максимальной стоимостью.

Агломерационное производство является одним из способов переработки отходов металлургического и других производств. Особенно актуально в настоящее время использование дешевых агломерационного, доменного и сталеплавильного шламов. Большинство шламов характеризуются повышенным содержанием вредных примесей. Согласно данным [1] в доменном шламе содержание цинка достигает 1,5 %, а в конвертерном – до 4 %. Цинк содержится в виде нескольких соединений, из которых в условиях доменной печи (ДП) он сравнительно легко восстанавливается. Из-за низкой температуры кипения Zn возгоняется в верхние горизонты шахты печи, где снова окисляется углекислотой или водяными парами до ZnO, который уносится из ДП газами. Он также частично отлагается в швах и порах кладки, вызывая ее рост и разрывы кожуха. Остальная часть ZnO вместе с шихтой снова опускается в нижние горизонты печи, восстанавливается до Zn и вновь поднимается вверх и окисляется. Таким образом, в ДП происходит круговорот и накопление Zn и его окиси, вызывающие разрушения конструкций. При чрезмерной концентрации Zn внутри ДП он периодически выходит через выпускные летки в атмосферу и негативно влияет на здоровье обслуживающего персонала. Поэтому количество Zn в доменной шихте, следовательно, и в агломерате, должно быть ограничено. Содержание Zn в агломерате возможно ограничить путем правильного составления аглошихты (АШ).

Полный расчет шихты включает определение расхода топлива, рудной смеси (часто каждой составляющей смеси) и флюсующих добавок. При этом необходимо обеспечить оптимальную себестоимость агломерата, который составляется с учетом современных экономических требований производства и сырьевых условий.

Целью настоящей статьи является расчет расхода компонентов агломерационной шихты методом линейного программирования, обеспечивающих требуемый химсостав агломерата, с наперед заданным минимальным содержанием цинка и себестоимостью исходной аглошихты.

Расчет АШ отличается от приводимых в литературе [2, 3] тем, что в систему уравнений ее расчета ввели дополнительное уравнение баланса цинка и целевую функцию себестоимости. В результате расчетов методом линейного программирования определяют возможный диапазон стоимости АШ с различным соотношением компонентов, внутри которого выбирается наиболее рациональный состав.

Уравнение материального баланса имеет следующий вид

$$\sum_{i=1}^n X_i (900\beta_i + FeO_i) = 100(900 + FeO_{агл}), \quad (1)$$

где X_i – расходы компонентов АШ, кг;
 $FeO_{агл}$ и FeO_i – содержание оксида железа FeO в агломерате (принимают до начала расчета) и в компонентах АШ, в том числе золе топлива, %;

β_i – коэффициенты выхода агломерата из соответствующих компонентов шихты, д. ед.

Расчет проводят на 100 кг годного агломерата.

Уравнение (1) представляет собой одну из форм формулы И.Л. Малкина и Ф.М. Базанова [3]. При добавлении в шихту компонентов с постоянным расходом, например шлама, его коли-

* ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

чество вводится в исходные данные. Исходный расход такого компонента учитывает наличие такого материала на складе и время его использования.

Уравнение баланса основности агломерата имеет вид

$$\sum_{i=1}^n X_i \Phi_i = 0, \quad (2)$$

где Φ_i – флюсующая способность

$$\Phi_i = [CaO]_i - B [SiO_2]_i, \%, \quad (3)$$

$[CaO]_i$ и $[SiO_2]_i$ – содержание соответствующих соединений в компонентах АШ, %;

B – основность агломерата, $B = CaO/SiO_2$.

При составлении уравнения баланса основности можно использовать более сложную формулу, учитывающую также содержание MgO и Al_2O_3 в агломерате [3].

Уравнение теплового баланса агломерации имеет следующий вид [3]

$$q_c + q_v + q_{ш} + q_s + q_{зж} + q_{д.об} + q_{ок} + q_{обр} = q_{гигр} + q_{гидр} + q_{карб} + q_{дисс} + q_{от.г} + q_{п} + q_{пот} \quad (4)$$

где q_c – теплота сгорания углерода шихты (размерности этой и следующих составляющих $кДж/100 кг$ агломерата);

q_v – теплота воздуха, поступающего к аглоленте;

$q_{ш}$ – теплота шихты;

q_s – теплота окисления серы шихты;

$q_{зж}$ – теплота зажигания шихты пламенем горна;

$q_{д.об}$ – теплота дополнительного обогрева пирога агломерата и или его термообработки;

$q_{ок.восст}$ – теплота окисления (восстановления) железа и его оксидов, содержащихся в шихте;

$q_{гигр}$ – теплота испарения гигроскопической влаги шихты;

$q_{гидр}$ – теплота разложения гидратов и испарения гидратной влаги;

$q_{карб}$ – теплота разложения карбонатов;

$q_{дисс}$ – теплота диссоциации сложных минералов исходной шихты;

$q_{от.г}$ – теплота, уносимая отходящими газами;

$q_{п}$ – теплота, уносимая пирогом агломерата;

$q_{обр}$ – теплота минералообразования при агломерации (теплота образования силикатов железа ферритов и др.);

$q_{пот}$ – тепловые потери агломашин.

