

УДК 669.162.12:622

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОСИЛОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ВЛАЖНОЙ ШИХТЫ

*Павловец В.М., к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики  
и экологии (pavlovets.victormix@yandex.ru)*

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Показаны возможности формирования структуры железорудных окатышей с дифференцированным распределением пористости по сечению гранул, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты. С помощью видеосъемки и анализа макроструктуры напыленного слоя шихты, являющегося матрицей для получения зародышевых центров, дано описание механизма формирования напыленного слоя шихты и роста его геометрических размеров. Установлено, что формирование напыленного слоя шихты начинается с образования и роста очагов напыления. Выяснено, что в основе механизма формирования пористости окатышей лежит сдвиговая деформация шихты за счет проявления сил трения между потоком воздуха и поверхностью напыленного слоя. Установлено, что теплосиловое напыление влажной шихты на шихтовый гарнисаж формирует напыленный слой с повышенной долей открытых пор по всему сечению. Величина открытой пористости напыленного слоя зависит от расстояния до напыляемой поверхности и точки на поверхности шихтового гарнисажа окомкователя, в которой организовано напыление. Получено распределение открытых и закрытых пор в объеме окатышей в зависимости от массовой доли зародышевых центров, полученных теплосиловым напылением влажной шихты.

**Ключевые слова:** теплосиловое напыление влажной шихты, дифференцированное распределение пористости, характер изменения пористости, открытые и закрытые поры, зародыши, железорудные окатыши.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-857-863

Технологическая схема производства железорудных окатышей включает окомкование шихты с получением влажных окатышей на низкотемпературной стадии процесса и упрочняющую термическую обработку окомкованного сырья на высокотемпературной стадии производства, после которой получают окисленные окатыши, пригодные для длительной транспортировки к потребителям и последующей плавки или металлизации. Упрочняющая термическая обработка окатышей в режимах сушки, подогрева и обжига осуществляется на обжиговых конвейерных машинах, где и формируются пористость и межчастичная минеральная связь. Формирование формы, размеров и характера (открытая, закрытая) пористости в процессе обжига являются трудноконтролируемыми, поскольку на эти процессы накладываются многочисленные сопутствующие физико-химические процессы. Применяя методы струйного теплосилового напыления влажной шихты на шихтовый гарнисаж или на комкуемые материалы в рабочем пространстве окомкователя [1 – 3], можно снизить затраты на тепловую обработку окатышей, увеличить производительность технологических агрегатов и сформировать дифференцированную структуру, благоприятную для последующего обжига и заключительной восстановительно-тепловой обработки.

Целью настоящей работы является исследование механизма формирования структуры окатышей на низкотемпературной стадии производства, основанной на

струйном теплосиловом напылении влажной шихты на шихтовый гарнисаж и комкуемые материалы в рабочем пространстве окомкователя.

В процессе работы тарельчатого окомкователя по технологии зародышеобразования напылением и доокомкования (ЗНД) 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 влажная шихта напыляется низкотемпературными воздушно-шихтовыми струями (ВШС), формируется плотный напыленный слой (НС). Этот напыленный слой шихты, принудительно разделенный на множество зародышевых фрагментов и очищенный до заданной толщины, вместе с верхней частью гарнисажа являются шихтовой матрицей для получения зародышей с дифференцированной пористостью. Из холостой зоны зародыши поступают в рабочую зону окомкователя, где увлажняются и комкуются влажной шихтой до размеров кондиционных окатышей. Влажные окатыши по технологии ЗНД структурно состоят из расположенных в центре (сердцевине) зародышей влажностью  $W_{зр} = (0,92 \div 0,94)W_{ш}$  и плотностью  $\rho_{зр} = 2400 \div 3200 \text{ кг/м}^3$  и шихтовой оболочки влажностью  $W_{об} = (1,0 \div 1,1)W_{ш}$  и плотностью  $\rho_{об} = 3200 \div 3600 \text{ кг/м}^3$  (где  $W_{ш}$  – влажность загружаемой шихты, %) [1 – 3].

Механизм формирования структуры напыленного слоя шихты исследовали на контрастном гарнисаже,

выполненном из утрамбованного влажного известняка ( $W_n = 9,8\%$ ,  $\rho_n = 2480 \text{ кг/м}^3$ ,  $d_n < 0,1 \text{ мм}$ ); в процессе напыления с помощью видеосъемки (частота съемки 25 и 30 кадров в секунду) фиксировали среднее значение (в трех направлениях) диаметра ( $d$ , мм), высоту ( $h$ , мм) напыленного слоя на его оси и макроструктуру поверхности НС (рис. 1, а). Шихту тейского железорудного концентрата ( $d_q = 0,068 \text{ мм}$ ,  $W_{ш} = 8,25\%$ ) расходом 0,01 кг/с напыляли струйным аппаратом (СА) с относительного расстояния  $L/d_{ca} = 5 \div 50$  (где  $L$  и  $d_{ca}$  – расстояние от среза сопла СА до гарнисажа и диаметр сопла СА, м). Угол атаки СА к гарнисажу ( $\beta$ ) составлял 45 и 90°. Схема отбора проб показана на рис. 1, б. Техника отбора проб подробно описана в работе [3].

