

4. Перетятко В.Н., Темлянцев Н.В., Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Нагрев стальных слэбов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150100 – Metallurgy. – М.: Теплотехник, 2008. – 178 с.
5. Гуревич Л. М., Трыков Ю.П., Арисова В.Н., Пономарева И.А., Голик А.А. Моделирование контактного упрочнения в магниево-алюминиевых композитах // Известия ВолгГТУ. Серия Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 9. № 9 (136). 2014. С. 72 – 76.
6. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metal subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. P. 541 – 547.
7. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21. P. 31 – 48.
8. Кузькин В.А., Михалюк Д.С. Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона–Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 1. С. 32 – 43.
9. Giraud E., Rossi F., Germain G., Outeiro J.C. Constitutive Modelling of AZ31B-O Magnesium Alloy for Cryogenic Machining // 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), (CIRP CMMO), Italy (2013). DOI : 10.1016/j.procir. 2013.06.144.
10. Abaqus 6.12. Analysis User's Manual. Vol. 1. Part 1. Introduction, spatial modeling and execution. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012. – 831 p.
11. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Голик А.А. Моделирование контактного упрочнения титано-стального композита с мягкой прослойкой // Известия ВолгГТУ. Серия Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 9. № 9 (136). 2014. С. 68 – 72.

© 2014 г. Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков,
А.А. Голик, И.А. Пономарева, В.Н. Арисова
Поступила 28 августа 2014 г.

УДК 669.162.12:622

В.М. Павловец

Сибирский государственный индустриальный университет

ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЗА СЧЕТ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ

Технологическая схема производства железорудных окатышей включает в себя окомкование шихты с получением влажных окатышей на низкотемпературной стадии процесса и упрочняющую термическую обработку окомкованного сырья на высокотемпературной стадии технологии, после которой окисленные окатыши пригодны для длительной транспортировки к потребителям и для последующей плавки или металлзации. Упрочняющая термическая обработка окатышей в режимах сушки, подогрева и обжига с использованием 100 % технологического топлива (20 – 25 м³/т) и 80 % электро-

энергии (5 – 10 кВт·ч/т) осуществляется на обжиговых конвейерных машинах, где и происходит основное структурообразование (формируется пористость, межчастичная минеральная связка). Процессы формирования формы и размеров пор, характера (открытая, закрытая) пористости при обжиге являются трудноконтролируемыми, поскольку на них накладываются многочисленные сопутствующие физико-химические процессы. Окомкование влажной железорудной шихты на низкотемпературной стадии технологии в окомкователе свободно от внешнего теплового и струк-

турообразующего воздействия. При использовании перспективных методов струйного теплосилового воздействия на комкуемую шихту и новых функциональных возможностей окомкователей разных типов [1 – 5] можно снизить затраты на тепловую обработку окатышей, увеличить производительность технологических агрегатов и сформировать оптимальную для последующего обжига и заключительной восстановительно-тепловой обработки структуру.

В металлургии широко используются многофазные струи, которые состоят из потока твердых и (или) жидких частиц, рассредоточенных в высоконапорном газообразном энергоносителе (сжатом или вентилятором воздухе, остром паре, продуктах факельного сжигания топлива, высокотемпературной плазме). Трехфазные струи применяют для нанесения защитных, теплоизоляционных и упрочняющих покрытий, которые позволяют изменять свойства изделия. При использовании этих технологий можно получить плотный напыленный слой твердых частиц на поверхностях металлов, футеровок и ограждений без участия механических систем [6, 7]. Двухфазные (жидкости в потоке газа) струи широко используют для распыливания жидкостей и интенсификации охлаждения нагретых поверхностей.

Целью настоящей работы является исследование принципов структурообразования, основанных на струйной теплосиловой обработке влажной шихты на низкотемпературной стадии технологии формирования окатышей.

