

С.А. Гаврилко⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
А.А. Киселев⁽¹⁾, студент
Г.А. Громак⁽¹⁾, ассистент
Н.В. Личконенко⁽¹⁾, ст. преподаватель
Ю.В. Моисейко⁽¹⁾, ассистент
В.М. Печенникова, доцент
Ю.С. Гаврилко⁽²⁾, инженер II-ой категории

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЯГЧАЕМОСТИ ВОССТАНОВЛЕННОГО АГЛОМЕРАТА РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ

⁽¹⁾Запорожская государственная инженерная академия,

⁽²⁾ОАО "Металлургический комбинат "Запорожсталь", г. Запорожье

Проведено дослідження розм'якшення відновленого агломерату різних фракцій з метою прогнозування поведінки його за умов доменної печі та розробки рекомендацій, що спрямовані на поліпшення показників її роботи.

Проведено исследование размягчаемости восстановленного агломерата разных фракций с целью прогнозирования поведения его в условиях доменной печи и разработки рекомендаций, направленных на улучшение показателей ее работы.

Введение. На всех этапах развития доменного производства важнейшее место в решении задачи увеличения выплавки чугуна занимают вопросы улучшения физико-химических свойств сырья. Выбор рациональных путей повышения технико-экономических показателей доменной плавки во многом определяется полнотой информации о поведении шихтовых материалов в печи, об изменении их агрегатного состояния в процессе нагрева при разных температурах. Для повышения интенсивности плавки большое значение имеют процессы размягчения и плавления агломерата. Состояние агломерата и его поведение в низкотемпературной области доменной печи достаточно подробно рассмотрено в работах [1-4]. В меньшей степени изучено поведение агломерата в высокотемпературной области печи, где происходят процессы размягчения и плавления шихты. Поведение материалов здесь определяется, главным образом, температурными условиями, физико-химическими свойствами и степенью восстановления. Особую актуальность изучение данных вопросов приобретает в условиях дальнейшего совершенствования доменного процесса, направленного на обеспечение ровного хода печи, улучшение технико-экономических показателей плавки и получение качественного чугуна.

Задача работы – исследование температуры размягчения восстановленного агломерата разных фракций с целью прогнозирования поведения его в условиях доменной печи для разработки рекомендаций по улучшению ее работы.

Результаты исследования. Пробы восстановленного агломерата разных фракций (массой 5...7 кг) отбирали под бункерами доменной печи во время выполнения рассева. Каждую фракцию агломерата дробили, затем рассеивали на ситах размером ячейки 3 x 3 и 1 x 1 мм. Для дальнейших исследований использовали агломерат фракции 1...3 мм. Образцы восстановленного агломерата получали на установке по определению его восстановимости. В качестве восстановителя использовали водород. Степень восстановления образцов оценивали по потере их массы. Исследования проводили с

использованием методики, описанной в работах [5,6]. Повышение температуры в рабочем пространстве печи производили с постоянной скоростью (10 град/мин).

Температурой начала размягчения считали температуру, при которой началась усадка агломерата, температурой конца размягчения – температуру, при которой наконечник погружался в агломерат на глубину 15 мм [6].

По своему химическому (табл. 1) и гранулометрическому (табл. 2) составу агломерат неоднороден. Наличие разных фракций определяется полнотой спекания агломерата на агломерационной ленте и, следовательно, полнотой прохождения физико-химических превращений в процессе спекания.

Таблица 1 – Химический состав разных фракций агломерата

Фракция, мм	Химический состав, %								
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Fe	FeO	CaO _{св}	CaO+MgO/SiO ₂
+60	13,54	10,93	1,06	1,29	0,61	51,49	10,47	1,15	1,34
60...40	13,96	10,74	0,99	1,30	0,48	51,40	11,43	1,09	1,39
40...25	13,71	10,61	1,05	1,36	0,52	51,67	12,55	1,13	1,39
25...10	13,00	12,02	0,98	1,30	0,63	50,91	13,09	1,26	1,16
10...5	13,49	10,48	1,04	1,27	0,48	51,39	13,94	1,41	1,38
-5	13,78	9,43	1,03	1,28	0,58	50,14	11,65	1,76	1,57

Таблица 2 – Фракционный состав исследуемого агломерата ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» [7]

Фракция, мм	+60	60...40	40...25	25...10	10...5	-5
Содержание, %	1,87	2,10	6,75	28,34	45,74	15,20

Основная масса агломерата (80,83%) представлена размерами частиц 5...40 мм.