Для определения плотности напыленного слоя  $\rho$  использовали цилиндрические образцы правильной формы, вырезанные методом режущего кольца (ГОСТ 5180 – 84) [4]. Для этого в каждой зоне НС вырезали 10 – 15 образцов диам. 15 мм проботоотборником (режущим кольцом), высоту которого (5 – 15 мм) подбирали экспериментально. Размеры зон НС уста-

навливали в зависимости от безразмерного текущего радиуса  $d = r_i/r$  (где  $r_i$  – текущее значение радиуса НС;  $r$  – радиус НС, м;  $i$  – порядковый номер зоны (I, II, III)). Зона I находилась в центре НС (на оси струи) в круге радиусом  $r_1$ . Параметр  $d_1$  этой зоны изменяется от нуля до 0,2. Зона II ( $d_2 = 0,2 \div 0,6$ ) примыкает к зоне I и занимает кольцевое пространство, ограниченное радиусом  $r_1$  (внутренний) и  $r_2$  (наружный). Периферийная зона III ограничена кольцами радиусами  $r_2$  и  $r$  ( $d_3 = 0,6 \div 1,0$ ). Образцы взвешивали на лабораторных аналитических весах ВЛР-200 (второго класса, ГОСТ 19491 – 74, точность до 0,0001 г) и на электронных весах VIBRA серии AF-R220 CE (Япония). Высоту влажных образцов измеряли микрометром МК-25 с точностью до 0,01 мм. Пористость (открытую  $\Pi_{отк}$ , закрытую  $\Pi_3$  и общую  $\Pi_o$ , %) определяли по стандартной методике (ГОСТ 25732 – 88, Методика определения истинной, объемной, насыпной плотности и пористости), дублируя результаты экспериментов. Макроструктуру поверхности НС (увеличение 5 – 10) фотографировали цифровым многофункциональным электронным фотоаппаратом SONY модели MVC-ФД71 (Digital Still Camera 3-050-482.01). Результаты опытов по первой серии экспериментов представлены на рис. 2 – 6 и в таблице.

Во второй серии опытов по вышеописанной методике получали сферокубические зародыши размерами (высота ребра) 5, 10, 12 мм и средней плотностью 2910 кг/м<sup>3</sup> делением НС в его центральной зоне. Для этого напыленный слой формировали на тарельчатом окомкователе диам. 0,62 м, работающем с частотой 6 об./мин и наклоненном к горизонту под углом 45°, напыляя влажную шихту в точку с координатой  $X(R) = 0,5$  (где  $X(R) = R_i/R$ ;  $R_i$  – расстояние до точки напыления, м;  $R$  – радиус тарели, м). После этого зародыши доокомковывали в режиме переката до окатышей размером 16 мм, подавая в слой зародышей влажную шихту до массового соотношения шихта–зародыши, равного 4. Одновременно слой увлажняли тонкораспыленным потоком воды. Полученные окатыши сушили при температуре 300 °С в течение 15 мин, затем обжигали при температуре 1200 °С в течение 10 мин.

Во второй серии опытов исследовали влияние соотношения массы зародыша в окатыше к массе окатыша ( $m_{зр}/m_{ок}$ ) на плотность и пористость окатышей. Результаты опытов представлены на рис. 7.

Установлено (рис. 3, 4), что при напылении шихты на контрастную основу в первый момент времени образуется около 30 – 50 очагов первичного напыления, на которых происходит коалесценция подлетающих частиц и формируется напыленный слой. Очаги растут, перекрывая друг друга, и по истечении 0,4 – 0,6 с образуют сплошной массив напыленной шихты. Наибольшие размеры НС и его масса получены при напылении влажной ( $W_{ш} = 7 \div 10\%$ ) шихты на влажную ( $W_{ш} = 7 \div 10\%$ ) контрастную основу. Все остальные сочетания напыления дают заведомо худшие (меньшие

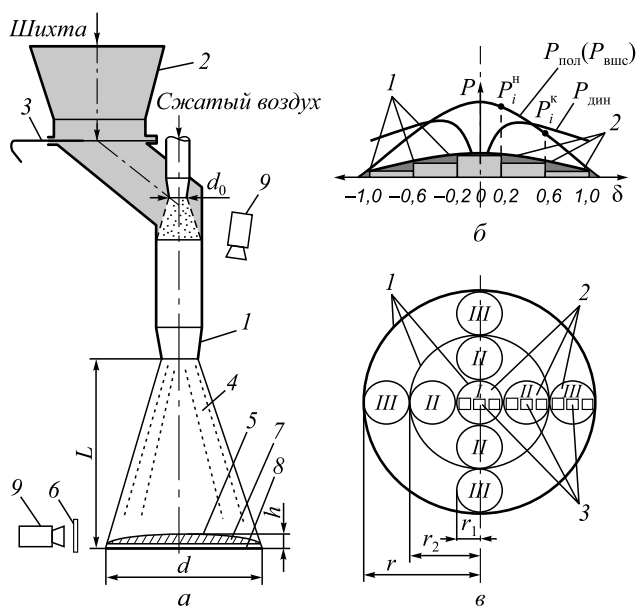


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для видеосъемки процесса напыления влажной шихты на контрастную поверхность (а), поле давлений струи на поверхности напыленного слоя (б) и схема взятия образцов в зонах I – III (в):