При работе окомкователя по рассматриваемой технологии (зародышеобразование напылением и доокомкование (ЗНД)) [8 – 10] на днище тарели в рабочей зоне окомкователя из влажной шихты формируется шихтовый гарнисаж (ШГ), который выходит на поверхность холостой зоны в верхней четверти тарели. На гарнисаж низкотемпературными воздушно-шихтовыми струями (ВШС) напыляется влажная шихта (расход $G_{ш1}$). Постепенно формируется плотный напыленный слой, который вместе с верхней частью гарнисажа принудительно разделяется на множество зародышевых фрагментов и «очищается» до заданной толщины; в результате получается шихтовая матрица для получения зародышей с управляемой структурой (рис. 1).

Зародыши – это прочные (не менее 40 – 80 кПа) сформованные из влажной шихты кусковые тела, способные перекачиваться по гарнисажу и при накатывании на поверхность шихтовой мелочи обеспечить рост оболочки окатышей. Для получения зародышей на поверхности напыленного слоя металлическими

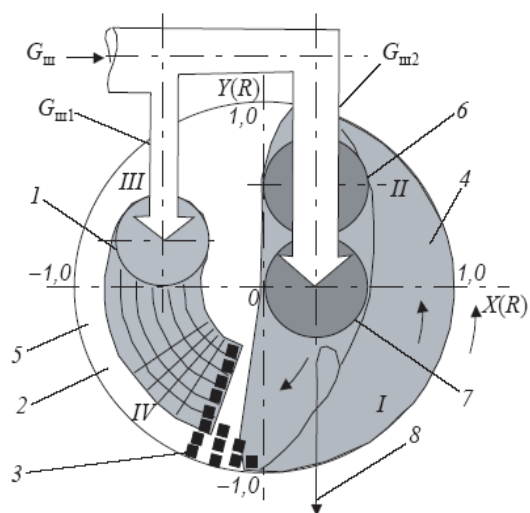


Рис. 1. Схема получения окатышей способом принудительного зародышеобразования:

1 и 2 – области напыления (напыленный слой) и принудительного зародышеобразования; 3 – зародыши; 4 и 5 – рабочая и холостая зоны окомкователя; 6 и 7 – области увлажнения и доокомкования; 8 – годные окатыши

делителями, установленными в нижней части холостой зоны тарели, наносят продольные, а затем поперечные разрезы глубиной до 5 – 10 мм. Зародыши, сцепленные с гарнисажем, срезаются (очищаются) с его поверхности для получения кусков, близких по форме к сферокубу или сфероприме. Из холостой зоны окомкователя зародыши поступают в рабочую зону, где увлажняются и комкуются влажной шихтой потока (расход которой составляет $G_{ш2}$) до размеров кондиционных окатышей.

Воздушно-шихтовая струя формируется в технологическом пространстве между разгрузочным узлом питательного конвейера и днищем окомкователя и создает структурообразующие и энергетические воздействия на сырую шихту потока и плотный напыленный слой в холостой зоне окомкователя. При ударе влажной шихты о гарнисаж ее кинетическая энергия трансформируется в энергию формирования напыленного слоя, сопровождаемого уплотнением (2400 – 3600 кг/м³), упрочнением (до 200 МПа) и частичным обезвоживанием напыленного слоя. Влажность слоя, из которого формируются зародыши, на 0,3 – 0,7 % ниже влажности загружаемой шихты при работе на холодном (20 – 30 °С) сжатом воздухе. Использование сжатого воздуха с температурой 140 – 150 °С (полученного, например, в компрессоре без охладителя) или подогрев его в рекуперативном теплообменнике до 180 – 200 °С позволяет снизить влажность на 2,5 – 3,2 %. Часть шихты (5 – 20 %) в виде выбросов из зоны напыления поступает в рабочее про-