Химический состав восстановленных агломератов разных фракций, температура начала (t_1) и конца (t_2) размягчения, а также интервал размягчения (Δt) приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Химический состав разных фракций восстановленных агломератов, температура начала (t_1), конца (t_2) и интервал (Δt) размягчения

Фракция, мм	Химсостав, %				Степень восстановления агломерата, %	Параметры размягчения, °С		
	Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe _{мет}		t_1	t_2	Δt
1	2	3	4	5	6	7	8	9
+60	51,49	61,93	10,47	-		1144	1231	87
+60	52,25	35,53	35,20	-	11,60	1081	1191	110
	53,05	22,50	46,54	1,70	18,27	1068	1175	107
	54,96	7,73	57,14	5,10	28,17	1057	1166	109
	55,98	5,47	48,14	14,70	40,99	1045	1173	128
	56,74	3,43	47,74	17,20	44,33	1047	1181	134
	57,22	3,17	38,81	24,80	54,23	1051	1196	145
	59,24	2,80	31,60	31,70	62,41	1033	1188	155
	61,25	1,76	23,96	41,38	72,02	1025	1208	183
	62,05	1,71	12,92	50,80	83,84	1035	1229	194
	63,12	1,83	5,06	57,90	92,01	1054	1285	231
-60 +40	51,40	60,73	11,43	-		1138	1211	73
	53,19	36,70	35,40	-	9,06	1085	1188	103
	54,86	14,23	57,79	-	17,58	1063	1166	103

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	56,34	13,38	50,26	7,14	25,82	1059	1169	110
	57,43	6,77	48,72	14,83	38,05	1058	1163	105
	58,52	5,74	46,27	18,55	42,20	1061	1178	117
	59,35	3,23	39,52	26,39	53,03	1049	1183	134
	60,98	4,16	28,95	35,58	63,01	1046	1200	154
	63,72	2,63	18,14	47,79	76,78	1058	1205	147
	65,36	2,43	13,97	52,81	81,55	1057	1223	166
	66,11	1,40	4,66	61,51	92,97	1080	1330	250
-40 +25	51,67	59,87	12,55	-		1138	1206	68
	49,33	42,83	24,88	-	11,42	1074	1195	121
	51,51	15,27	52,50	-	21,69	1075	1176	101
	52,12	12,97	48,65	5,20	29,16	1044	1170	126
	56,89	7,04	39,29	21,40	47,76	1056	1179	123
	57,03	3,67	32,40	29,26	60,00	1048	1183	135
	58,55	4,10	19,31	40,66	73,40	1032	1184	152
	59,38	3,96	15,90	44,24	77,25	1031	1191	160
	60,12	3,00	11,30	49,23	83,57	1045	1210	165
	61,06	1,44	6,58	54,93	90,89	1036	1230	194
	61,50	0,70	5,38	56,83	93,20	1043	1250	207
-25 +10	51,91	58,18	13,09	-		1072	1177	105
	54,32	34,98	38,36	-	6,58	1045	1132	87
	54,17	19,38	52,21	-	14,44	1045	1135	90
	55,39	10,04	49,63	9,67	31,14	1042	1145	103
	55,84	9,17	45,62	13,94	36,69	1040	1140	100
	56,15	4,44	42,95	19,64	46,56	1023	1138	115
	57,97	3,77	35,30	27,88	55,89	1020	1160	140
	58,12	3,37	28,68	33,46	63,70	1003	1173	170
	59,95	1,80	20,68	42,61	74,75	1033	1230	187
	60,25	0,77	18,65	45,21	78,49	1020	1220	200
	62,54	2,14	9,18	53,90	86,84	1043	1240	197
-10 +5	51,39	57,93	13,94	-		1085	1160	75
	51,92	45,10	26,20	-	5,52	1075	1157	82
	52,84	20,51	49,52	-	16,26	1036	1126	90
	53,14	15,67	51,77	1,95	20,90	1024	1120	96
	54,07	14,81	48,75	5,82	25,44	997	1125	128
	54,84	11,97	44,80	11,65	33,84	1012	1133	121
	55,29	11,23	29,06	24,85	52,00	1008	1143	135
	58,14	6,20	28,23	31,85	60,25	995	1144	149
	59,67	4,59	18,44	42,14	73,29	1022	1163	141
	62,59	2,50	13,44	50,40	81,74	1013	1188	175
	63,28	2,40	4,24	58,30	91,89	1038	1253	215
-5	50,14	58,68	11,65	-		1052	1148	96
	51,01	47,71	22,65	-	4,21	1006	1122	116
	51,93	40,38	30,40	-	6,54	1009	1130	121
	53,16	16,13	51,17	2,08	19,71	1000	1125	125
	54,09	11,11	52,91	5,30	25,26	970	1110	140
	54,70	8,26	46,91	12,47	36,11	956	1110	154

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	56,86	4,54	50,56	22,17	48,64	948	1108	160
	57,48	3,70	30,52	31,18	60,92	950	1120	170
	59,79	2,19	17,01	45,04	78,01	940	1135	195
	60,79	1,54	9,07	52,66	87,72	973	1158	185
	65,03	2,01	0,72	63,06	94,95	1025	1240	215

Из табл. 3 видно, что агломерат изученных фракций обладает характерной особенностью: повышение степени его восстановления до 60...70% приводит к снижению температуры начала размягчения, а восстановление до 92...94% повышает температуру начала размягчения, однако она по абсолютному значению ниже, чем у невосстановленного агломерата.

