

В.М. Павловец

Сибирский государственный индустриальный университет

ОБСУЖДЕНИЕ МЕХАНИЗМА ПОРООБРАЗОВАНИЯ ЗАРОДЫШЕЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЕМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ

Образование пористости, как правило, происходит в процессе формообразования дисперсного материала при переходе его из сыпучего состояния в сформованное или кусковое. В некоторых технологиях порообразование является сопутствующим процессом и его стараются ограничить или исключить, но в большинстве случаев образование пористости осуществляют искусственно и целенаправленно, получая сформованное тело с новыми полезными свойствами. В промышленности достаточно много сыпучих материалов, подвергаемых разным способам формообразования, причем цели и задачи структурообразования широкого класса пористых тел достаточно многообразны.

Для готовой продукции, каковой являются, например, строительные, огнеупорные и теплоизоляционные материалы, эти требования достаточно противоречивы [1]. Для этих материалов наличие пористости обязательно, поскольку поры снижают коэффициент теплопроводности изделия и определяют теплоизоляционные свойства продукции, но одновременно уменьшают прочность изделий. Чтобы исключить фильтрацию газов и жидкой фазы в этих материалах, поры должны быть преимущественно закрытыми и непроницаемыми. Для металлургического сырья (окатышей, агломератов, брикетов, кокса, железобитуменов и др.), являющегося промпродуктом, предъявляются высокие требования к такой важной его характеристике, как пористость [2]. Наиболее важными для производителей являются прочностные характеристики сырья, которые с ростом пористости однозначно снижаются. Одновременно с ростом пористости увеличивается так называемая реакционная поверхность кускового сырья, на которой протекают термодинамические металлургические реакции (окисление, восстановление, декарбонизация, десорбция, спекание и др.). От характера пористости зависят режим горения топливных добавок, условия минералообразования, поведение жидкой фазы, формирование упрочняющей связки и многие другие сопутствующие диффузионные процессы [3].

Способов образования пористости широкого класса сформованных тел, включая железорудные окатыши, достаточно много. Самый распространенный метод создания поровой структуры сформованных кусковых тел – использование порообразующих, вспенивающих топливных добавок и жидких, преимущественно, выгорающих связующих [1, 4]. Механизм образования пор заключается в образовании пустот за счет сгорания топливной (органической) массы и расширения внутренних полостей сформованного тела давлением вспенивающего газа, образующегося при термической обработке сырья. Регулировать процесс образования пористости кусков можно введением дополнительных шихтовых (техногенных, флюсующих, упрочняющих, минералообразующих, топливных, вяжущих) добавок, изменяя параметры прессования в процессе брикетирования [4] или режим работы окомкователя в процессе окомкования сырой массы [2, 3].

В процессе сушки и обжига также можно управлять структурообразованием, используя теплотехнические методы воздействия и подбирая влажность сырья, его минеральный и гранулометрический составы [5]. В технике плазменного и газоструйного напыления поровая структура напыленных покрытий во многом опирается на закономерности возникновения и поведения жидкого расплава [6, 7]. В последнее время предложено использовать теплосиловое воздействие газовой струи для организованного структурообразования влажных окатышей на стадии окомкования [8, 9]. Получение сырых окатышей на тарельчатом окомкователе по технологии принудительного зародышеобразования включает формирование зародышей методом напыления в холостой зоне тарели и создание оболочки окатышей их доокомкованием в рабочей зоне окомкователя в режиме переката [8, 9]. Эта технология экспериментально отработана в лабораторных условиях и позволяет получать окатыши с дифференцированным распределением пористости по их сечению, воздействовать на характер пор и организовать процесс их формообразования с более высокой удельной произво-