а: 1 – струйный аппарат; 2 – бункер шихты; 3 – шибер; 4 – воздушно-шихтовая струя; 5 – напыленный слой шихты; 6 – защитный стеклянный экран; 7 – контрастная основа; 8 – опора; 9 – видеокамера  
 б и в: 1 – граница зон; 2 – расположение образцов в зонах НС; 3 – место фотосъемки

Fig. 1. Scheme of the experimental unit for making video of the process of wet charge spraying to the contrast surface (a), field of the jets pressure on surface of the sprayed layer (b), and the sampling scheme in zones I – III (c):

a: 1 – jet apparatus; 2 – charge bunker; 3 – gate; 4 – air-charge jet; 5 – sprayed layer of charge; 6 – protective glass screen; 7 – contrast base; 8 – support; 9 – camera  
 б and в: 1 – the zones boundaries; 2 – location of the samples in the areas of the sprayed layer; 3 – shooting place

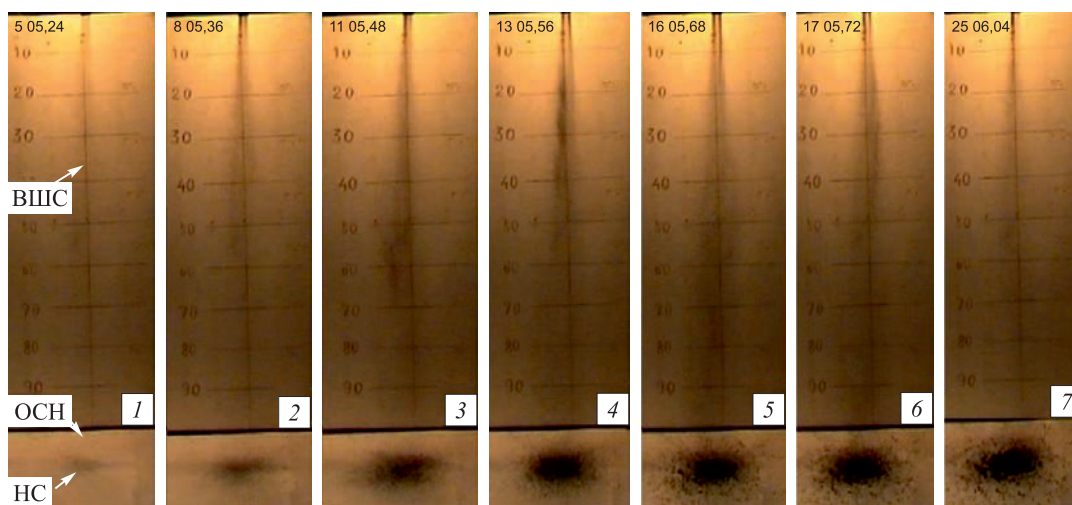


Рис. 2. Кинетика формирования воздушно-шихтовой струи и напыленного слоя на влажной ( $W_{\text{шт}} = 9,8\%$ ) контрастной основе ( $L/d_{\text{ca}} = 50, N = 25 \text{ c}^{-1}$ ) при времени съемки, с:  
 1 – 0,16; 2 – 0,28; 3 – 0,40; 4 – 0,52; 5 – 0,64; 6 – 0,68; 7 – 1,00

Fig. 2. Kinetics of the formation of charge air jet and the sprayed layer ( $W_{\text{шт}} = 9.8\%$ ) on the contrast base ( $L/d_{\text{ca}} = 50, N = 25 \text{ s}^{-1}$ ) with the shooting time, s:  
 1 – 0.16; 2 – 0.28; 3 – 0.40; 4 – 0.52; 5 – 0.64; 6 – 0.68; 7 – 1.00