Количество компонентов АШ, рассчитываемых по системе уравнений (1) – (3) равно 3. Для увеличения их количества вводят дополнительные уравнения баланса какого-либо химического элемента (соединения), например, Fe , Mn , MgO , Al_2O_3 и т.д. В систему введено дополнительно уравнение баланса химического элемента (соединения) при полном его переходе в агломерат, $кг/100 кг$ агломерата:

$$\{A\}_{агл} = 0,01 \{P[A]_p + K[A]_k + I[An]_{и} + D[A]_д + T[A]_т + D_{об} [A]_{доб}\}, \quad (5)$$

где A – химический элемент (соединение), входящее в состав шихтовых материалов.

Для получения агломерата с заданным содержанием его составляющих возможно различное соотношение компонентов, соответствующее различной себестоимости АШ. Поэтому в систему уравнений (1) – (5) введено ограничение по себестоимости АШ. Уравнение баланса себестоимости АШ рассчитывают по формуле

$$C_{тш} = 0,01 \{P \cdot C_{тp} + K \cdot C_{тк} + I \cdot C_{ти} + D \cdot C_{тд} + T \cdot C_{тт} + D_{об} \cdot C_{тдоб}\}, \text{ грн}, \quad (6)$$

где C_t – стоимость компонента, входящего в состав шихтовых материалов, $грн$.

В результате рассчитывают возможный диапазон стоимости АШ с различным соотношением компонентов, внутри которого выбирается наиболее рациональный ее состав. Поэтому первой целевой функцией для решения системы уравнений (1) – (5) является условия минимальной себестоимости АШ $C_{тш} \rightarrow \min$, а второй – условие максимальной себестоимости АШ $C_{тш} \rightarrow \max$.

В связи с тем, что расчет АШ сведен к решению задачи линейного программирования, то введены дополнительные условия неотрицательности расхода каждого из ее компонентов.

АШ состоит из концентрата, аглоруды A , известняка I , доломита D , шлама $Ш$ и коксика T .

Химический состав компонентов, шихты приведен в табл. 1. Требования, предъявляемые к агломерату, следующие: $[Fe]_{aгл} = 55,5 \%$; $[FeO]_{aгл} = 18 \%$; $B_{aгл} = [CaO]/[SiO_2] = 1,1$; $[Zn]_{aгл} = 0,01 \%$. $Ст_p = 150$ грн./т; $Ст_k = 400$ грн./т; $Ст_{и} = 150$ грн./т; $Ст_d = 180$ грн./т; $Ст_t = 320$ грн./т; $Ст_{ш} = 50$ грн./т. Принимаем долю возврата в шихте 20 %. Влажность АШ – 9 %;

В рассматриваемом ниже примере содержится 6 компонентов, следовательно, количество необходимых уравнений в системе также равно 6. Введено также уравнение баланса Zn , что позволит точнее определить расходы концентрата и шлама.

Принимаем долю вредных прососов 50 %. Теплоту, затраченную на образование силикатов и ферритов, примем равной 2 % от поступающего тепла, а тепловые потери агломашины – 11 % от теплосодержания отходящих газов.

В результате расчетов получен диапазон возможной стоимости АШ от 239,80 грн до 306,15 грн. Рассчитанные дозировки компонентов и соответствующие химсоставы агломерата приведены в табл. 2.

Диапазон стоимости АШ на производство 100 кг агломерата равен 66,35 грн и ограничен расходами шлама и доломита. В диапазоне себестоимости дозировка компонентов изменяется по линейной зависимости. Для сужения диапазона себестоимости АШ необходимо введение дополнительных уравнений химических элементов.

Максимальной стоимости АШ соответствует повышенный расход доломита, что способствует повышенному расходу топлива из-за более высоких расходов тепла. При этом цинк вносится в аглошихты только концентратом. Однако при этом в шихте меньше пустой породы и вредных примесей, что положительно отразится на доменном процессе.

Из результатов расчета также видно, что при содержании цинка $[Zn] = 0,01 \%$ в самом дешевом агломерате расход шлама составил $0,40$ кг/т. агл. В производственных условиях расход шлама составляет ≈ 5 кг/т. агл. Таким образом, содержание цинка намного больше допустимого. Кроме того, при повышенном расходе шлама, особенно в зимних условиях, происходит переувлажнение АШ влагой шлама, которая достигает 25 %. В результате влажность АШ, загружаемой в окомкователь, выше оптимальной и при загрузке на агломашину в ней повышенное содержание фракций +6 мм, которые негативно влияют на качество производимого агломерата. Для предотвращения переувлажнения АШ необходимо ввести в расчетную систему уравнений дополнительное уравнение, ограничивающее ее влажность на входе окомкователя.