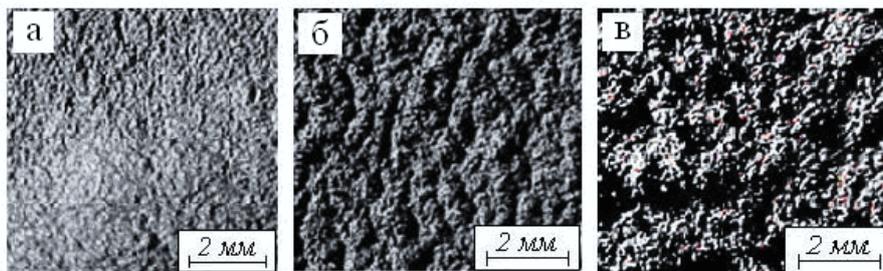


Рис. 1. Типичные макроструктуры образцов в различных зонах НС (вид сверху):
 а – центральная зона I НС ($\delta = 0$; $\beta = 90^\circ$, $L/d_{c.a} = 2,5$); б – промежуточная зона II ($\delta = 0,5$; $\beta = 90^\circ$, $L/d_{c.a} = 5,0$);
 в – периферийная зона III ($\delta = 0,8$; $\beta = 90^\circ$, $L/d_{c.a} = 10,0$); δ – относительный радиус НС

дительностью. Установлено, что в процессе принудительного зародышеобразования методом напыления шихты в центральной зародышевой зоне окатыша формируется преимущественно открытая пористость с относительно большим размером пор [10, 11]. Эта технология позволяет у обожженных окатышей повысить долю открытых пор диам. 0,02 – 0,1 мм от 25 до 35 % при общем объеме пор до 30 – 45 %.

Количество открытых пор зависит от массовой доли зародыша в окатыше, давления воздушношихтовой струи (ВШС), влажности и гранулометрического состава шихты, конструктивной схемы принудительного зародышеобразования и некоторых других факторов [8]. Повышенное содержание открытых пор в зародышевом центре облегчает массоперенос испаряющейся влаги из центральной части окатышей на периферию в процессе сушки, ускоряет диффузию газа-окислителя с поверхности гранулы в ее центральную часть в процессе обжига.

На заключительной восстановительно-тепловой стадии обработки в ходе металлургической плавки снижаются диффузионные ограничения по фильтрации газа-восстановителя через поверхностную оболочку окатыша в центр гранулы. При этом более прочная оболочка окатыша не позволяет снизить его прочность ниже допустимого уровня. Опыт лабораторных исследований позволяет дополнить список требований к пористости окатышей. В идеальном состоянии поры окускованного материала должны быть проницаемыми для водяного пара и технологических газов, равномерно распределены по сечению гранулы, обладать минимальной извилистостью, рациональной формой и размерами, снижать в минимальной степени прочность сформованного куска [9]. Это достаточно трудная технологическая задача, которая может быть решена на основе глубокого изучения механизма образования пористости окатышей в процессе принудительного зародышеобразования.

Целью настоящей работы являлось исследование механизма образования пористости зародышей в технологии производства окатышей,

основанной на технике принудительного зародышеобразования.

Методика экспериментов подробно описана в источниках [8, 9]. В экспериментах использовали шихту на основе тейского железорудного концентрата ($d_q = 0,068$ мм, влажность шихты $W_{ш}$ равнялась 5,5; 7,5 и 9,5 %), которую напыляли при расходе 0,01 кг/с на шихтовый гарнисаж (ШГ) влажностью 7,5 %. Параметр $W_{ш}$ меняли искусственным дозированием воды в состав сухой шихты, после чего готовили смесь по методике, описанной в работе [8]. После перемешивания влажную шихту протирали через сито с ячейкой 1,0 мм. Расстояние L между соплом струйного аппарата (СА) и ШГ составляло 50, 100, 200, 300 мм. Далее рассчитывали относительное расстояние $L/d_{c.a}$, которое составило 2,5; 5,0; 10,0; 15,0 (где $d_{c.a}$ – диаметр сопла СА, м).