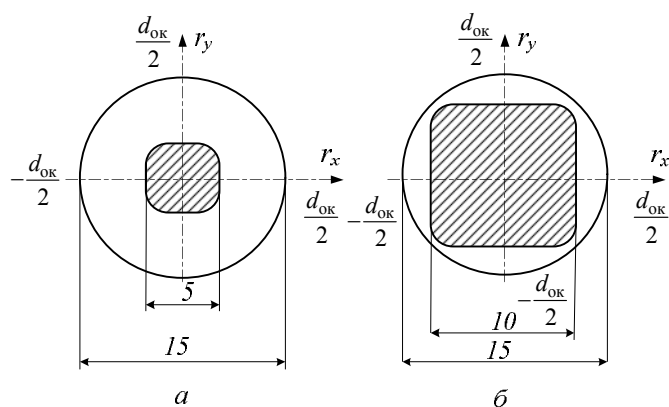


Рис. 2. Схема окатыша, сформированного на зародышах (заштрихованная область – зародыш, незаштрихованная – оболочка окатыша) при использовании зародышей размером 5 мм (а) и 10 мм (б)

странство окомкователя и участвует в процессе окомкования.

Влажные окатыши по технологии ЗНД структурно состоят из расположенных в их центре (сердцевине) зародышей влажностью $W_{зр} = (0,92 \div 0,94)W_{ш}$ и плотностью $\rho_{зр} = 2400 - 3200 \text{ кг/м}^3$ и шихтовой оболочки влажностью $W_{об} = (1,0 \div 1,1)W_{ш}$ и плотностью $\rho_{об} = 3200 \div 3600 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2) (здесь и далее индексы «зр», «ш» и «об» означают зародыши, загружаемая шихта и шихтовая оболочка).

Эксперименты проводили на лабораторном окомкователе диам. 0,62 м, работающем с частотой 6 об/мин и наклоненном к горизонту под углом 45° . Шихту Тейского железорудного концентрата (диаметр частиц $d_{ч} = 0,068 \text{ мм}$, влажность 8,25 %, расход 0,01 кг/с) напыляли струйным аппаратом с относительного расстояния $L/d_{са}$ 5, 10 и 15 (где L и $d_{са}$ – расстояние от среза сопла до гарнисажа и диаметр сопла струйного аппарата, м). Угол атаки к гарнисажу составлял 90° . Схема отбора проб и направление фото- и видеосъемки показаны на рис. 3.