Из анализа представленных данных следует, что самую низкую температуру начала и конца размягчения имеет агломерат фракции менее 5 мм. По мере увеличения крупности фракции температура начала и конца размягчения повышается и самая высокая температура зафиксирована для агломерата фракции 60...40 мм. Наличие в агломерате фракции менее 5 мм, наряду со снижением газопроницаемости слоя шихты, приводит и к более раннему образованию размягченной массы по высоте печи. Для разработки рекомендаций по снижению содержания в готовом агломерате указанной мелкой фракции необходимо рассмотреть условия его спекания путем изучения минералогических составляющих спеченного агломерата.

Результаты исследования минералогических составляющих по высоте спекаемого слоя [8] показывают, что агломерат по высоте слоя неоднороден по составу и свойствам. Верх спеченного слоя из-за кратковременного пребывания шихты при высоких температурах (до 1400 °С) и последующего быстрого охлаждения воздухом, отличается низкой прочностью, содержит большое количество мелкой фракции. Агломерат в нижней части спеченного слоя, находясь длительное время при высоких температурах, оплавляется, при этом его прочность значительно возрастает. Основные причины неравномерного состава и качества спеченного агломерата по высоте слоя – сегрегация материалов при загрузке шихты на агломерационную ленту и неблагоприятный температурно-тепловой режим по высоте спекаемого слоя.

Неодинаковый температурно-тепловой режим верхнего и нижнего слоев спекаемого агломерата приводит к неравномерности свойств агломерата. Температура в горне для зажигания топлива шихты составляет 1250 °С. Так как температура спекания повышается постепенно, по мере прохождения зоны горения сверху вниз, то самый верхний слой шихтовых материалов не получает необходимого количества теплоты для нормального спекания, не успевает полностью пройти фазовые превращения и, как следствие, в микроструктуре полученного агломерата преобладают остаточные зерна шихты, а связка представлена нераскристаллизованным стеклом.

Максимальное количество свободной извести в верхних слоях спеченного агломерата объясняется сегрегацией шихты; полное же исчезновение исходной извести внизу объясняется повышением температуры спекания шихты, увеличением времени пребывания шихты при этой температуре, что способствует взаимодействию извести с расплавом до ее полного исчезновения. Неравновесность процесса усугубляется также локальным обогащением отдельных участков шихты коксиком. В месте скопления коксика быстро возрастает температура спекания; восстановительные условия способствуют образованию в этом микрообъеме легкоплавкого железосиликатного

расплава, обогащенного оксидом железа (II). Быстрое охлаждение верхней части спеченного агломерата холодным воздухом тормозит протекание данного процесса; в результате наблюдаются области агломерата, где в одном микрообъеме наряду с исходной гематитовой рудой и кварцем существуют участки железосиликатного расплава с мельчайшими кристаллитами магнетита, вюститита и остатками коксика. Контакт различных по составу и структуре микрообъемов агломерата является наименее прочным. В работах [9,10] предлагается уменьшить отрицательное влияние сегрегации шихтовых материалов, путем понижения верхнего предела крупности руды и известняка. Одновременно это будет способствовать более глубокому протеканию реакций образования агломерата с полным усвоением извести, что, в свою очередь, устраняет «белые» вкрапления неусвоенной извести и области кристаллизации двухкальциевого силиката. Для выравнивания температурно-теплового режима следует перенести избыток теплоты из нижней части слоя в верхнюю, увеличив содержание углерода в шихте верхней части спекаемого агломерата и одновременного применения нагретого воздуха на первой трети длины агломерационной ленты после зажигательного горна. Также возможно применение удлиненного горна – в этом случае верхний слой спекаемого агломерата будет находиться в зоне воздействия высоких температур более длительное время, что позволяет частицам агломерата взаимодействовать в более полном объеме и способствует повышению его прочности [8].

Небольшое количество новообразований магнетита в верхних зонах объясняется отсутствием глубоких преобразований в шихте в начале спекания. Крупные куски руды (5...12 мм) не успевают расплавиться, что обусловлено нехваткой теплоты и последующим резким охлаждением. Реакции с участием жидкой фазы (реакции образования стекла, реже ферритов кальция и силикатов) имеют ограниченное развитие. В таких условиях невозможно полное прохождение раскристаллизации всех компонентов шихты.