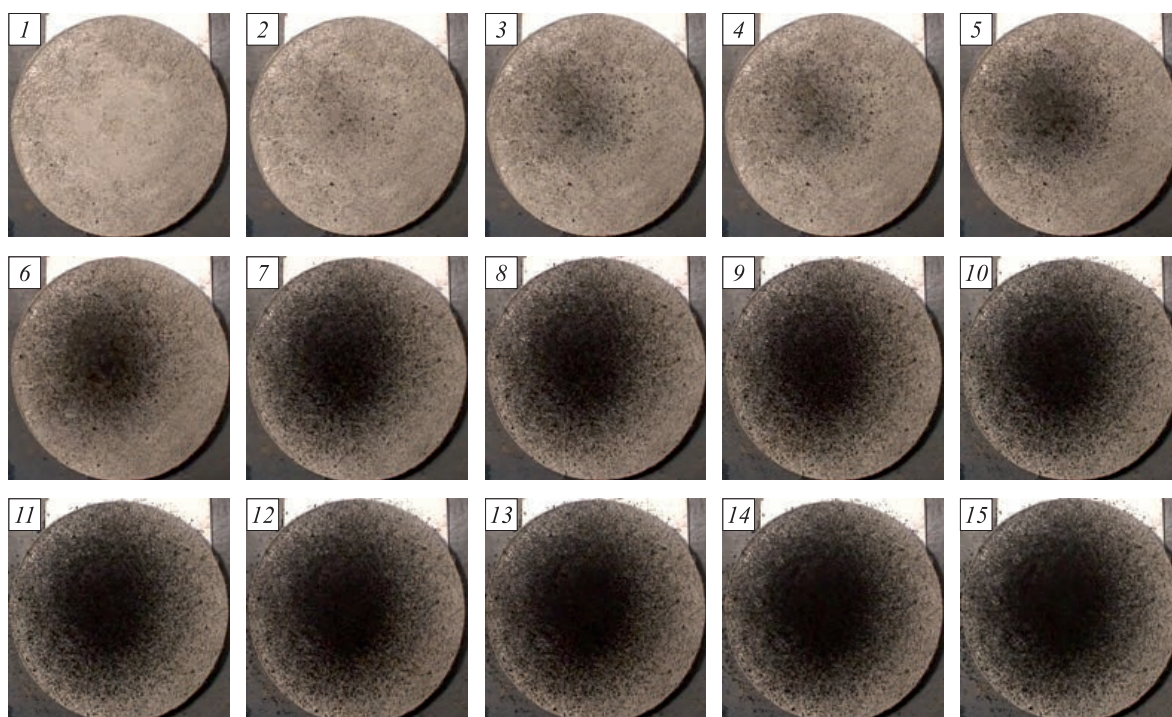


Рис. 3. Кинетика формирования напыленного слоя шихты на влажной ( $W_{\text{шт}} = 9,8\%$ ) контрастной основе ( $N = 30 \text{ c}^{-1}$ ) при времени съемки, с:  
 1 – 0; 2 – 0,067; 3 – 0,133; 4 – 0,200; 5 – 0,233; 6 – 0,267; 7 – 0,400; 8 – 0,600; 9 – 0,700; 10 – 0,900; 11 – 1,033; 12 – 1,233;  
 13 – 1,367; 14 – 1,500; 15 – 1,667

Fig. 3. Kinetics of the formation of charge layer sprayed on the wet ( $W_{\text{шт}} = 9.8\%$ ) contrast basis ( $N = 30 \text{ s}^{-1}$ ) with the shooting time, s:  
 1 – 0; 2 – 0.067; 3 – 0.133; 4 – 0.200; 5 – 0.233; 6 – 0.267; 7 – 0.400; 8 – 0.600; 9 – 0.700; 10 – 0.900; 11 – 1.033; 12 – 1.233;  
 13 – 1.367; 14 – 1.500; 15 – 1.667

на 15 – 20 %) результаты по размерам НС, а при напылении сухой шихты на сухую основу наблюдается пескоструйный эффект.

Подобная зародышевая схема формирования напыленного слоя характерна для металлических частиц

и торкретмасс [5] с размерами зерен 10 – 70 мкм [6]. Оптимальным зерновым составом для формирования равномерного НС при торкретировании является фракция менее 0,074 мм в количестве 80 %. Во влажном напыленном слое сцепление частиц происходит



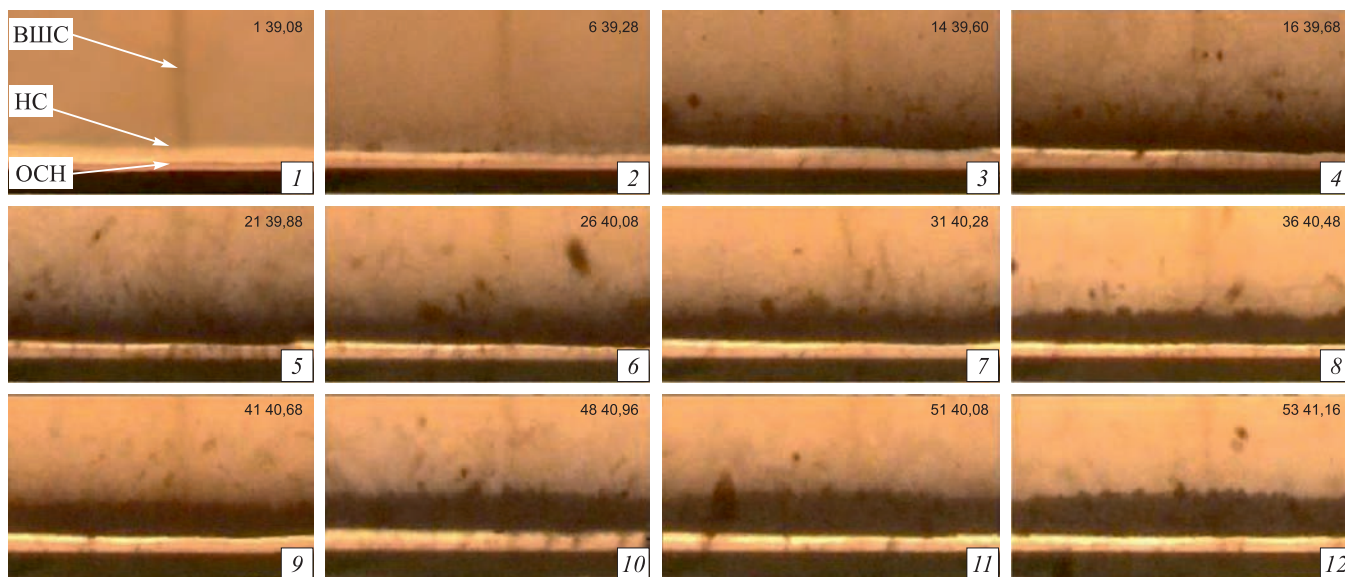


Рис. 4. Кинетика формирования напыленного слоя шихты (поперечное сечение) на влажной контрастной основе при времени съемки, с: 1 – 0; 2 – 0,20; 3 – 0,52; 4 – 0,60; 5 – 0,80; 6 – 1,00; 7 – 1,20; 8 – 1,40; 9 – 1,60; 10 – 1,88; 11 – 2,00; 12 – 2,08