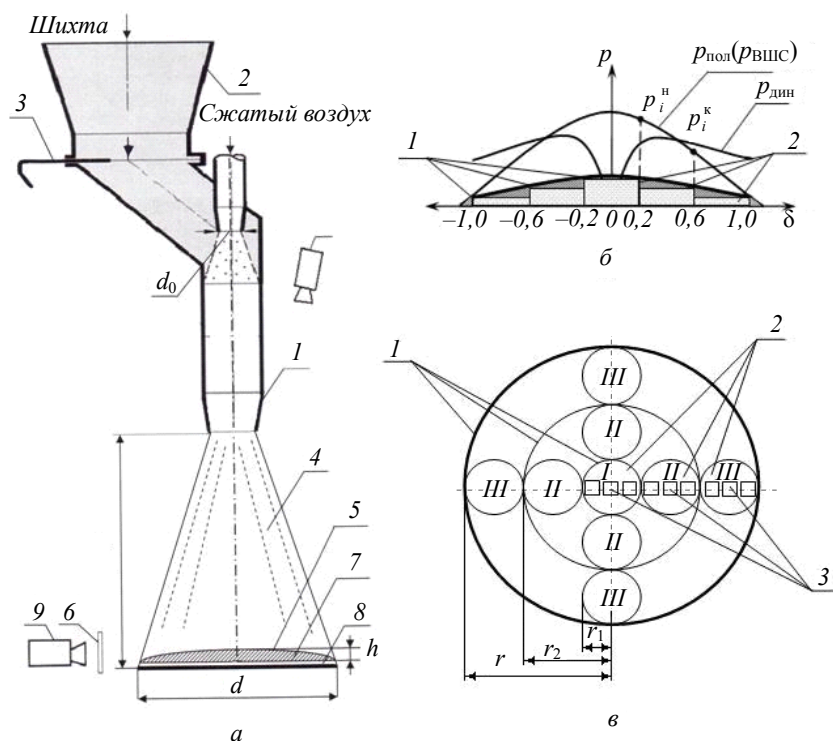


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для видеосъемки процесса напыления влажной шихты на контрастную поверхность (а), поле давлений струи на поверхности напыленного слоя (б) и схема взятия образцов в зонах I – III (в):

а: 1 – струйный аппарат; 2 – бункер шихты; 3 – шибер; 4 – воздушно-шихтовая струя; 5 – напыленный слой шихты; б – защитный стеклянный экран; 7 – контрастная основа; 8 – опора; 9 – видеокамера; в: 1 – границы зон; 2 – расположение образцов в зонах; 3 – места фотосъемки

Методика отбора проб напыленного слоя для анализа пористости образцов подробно описана в работах [11, 12]. В первой серии опытов определяли плотность и пористость образцов в зависимости от безразмерного текущего радиуса $\delta = r_i/r$ (где r_i и r – текущее значение радиуса и радиус напыленного слоя, м; i – порядковый номер зоны) и параметра $L/d_{\text{са}}$. Зона I ($\delta_1 = 0 \div 0,2$) находилась в центре (на оси струи) в круге радиусом r_1 . Зона II ($\delta_2 = 0,2 \div 0,6$) занимает кольцевое пространство вокруг зоны I, ограниченное внутренним радиусом r_1 и наружным радиусом r_2 . Периферийная зона III ограничена кольцом радиусами r_2 и r ($\delta_3 = 0,6 \div 1,0$). Пористость (открытую $P_{\text{отк}}$, закрытую P_3 и общую P_0 , %) определяли по стандартной методике (ГОСТ 25732 – 88 Методика определения истинной, объемной, насыпной плотности и пористости), дублируя результаты в нескольких сериях экспериментов. Результаты опытов первой серии экспериментов представлены в таблице.

Во второй серии опытов по вышеприведенной методике получали сферокубические зародыши размерами (высота ребра) 5, 10, 12 мм и средней плотностью 2910 кг/м^3 , полученные делением напыленного слоя в центральной зоне. Напыленный слой формировали на тарели ($X(R) = 0,5$). Зародыши доокомковывали в режиме переката до окатышей размером 16 мм. Полученные окатыши обжигали при температуре 1200°C в течение 10 мин. Исследовали влияние соотношения массы зародыша в окатыше ($m_{\text{зр}}/m_{\text{ок}}$) на плотность и пористость (рис. 4).

Общая и открытая пористость напыленного слоя возрастают пропорционально увеличению $L/d_{\text{са}}$, падению среднего давления ВШС ($P_{\text{вшс}}$) и росту координаты δ в направлении от оси к периферии. Для объяснения полученных результатов провели анализ макроструктуры поверх-

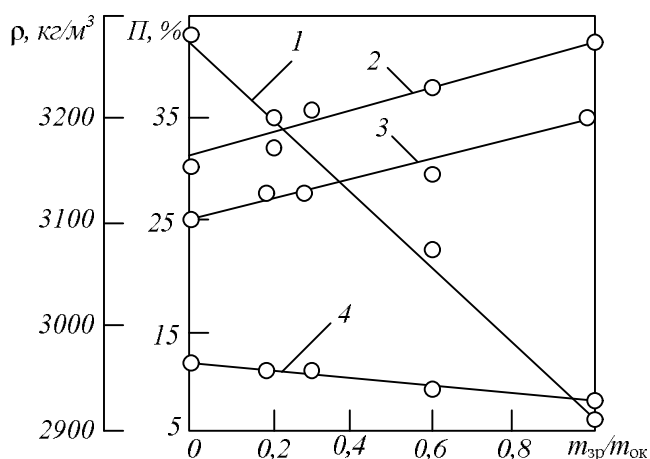


Рис. 4. Зависимость кажущейся плотности и пористости обожженных окатышей от массовой доли зародышей в окатышах (соотношение $m_{\text{зр}}/m_{\text{ок}} = 1$ соответствует структуре зародыша, а $m_{\text{зр}}/m_{\text{ок}} = 0$ соответствует структуре окатыша):