По мере нарастания температуры в спекаемом слое агломерата степень взаимодействия шихтовых материалов возрастает за счет того, что теплоты достаточно для расплавления частиц шихты и реакции взаимодействия протекают в жидкой фазе. Возле колосников агломерационная шихта длительное время находится при температуре порядка 1600 °С, в результате чего агломерат сильно оплавливается, что оказывает положительное влияние на его прочностные характеристики. Резко возрастает количество стекла, раскристаллизованного до силикатов различного состава.

На изученном производственном агломерате четко видна неравновесность процесса агломерации, обусловленная значительной неоднородностью вещественного и гранулометрического состава шихты. Уменьшение содержания верхнего слоя во всей массе агломерата возможно путем увеличения высоты спекаемого слоя шихты до 500...600 мм. В этом случае доля верхнего слоя в общем объеме агломерата уменьшается, а спекание улучшается благодаря более полному использованию регенерированной теплоты [10-11].

Заключение.

1. Результаты проведенных исследований позволили установить, что самую низкую температуру размягчения во всем интервале степени восстановления имеет фракция менее 5 мм, самую высокую – фракция 60...40 мм.

2. Основными причинами неравномерного состава и качества спеченного агломерата по высоте слоя является сегрегация материалов при загрузке шихты на агломерационную ленту и неодинаковый температурно-тепловой режим по высоте спекаемого слоя.

3. Повышение прочности агломерата возможно путем увеличения высоты спекаемого слоя шихты до 500...600 мм. В этом случае спекание улучшается благодаря более полному использованию регенерированной теплоты, а доля верхнего, менее прочного, слоя во всем объеме агломерата уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цылев Л. М.* Восстановление и шлакообразование в доменном процессе / Л. М. Цылев. – М.: Наука, 1970. – 157 с.
2. Производство и применение магнезиального агломерата для доменной плавки / *Е. П. Добронравов*, Ю. С. Кравец, А. А. Вовк [и др.] // *Металлургия и коксохимия: научн.-техн. сб.* – Киев: Техника, 1971. – Выпуск 24. – С. 19-24 (Металлургия чугуна).
3. Анализ восстановительных процессов в шахте доменной печи объемом 2700 м³ / *З. И. Некрасов*, М. Т. Бузоверя, В. Е. Геращенко, В. Л. Покрышкин // *Доменное производство: отрасл. темат. сб.* – М.: Metallurgia, 1975. – Вып. 2. – С. 85-100.
4. *Гладков Н. А.* Поведение железорудных материалов с различной степенью восстановления в вязко-пластической зоне / Совершенствование технологии доменного производства: отрасл. темат. сб. – М.: Metallurgia, 1988. – С. 27-31.
5. *Потебня Ю. М.* Влияние степени восстановления агломерата на его температуру размягчения / Ю. М. Потебня, С. А. Гаврилко // *Металлургия и коксохимия: научн.-техн. сб.* – Киев: Техника, 1972. – Выпуск 29. – С. 14-20 (Металлургия чугуна).
6. Определение температуры размягчения восстановленного агломерата / *Ю. М. Потебня*, С. А. Гаврилко, Р. Г. Рихтер, Е. В. Савченко // *Известия Вузов. Черная металлургия.* – 1971. – № 12. – С. 27-29.
7. *Бернштейн Р. С.* Повышение эффективности агломерации / Р. С. Бернштейн. – М.: Metallurgia, 1979. – 144 с.
8. *Мальшева Т. Я.* О механизме минералообразования при спекании офлюсованного агломерата из смеси криворожских гематитовых руд и тонкоизмельченного магнетитового концентрата // Т. Я. Мальшева, Г. А. Соколов, И. И. Гультай // *Сталь.* – 1966. – № 10. – С. 878-882.
9. Получение высокопрочного агломерата с основностью 1,2-1,4 / *Т. Я. Мальшева*, А. В. Руднева, Г. А. Соколов, И. И. Гультай // *Сталь.* – 1967. – № 8. – С. 673-676.
10. Совершенствование технологии спекания агломерата / *Р. С. Бернштейн*, Б. А. Станишевский, В. Н. Быткин [и др.]. – Днепропетровск: Промінь, 1975. – 120 с.
11. *Кухарь А.С.* Производство и качество агломерата / А. С. Кухарь, В. А. Мартыненко, В. П. Шевченко. – М.: Metallurgia, 1977. – 158 с.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2009 р.
Рецензент – проф. М.Ф. Колесник