Fig. 4. Kinetics of the formation of the charge layer (transverse section) sprayed on the wet contrast basis with a shooting time, s: 1 – 0; 2 – 0.20; 3 – 0.52; 4 – 0.60; 5 – 0.80; 6 – 1.00; 7 – 1.20; 8 – 1.40; 9 – 1.60; 10 – 1.88; 11 – 2.00; 12 – 2.08

за счет механического зацепления, контактных сил Ван-дер-Ваальса, электрической адгезии, адсорбционных, капиллярных сил [7]. При этом силы сцепления и уплотняемость конгломератов частиц с уменьшением размеров частиц увеличиваются [7]. Авторы работ [5, 8] отмечают, что при скорости частицы 50 м/с и длительности ударного взаимодействия  $10^{-5} - 10^{-7}$  с частица способна формировать на металле лунку глубиной до 0,1 мкм, деформированную зону до 10 мкм и развивать при ударе давление до 700 – 2000 МПа.

В течение первых 0,1 – 0,2 с (рис. 2, 3) с момента распространения струи (несмотря на высокую влажность основы) поверхность деформируется частицами из-за пескоструйного эффекта, шихта отскакивает, формируя плотное облако взвешенных частиц (рис. 4). На фотоснимках видно затемнение, вызванное повышением концентрации частиц, отлетевших от основы. Подобное зафиксировано в работах [8, 9], где отмечается влияние отраженных от основы частиц на структуру газового потока. В ходе формирования очагов напыления происходит сегрегация частиц по крупности: в зоне I содержание частиц фракции 0 – 0,05 мм пре-

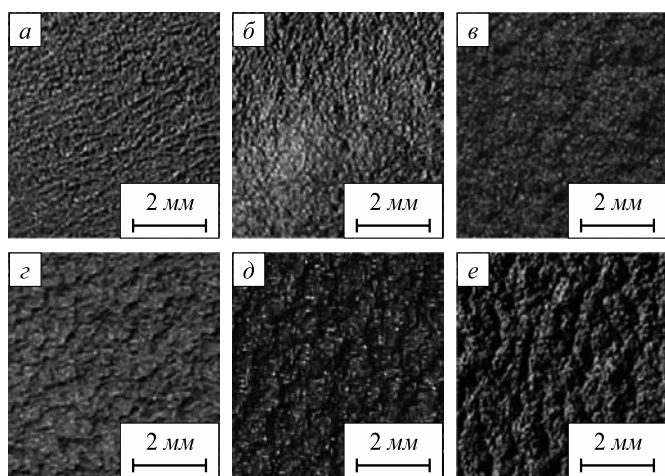


Рис. 5. Макроструктура шихтового гарнисажа (а) и напыленного слоя (б – е):  
 $\bar{\delta} - \delta = 0; \beta = 90^\circ; \bar{\delta} - \delta = 0,2; \beta = 90^\circ; \bar{\delta} - \delta = 0,5; \beta = 90^\circ;$   
 $\bar{\delta} - \delta = 0,5; \beta = 45^\circ; \bar{\delta} - \delta = 0,6; \beta = 45^\circ$

Fig. 5. Macrostructure of the charge skull (a) and the sprayed layer (b – e):  
 $\bar{\delta} - \delta = 0; \beta = 90^\circ; \bar{\delta} - \delta = 0,2; \beta = 90^\circ; \bar{\delta} - \delta = 0,5; \beta = 90^\circ;$   
 $\bar{\delta} - \delta = 0,5; \beta = 45^\circ; \bar{\delta} - \delta = 0,6; \beta = 45^\circ$

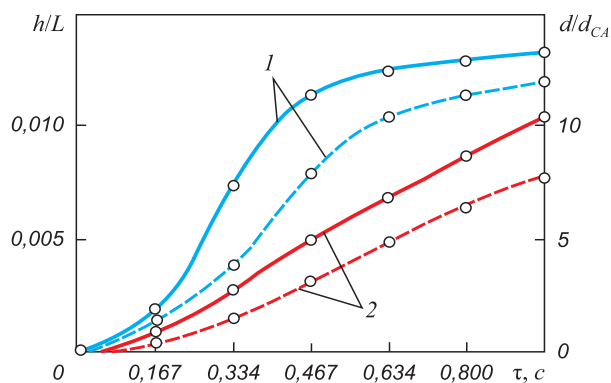


Рис. 6. Изменение геометрических размеров напыленного слоя, сформированного на влажной ( $W_{\text{врт}} = 9,8\%$ ) (—) и сухой ( $W_{\text{врт}} = 0$ ) (---) контрастной основе: 1 – диаметр; 2 – высота напыленного слоя

Fig. 6. Changes in the geometrical dimensions of the sprayed layer formed on the wet ( $W_{\text{wrt}} = 9.8\%$ ) (—) and dry ( $W_{\text{wrt}} = 0$ ) (---) contrast basis: 1 – diameter; 2 – height of the sprayed layer

Пористость образцов, вырезанных из НС, после их обжига

Porosity of samples cut from the sprayed layer after their burning

X(R)	Зона НС (δ)	$\rho_{\text{каж}}, \text{ кг/м}^3$	$\Pi_o, \%$	$\Pi_{\text{отк}}, \%$	$\Pi_z, \%$
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: Через косую приведены значения при  $L/d_{\text{ca}}$  5, 10 и 15;  $\Pi_o = (1 - \rho_{\text{каж}}/\rho_{\text{ист}})100\%$ ;  $\rho_{\text{ист}} = 4936 \text{ кг/м}^3$ ; температура обжига 1200 °С; время обжига 10 мин; X(R) – радиальная координата тарели окомкователя.