1 – кажущаяся плотность окатышей; 2, 3 и 4 – общая, открытая и закрытая пористость

ности свежеполученного напыленного слоя (рис. 5).

В процессе напыления влажной шихты на поверхности напыленного слоя формируются концентрические извилистые поры, глубина и форма которых зависят от зоны этого слоя, влажности, расхода шихты и параметров струйного процесса ($L/d_{\text{са}}$, угла атаки, содержания шихты в ВШС). Формирование пор обусловлено сдвиговой деформацией влажной шихты, которая, в свою очередь, связана с величиной и характером динамического давления ($P_{\text{дин}}$) воздуха, движущегося на поверхности напыленного слоя. Как видно (рис. 3), динамическое давление воздуха меняется от нуля на оси до максимального значения в зоне II ($\delta = 0,3 \div 0,4$), после чего падает до минимума в зоне III. При течении воздуха на поверхности напыленного слоя возникают силы трения,

Пористость образцов после их обжига при температуре 1200°C в течение 10 мин (через косую приведены значения при $L/d_{\text{са}}$ 5, 10 и 15)

$X(R)$	δ	$\rho_{\text{каж}}, \text{кг/м}^3$	$P_0, \%$	$P_{\text{отк}}, \%$	$P_3, \%$
0	0 – 0,2	3240/2916/2630	34,4/40,1/46,7	24,3/30,4/38,6	10,1/9,7/8,1
	0,2 – 0,6	3110/2810/2585	37,0/43,1/47,7	26,9/33,6/40,5	10,0/9,5/7,2
	0,6 – 1,0	2960/2705/2512	40,0/45,2/49,1	30,6/36,2/42,6	9,4/9,0/6,5
0,5	0 – 0,2	3148/2820/2558	36,2/42,9/48,2	26,0/34,1/40,9	10,2/8,8/7,3
	0,2 – 0,6	3006/2715/2510	39,1/45,0/49,1	29,9/37,4/42,1	9,2/7,6/7,0
	0,6 – 1,0	2854/2612/2460	42,2/47,1/50,2	33,1/38,7/43,8	9,1/8,4/6,4
0,9	0 – 0,2	3105/2770/2522	37,1/43,9/48,9	27,5/36,1/41,8	9,6/7,8/7,1
	0,2 – 0,6	2954/2665/2480	40,2/46,0/49,8	31,2/38,4/42,8	9,0/7,6/7,0
	0,6 – 1,0	2802/2586/2426	43,2/47,6/50,9	34,7/41,1/44,7	8,5/6,5/6,2
Примечание. $P_0 = (1 - \rho_{\text{каж}}/\rho_{\text{ист}})100 \%$, $\rho_{\text{ист}} = 4936 \text{ кг/м}^3$.					