Таблица 1 – Химический состав компонентов шихты

Составляющая	Содержание, %						
	концентрат	аглоруда	известняк	доломит	шлам	топливо	зола
$Fe_{общ}$	65,00	55,02	0,35	0,81	49,95	–	33,49
FeO	27,20	9,03	–	–	3,17	–	43,21
Fe_2O_3	62,80	68,67	0,50	1,16	–	–	–
MnO	0,044	0,077	0,06	0,030	–	–	0,24
SiO_2	7,35	9,50	0,49	2,76	4,75	–	32,08
Al_2O_3	0,21	3,71	0,19	0,66	–	–	13,62
CaO	0,77	0,90	54,34	31,57	10,23	–	5,65
MgO	0,40	0,69	0,86	19,26	–	–	1,14
$S_{орг}$	–	–	–	–	–	0,60	–
FeS	–	–	–	–	–	0,715	–
SO_3	0,07	0,60	0,14	0,025	–	1,01	3,92
P_2O_5	0,06	0,12	0,03	0,04	–	–	0,14
Zn	0,022	–	–	–	1,4	–	–
CO_2	1,10	2,06	43,39	45,92	–	–	–
$H_2O_{гидр}$	–	6,23	–	–	–	–	–
$C_{нел}$	–	–	–	–	–	69,93	–
$S_{общ}$	Нет сведений				–	1,26	–
ЛВ	–	–	–	–	–	2,93	–
Зола	–	–	–	–	–	25,88	–

Таблица 2 – Дозировки компонентов и соответствующие химсоставы агломерата

Компонент	Расход, кг/100 кг агломерата	Вклад компонента шихты в химсостав агломерата, %							
		Fe	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Zn
Минимальная себестоимость АШ – 239,80 грн./т									
Концентрат	19,87	12,92	0,01	1,46	0,04	0,15	0,08	0,01	0,004
Аглоруда	75,71	41,79	0,06	7,19	2,81	0,68	0,52	0,09	0
Известняк	16,98	0,06	0,01	0,08	0,03	9,23	0,15	0,01	0
Доломит	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Топливо	6,12	0,53	0,004	0,51	0,22	0,09	0,02	0	0
Шлам	0,40	0,20	0	0,02	0	0,04	0	0	0,006
Агломерат*	119,08	55,5	0,08	9,26	3,10	10,19	0,77	0,11	0,01
Максимальная себестоимость АШ – 306,15 грн./т									
Концентрат	45,45	29,54	0,02	3,34	0,10	0,35	0,18	0,03	0,01
Аглоруда	45,78	25,27	0,04	4,35	1,70	0,41	0,32	0,05	0
Известняк	8,71	0,03	0,01	0,04	0,02	4,73	0,08	0,003	0
Доломит	12,27	0,10	0,004	0,34	0,08	3,87	2,36	0,005	0
Топливо	6,41	0,56	0,004	0,53	0,23	0,09	0,02	0,002	0
Шлам	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Агломерат*	118,62	55,5	0,07	8,60	2,12	9,46	2,96	0,09	0,01

*Основность $B = 1,1$

В перспективе в расчет АШ можно дополнительно ввести уравнения дозируемых компонентов на параметры аглопроцесса и решать их методом нелинейного программирования. Используя предложенную методику расчета АШ, возможно осуществить «сквозной» расчет шихты аглодоменного производства с минимизацией себестоимости чугуна [5].

Выводы

1. Получено, что при принятых условиях за счет использования шлама себестоимость агломерата возможно снизить на 66,35 грн./т агломерата.
2. Фактический средний производственный расход шламов в аглошихту больше рассчитанного в 8 раз, что существенно увеличивает содержание цинка в агломерате.

Перечень ссылок

1. *Петрушов С.Н.* Современный агломерационный процесс: Монография / *С.Н. Петрушов.* – Алчевск: ДонГТУ, 2006. – 360 с.
2. Производство агломерата и окатышей: Справ. изд. / *С.В. Базилевич, А.Г. Астахов, Г.М. Майзель и др.* – М.: Металлургия, 1984. – 206 с.
3. *Вегман Е.Ф.* Краткий справочник доменщика / *Е.Ф. Вегман.* – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
4. Оптимизация технологических параметров и состава шихты в аглодоменном производстве. Научные проблемы современной металлургии. Сборник научных трудов, посвященный 100-летию со дня рождения профессора Соколова / *А.А. Томаш, В.П. Тарасов, С.В. Кривенко и др.* – Мариуполь; ПГТУ, 2007. – 297 с.

Рецензент: А.А. Томаш
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 20.02.2008