вышает концентрацию частиц этой фракции в зоне III НС на 10 – 15 %. В начале напыления крупные зерна (размер частиц более 0,2 мм) отскакивают, а налипают после того, как сформируется слой толщиной 1 – 2 мм из тонких частиц фракции менее 0,074 мм. Аналогичный вывод отмечают авторы работы [10]. После формирования очагов напыления отскок частиц уменьшается, высота напыленного слоя резко, практически линейно растет (рис. 6). Диаметр напыленного слоя шихты формируется с максимальной скоростью в течение первых 0,5 – 0,6 с, после чего его рост замедляется, поскольку прирост массы идет в границах ВШС. Известно, что энергетическая неоднородность и очаги напыления формируются при механической обработке основы [5, 11], поэтому образование очагов напыления можно интенсифицировать искусственной шероховатостью шихтового гарнисажа и его направленной очисткой на окомкователе. Это способствует сокращению периода формирования НС максимального размера.

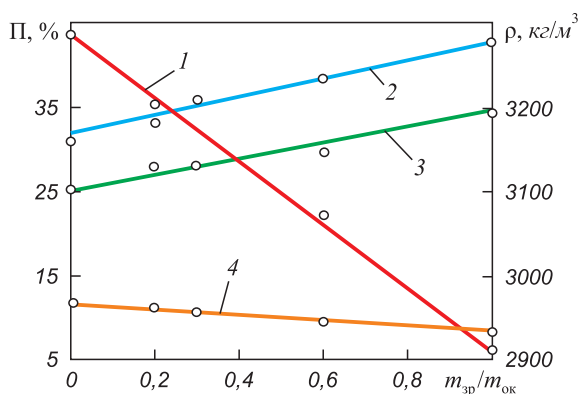


Рис. 7. Зависимость кажущейся плотности (1) и общей, открытой и закрытой пористости (2, 3 и 4) обожженных окатышей от массовой доли зародышей в окатышах

Fig. 7. Dependence of the seaming density (1) and total porosity, open and closed porosity (2, 3 and 4) of the burnt pellets on the mass fraction of the germs in the pellets

В работах [11, 12] отмечается, что пневматическое напыление отождествляется с непрерывным трамбованием, при котором прочность напыленного слоя в 2,5 – 3,0 раза выше, чем прочность слоя, полученного механическим трамбованием. Автор работ [12, 13] объясняет это положение более эффективным энергетическим взаимодействием летящей частицы с напыляемой поверхностью.

Если учесть, что при формировании ВШС в потоке влажной шихты и воздуха образуются шихтовые конгломераты [1 – 3], то при их массе 0,03 – 0,15 г и скорости их у основы до 40 – 50 м/с ( $d_{\text{ок}} = 0,5 \div 2,0 \text{ мм}$ ,  $\rho_{\text{ок}} = 1550 \div 1620 \text{ кг/м}^3$ ) они способны удариться о контрастный гарнисаж с силой до  $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ Н}$ , оказывая давление на поверхность преграды более  $10^4 - 10^6 \text{ Па}$ . В момент удара о поверхность основы давление на гарнисаж, ориентировочно, в 10 – 15 раз выше, чем в конце напыления, так как площадь контактной поверхности в порошковых системах составляет всего 0,01 % от общей площади контактирующих частиц [5].

Одновременно с напылением шихты происходит инерционная пропитка влагой пограничной зоны между НС и основой. При ударе более инерционная и подвижная влага сравнительно легко проникает через поры на поверхность НС и в шихтовый гарнисаж, и, по-видимому, формирует открытую пористость. Подобное происходит при течении многофазной гетерогенной среды по проницаемой поверхности: газовая фаза просачивается, а твердая осаждается на ней [14, 15]. Поскольку плотность НС в момент удара ниже плотности основы, то часть влаги выжимается на поверхность НС и формирует гидросмесь (рис. 5), создавая благоприятные условия для напыления.

Результаты экспериментов (см. таблицу) показывают, что общая и открытая пористость НС возрастают пропорционально увеличению  $L/d_{\text{ca}}$ , падению среднего давления ВШС ( $P_{\text{вшс}}$ ) и росту координаты  $d$  в направлении от оси НС к его периферии. Причем, как показыва-

ют эксперименты (рис. 7), структурные характеристики (общая, открытая и закрытая пористости) окатышей существенно зависят от массовой доли зародышей в объеме окатышей.