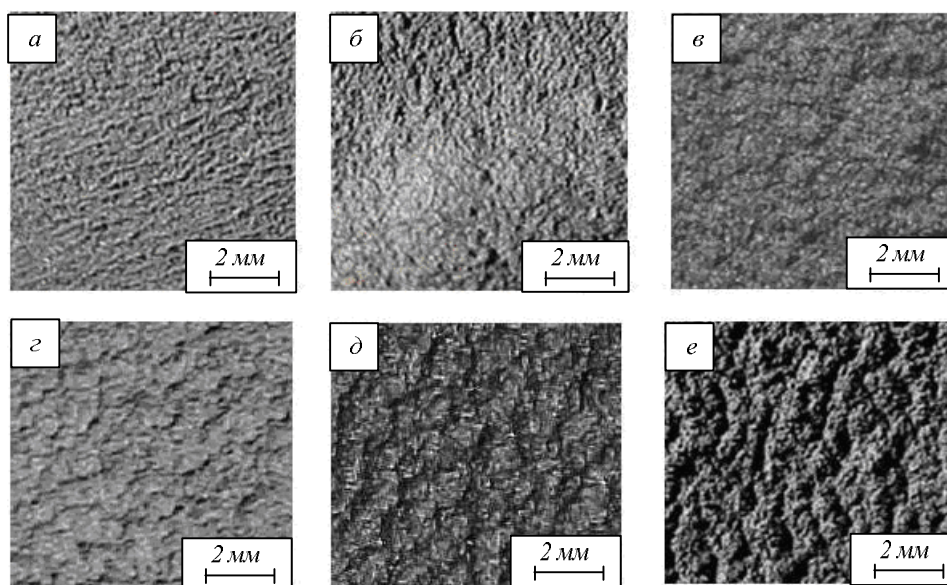


Рис. 5. Макроструктура напыленного слоя:

a – шихтовый гарнисаж; *б* – $\delta = 0$; $\beta = 90^\circ$; *в* – $\delta = 0,2$; $\beta = 90^\circ$; *г* – $\delta = 0,5$; $\beta = 90^\circ$; *д* – $\delta = 0,5$; $\beta = 45^\circ$; *е* – $\delta = 0,6$; $\beta = 45^\circ$

которые приводят к сдвигу сырой массы в радиальном направлении и позволяют воздействовать на структуру слоя и формировать открытую пористость. Установлено, что при $L/d_{ca} > 20$ глубина пор и их извилистость уменьшаются, расстояние между ними возрастает, структурные отличия в зонах исчезают. При $L/d_{ca} < 5$ указанные поры в зоне I и частично в зоне II визуальны не наблюдаются, поскольку при высоких давлениях ВШС и влажности шихты влага «выжимается» на поверхность, формируется тонкий слой подвижной влагошихтовой пульпы, которая заполняет концентрические поры и разглаживает поверхность напыленного слоя. В этих условиях возможности формирования открытой пористости снижаются.

При наличии зародышей в структуре окатышей плотность окатышей определяется по выражению

$$\rho_{ок} = \rho_{зр}(m_{зр}/m_{ок}) + (1 - m_{зр}/m_{ок})\rho_{об},$$

где $\rho_{зр}$ и $\rho_{об}$ – плотность зародыша и оболочки окатыша, кг/м³.

Если предположить, что плотность оболочки остается относительно постоянной, то воздействовать на структурные характеристики окатышей можно варьированием плотности зародышей и их массовой долей. Результаты экспериментов (рис. 4) показывают, что величина общей и открытой пористости всего окатыша пропорциональна указанным параметрам, а повышенное содержание открытых пор в сердцевине окатыша позволяет прогнозировать увеличение его реакционной способности

и снижение диффузионных затруднений при термической и восстановительной обработке окискованного сырья.

Выводы. Рассмотрены принципы структурообразования в процессе получения окатышей за счет расширения функциональных возможностей технологии их получения. В основе принципов лежат методы внешнего теплосилового воздействия на влажную железорудную шихту в рабочем пространстве окомкователя. Установлено, что формировать характер и величину пористости окатышей можно изменением массового содержания зародышей с регламентированной поровой структурой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ № 2377323. Способ получения окатышей / Павловец В.М. Заявл. 01.07.2008 г. Оpubл. 27.12.2009 г.
2. Пат. РФ № 2385351. Способ получения окатышей / Павловец В.М. Заявл. 01.10.2008 г. Оpubл. 27.03.2010 г.
3. Пат. РФ № 2387720. Способ подготовки шихты к спеканию / Павловец В.М. Заявл. 23.12.2008 г. Оpubл. 27.04.2010 г.
4. Пат. РФ № 2390570. Способ термообработки окатышей / Павловец В.М. Заявл. 01.10.2008 г. Оpubл. 27.05.2010 г.
5. Пат. РФ № 2402619. Способ получения окатышей / В.М. Павловец. Заявл. 02.06.2009 г. Оpubл. 27.10.2010 г.
6. С и з о в А.М. Диспергирование расплавов сверхзвуковыми струями. – М.: Металлургия, 1991. – 184 с.

7. С и з о в А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. – М.: Металлургия, 1987. – 256 с.
8. П а в л о в е ц В.М. Принципы организации принудительного зародышеобразования в холостой зоне тарельчатого окомкователя // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 4. С. 3 – 6.
9. П а в л о в е ц В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
10. П а в л о в е ц В.М. Напыление влажной шихты на железорудные окатыши // Изв. вуз. Черная металлургия. 2003. № 12. С. 7 – 11.
11. П а в л о в е ц В. М. Исследование структурных характеристик шихтового покрытия, напыленного на поверхность железорудных материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 4. С. 7 – 12.
12. П а в л о в е ц В. М. Исследование характеристик шихтового покрытия, напыленного на железорудные материалы низкотемпературными струями сжатого воздуха // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 2. С. 7 – 12.

© 2014 г. В.М. Павловец
Поступила 8 сентября 2014 г.

УДК 669.15.7

А.К. Соловьев, В.О. Михеев, П.С. Пуликов

Сибирский государственный индустриальный университет

ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ОКСИДОВ СЕРЫ

При сжигании серосодержащего топлива образуются оксиды серы: сернистый ангидрид (SO_2) и серный ангидрид (SO_3). Оксиды серы, а также образующиеся при соединении в атмосфере с водяным паром кислоты (H_2SO_3 и H_2SO_4) оказывают вредное воздействие на здоровье людей, являются причиной гибели хвойных лесов, снижения урожайности сельскохозяйственных культур, закисления водоемов. Кроме того, оксиды серы являются причиной коррозии стальных конструкций и разрушения различных строительных материалов. В атмосфере выброшенный из дымовой трубы сернистый ангидрид под действием солнечного света окисляется в серный ангидрид, а затем переходит в серную кислоту. Время существования оксидов серы и продуктов их трансформации в атмосфере составляет (по данным различных исследований) от нескольких часов до нескольких суток, за это время воздушными потоками они могут быть перенесены на огромные (до 1000 км) расстояния. В этом заключается явление дальнего и сверхдальнего переноса оксидов серы. По этой причине в некоторых странах Европы сложилась парадоксальная ситуация, когда, например, Норвегия,

Швеция, Швейцария и некоторые другие страны получают в результате переноса больше оксидов серы, чем выбрасывают сами [1].

Современная ТЭС мощностью 2400 МВт, работающая на угле, в течение одного часа выбрасывает в атмосферу 34 т сернистого ангидрида; ежегодно выбросы сернистого ангидрида 120 котельных г. Новокузнецка в три раза превышают выбросы коксохимпроизводства. Именно поэтому проблема снижения количества оксидов серы стоит очень остро.

Мировой опыт показывает, что ни одна из технологий сероулавливания не может быть успешно внедрена без опытной проверки в условиях реальной ТЭС, длительное отставание с сооружением в нашей стране опытно-промышленных сероулавливающих установок усложняет и без того тяжелое положение с сероулавливанием в энергетике.

На сегодня можно говорить лишь о нескольких опытно-промышленных установках (ОПУ). В стадии освоения находится установка на Дорогобужской ТЭЦ (производительностью 1 млн. $\text{м}^3/\text{ч}$ газа по аммиачно-циклическому методу) и опытно-экспериментальная установка Губкинской ТЭЦ (производительностью 106