В каждой из зон НС (*I–III*) (рис. 5) существуют заметные выраженные структурные особенности. В центральной зоне *I* ( $d = 0 \div 0,2$ ) макроструктура НС преимущественно характеризуется наличием на его поверхности тонкого слоя подвижной влагошихтовой пульпы (гидросмеси) влажностью более 12 %. Под действием напора воздуха гидросмесь легко растекается, заполняя неровности рельефа на поверхности и, по-видимому, в глубине НС. Небольшие шихтовые наплывы появляются на границе зоны ( $d = 0,15 \div 0,20$ ) после подсушки шихты и повышения ее вязкости. Плотность НС в зоне *I* может возрасти до 3240 кг/м<sup>3</sup>, а пористость уменьшится до 26,5 – 27,2 %. Во всех зонах НС преимущественно формируется открытая пористость (см. таблицу).

Особенностью макроструктуры НС в зоне *II* ( $d = 0,2 \div 0,6$ ) является наличие неглубоких (ориентировочно 0,1 – 0,3 мм) и протяженных (до 1,5 – 3,5 мм) поровых каналов, расположенных перпендикулярно линиям тока воздушного потока. При  $\beta = 90^\circ$  поровые каналы более многочисленны, их извилистость повышается (рис. 5). При острых углах атаки струи ( $\beta = 45^\circ$ ) число поровых каналов уменьшается, но их протяженность возрастает. Формирование этих пор обусловлено сдвиговой деформацией влажной шихты на поверхности НС, которая, в свою очередь, связана с величиной и характером динамического давления ( $P_{\text{дин}}$ ) воздуха, движущегося на поверхности НС. Динамическое давление (рис. 1, б) воздуха меняется от нуля на оси НС до максимального значения в зоне *II* ( $d = 0,3 \div 0,4$ ), после чего падает до минимального значения в зоне *III*. При течении воздуха на поверхности НС возникают силы трения, которые приводят к сдвигу сырой массы в радиальном направлении НС, воздействуют на структуру НС. Таким образом, формируется открытая пористость. Течение влажной шихты в радиальном направлении НС способно увеличить его геометрические размеры. В основе деформации НС лежат высокая пластичность влажной шихты и сила трения на границе НС и струи, которые формируют «гофрированную» поверхность, на которой «гофры» представлены уплотненными шихтовыми наплывами, а впадины – поперечными проницаемыми капиллярными каналами. При  $L/d_{\text{ca}} \geq 20$  глубина пор и их извилистость уменьшаются, расстояние между ними возрастает, структурные отличия в зонах НС исчезают. При  $L/d_{\text{ca}} < 5$  такие поры в зоне *I* и частично в зоне *II* визуально не наблюдаются, поскольку при высоких давлениях ВШС и влажности шихты влага выжимается на поверхность НС, формируя тонкий слой подвижной влагошихтовой пульпы, которая заполняет извилистые каналы и разглаживает поверхность НС. В этих условиях возможности формирования открытой пористости снижаются.

Макроструктура поверхности напыленного слоя в зоне *III* ( $d = 0,6 \div 1,0$ ) (рис. 5) также характеризуется извилистыми каналами, глубина которых растет с уменьшением угла атаки ВШС. Это обусловлено тем, что плотность НС и сила сцепления с напыляемой основой в этой зоне меньше, чем в зонах *I* и *II*, поэтому деформируемость НС более высокая. Высота НС в этой зоне минимальная и колеблется от 4 – 5 мм ( $d = 0,6$ ) до 1,0 – 1,5 мм ( $d = 1,0$ ). Воздух, поступающий из зон *II* и *III*, движется параллельно поверхности НС, поэтому шихтовая пульпа в этой зоне образоваться не может, а сдвиговые усилия, ответственные за деформацию НС, снижаются. В общем случае пористость НС с ростом  $d$  от 0,6 до 1,0 растет, а плотность падает. При некоторых режимах напыления на поверхности НС появляются шихтовые жгутики, продолговатые конгломераты, образовавшиеся при перекате материалов и заполнившие неровности (впадины и макродефекты). За границами НС ( $d > 1,0$ ) можно обнаружить большое количество крупных конгломератов частиц, образовавшихся при перекате шихты по НС.

Грубая шихта формирует более пористый и менее плотный НС и повышает вероятность появления пескоструйного эффекта. Следует заметить, что шихта с размером частиц более 0,1 мм трудно комкуется в режиме переката с образованием окатышей. Однако НС из грубых частиц размером более 0,1 мм формируется достаточно стабильно.

**Выводы.** Предложены новые принципы формирования структуры в процессе получения влажных окатышей за счет использования технологии принудительного зародышеобразования на низкотемпературной стадии производства. В основу принудительного зародышеобразования положен метод внешнего теплосилового напыления влажной железорудной шихты на шихтовый гарнисаж в рабочем пространстве окомкователя, которое позволяет менять величину и характер пористости окатышей. Формирование окатышей с повышенной долей открытой пористости дает возможность прогнозировать повышение их реакционной способности при последующей восстановительно-тепловой обработке.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. Принципы организации принудительного зародышеобразования в холостой зоне тарельчатого окомкователя // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 4. С. 3 – 6.
2. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
3. Павловец В.М. Исследование структурных характеристик шихтового покрытия, напыленного на поверхность железорудных материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 4. С. 7 – 12.
4. Лабораторные работы по грунтоведению / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский и др. – М.: Высшая школа, 2008. – 519 с.
5. Анциферов В.Н., Бобров В.Г., Дружинин Л.К. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.



6. Великин Б.А. Торкретирование металлургических печей. – М.: Металлургия, 1972. – 280 с.
7. Дик И.Г., Югов В.И. О моделировании структуры насыпного слоя // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 2. С. 36 – 43.
8. Гавин Л.В., Наумов В.А. Турбулентная двухфазная среда и ее численное исследование // Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 44. № 6. С. 927 – 932.
9. Циркунов Ю.М. Влияние вязкого пограничного слоя на осаждение частиц при обтекании сферы газозвесью // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1982. № 1. С. 59 – 66.
10. Лозовский В.А. Торкретирование металлургических печей. – М.: Металлургия, 1968. – 176 с.
11. Бобров В.Г., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. – М.: Интермет инжиниринг, 2004. – 624 с.
12. Сизов А.М. Диспергирование расплавов сверхзвуковыми струями. – М.: Металлургия, 1991. – 175 с.
13. Сизов А.Н. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. – М.: Металлургия, 1987. – 256 с.
14. Ибяттов Р.И., Холпанов Л.П., Ахмадиев Ф.Г. Течение многофазной среды по проницаемой поверхности с образованием осадка // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 2. С. 65 – 72.
15. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.

Поступила 15 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 857–863.

## FORMATION OF THE STRUCTURE OF IRON ORE PELLETS PRODUCED USING HEAT-SPRAYING OF WET CHARGE

*V.M. Pavlovets*

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**Abstract.** The article describes the possibilities of formation of iron ore pellets structure with regulated distribution of the porosity along the pellets cross section, obtained using heat-spraying of wet charge. With the help of the video and analysis of the macrostructure of sprayed charge layer, which is a matrix for germinal centers, the author gives the description of formation mechanism of the sprayed charge layer and the growth of its geometrical dimensions. The formation of the sprayed charge layer starts with the formation and growth of spraying focus. The formation mechanism of pellets porosity relies on shifting deformation of charge due to existence of friction forces between the air stream and the surface of the sprayed layer. It was found that the heat-spraying of wet charge on the charge skull forms a sprayed layer with an increased proportion of open pores along the cross-section. The value of the open porosity of the sprayed layer depends on the distance to the sprayed surface and the point on surface of the charge skull pelletizer, in which the spraying is organized. The distribution of open and closed pores in the volume of pellets, depending on the mass fraction of the germinal centers, was obtained by the heat-spraying of wet charge.

**Keywords:** heat-spraying of wet charge, regulated distribution of porosity, variation of porosity, open and closed pores, germs, iron ore pellets.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-12-857-863

### REFERENCES

1. Pavlovets V.M. Principles of the organization of forced nucleation in the cold zone of plate pelletizer. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 4, pp. 3–6. (In Russ.).
2. Pavlovets V.M. Moisture-laden pellets production with forced nucleation process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 15–20. (In Russ.).
3. Pavlovets V.M. Study of the structural characteristics of the charge coating sprayed on the surface of iron materials. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 4, pp. 7–12. (In Russ.).
4. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskii E.A., Samarin E.N., Nikolaeva S.K., Shirokov V.N., Ladygin V.M., Sokolov V.N., Komarov I.A., Panas'yan L.L., Bershov A.V., Andreeva T.V. *Laboratory works on the soil science*. Moscow: Vysshaya shkola, 2008, 519 p. (In Russ.).
5. Antsiferov V.N., Bobrov V.G., Druzhinin L.K. *Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 792 p. (In Russ.).
6. Velikin B.A. *Torkretirovanie metallurgicheskikh pechei* [Spraying of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 280 p. (In Russ.).
7. Dik I.G., Yugov V.I. On modeling of the coated layer structure. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2005, vol. 78, no. 2, pp. 36–43. (In Russ.).
8. Gavin L.V., Naumov V.A. Turbulent two-phase medium and its numerical study. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1983, vol. 44, no. 6, pp. 927–932. (In Russ.).
9. Tsirkunov Yu.M. Influence of the viscous boundary layer on the deposition of particles from a gas suspension flowing past a sphere. *Fluid Dynamics*. 1982, vol. 17, no. 1, pp. 48–55.
10. Lozovskii V.A. *Torkretirovanie metallurgicheskikh pechei* [Spraying of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 176 p. (In Russ.).
11. Bobrov V.G., Il'in A.A. *Nanesenie neorganicheskikh pokrytii* [Application of inorganic coatings]. Moscow: Intermet inzhiniring, 2004, 624 p. (In Russ.).
12. Sizov A.M. *Dispergirovanie rasplavov sverkhzvukovymi struyami* [Dispersing of melts by supersonic jets]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 175 p. (In Russ.).
13. Sizov A.N. *Gazodinamika i teploobmen gazovykh strui v metallurgicheskikh protsessakh* [Gas dynamics and heat transfer of gas jets in metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 256 p. (In Russ.).
14. Ibyatov R.I., Kholpanov L.P., Akhmadiev F.G. Flow of a multiphase medium over a permeable surface with formation of sediment. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005, vol. 78, no. 2, pp. 272–280.
15. Smoldyrev A.E. *Gidro- i pnevмотransport v metallurgii* [Hydro- and pneumatic transport in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 280 p. (In Russ.).

### Information about the author:

*V.M. Pavlovets, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (pavlovets.victormix@yandex.ru)*

Received March 15, 2016