Для уточнения механизма образования пористости напыленного слоя в некоторых опытах устанавливали значения $L/d_{c.a} = 1,5$ и $L/d_{c.a} = 20,0$. Угол атаки СА к гарнисажу (β) составлял 90 град. Напыленный слой (НС), полученный напылением шихты воздушношихтовой струей при угле атаки 90 град имел правильную круговую форму диаметром d и высотой h на его оси. Используя номограмму, разработанную в работе [8], и условия экспериментов, определяли давление ВШС, которое использовали в качестве входного параметра технологии напыления. Схема отбора проб и направление фото- и видеосъемки приведены в источнике [9].

В ходе экспериментов был проанализирован большой массив макроструктур напыленного слоя шихты, полученных для различных режимных параметров напыления и физических характеристик шихты. Типичные макроструктуры образцов в разных зонах напыленного слоя, полученного напылением шихты влажностью $W_{ш} = 9,5$ %, показаны на рис. 1.

Характерной особенностью макроструктур напыленного слоя шихты является наличие структурных изменений, образовавшихся после

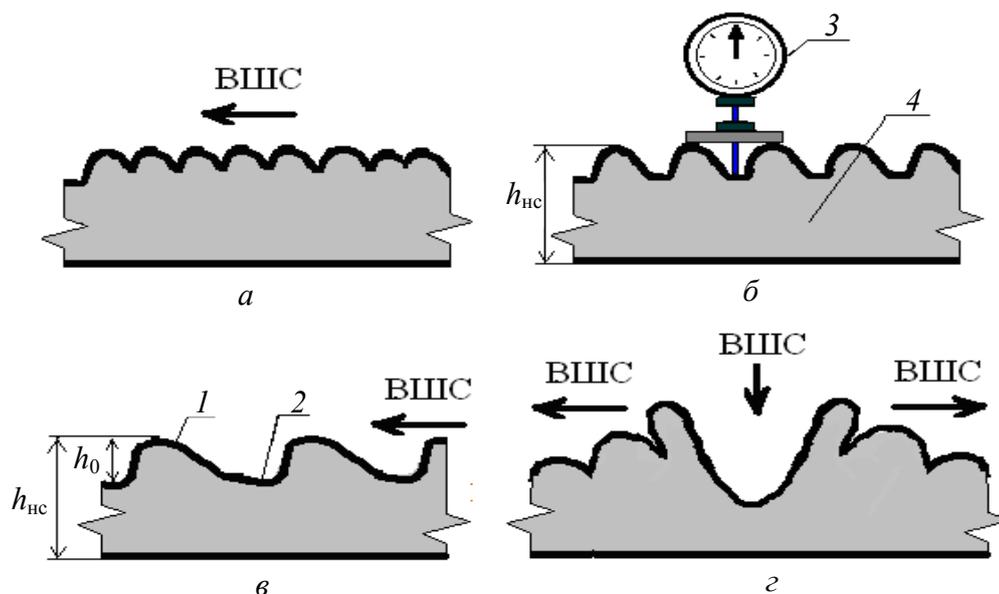


Рис. 2. Вид и схема определения размера структурных углублений на поперечном сечении напыленного слоя шихты: 1 – шихтовые напылы; 2 – структурные углубления; 3 – измерительный индикатор часового типа для определения глубины структурных углублений; 4 – напыленный слой; схемы структурных изменений: а – зона I при $P_{\text{внс}} = 1000 - 1400$ Па ($W_{\text{ш}} = 7,5$ и $9,5$ %); б – зона II при $P_{\text{внс}} = 600 - 1000$ Па; в – зона III при $P_{\text{внс}} < 600 - 800$ Па; г – зона I при $P_{\text{внс}} > 1400 - 1600$ Па ($W_{\text{ш}} > 9,5$ %)

напыления и деформации влажной шихты на поверхности и в глубине НС. Видимыми структурными изменениями являются шихтовые напылы и структурные углубления между напылами на поверхности НС. Структурные изменения являются основой для образования пористости зародышей, а особенности их зарождения на поверхности НС позволяют уточнить механизм образования открытой пористости зародышей. Схематичное изображение структурных изменений НС и методика определения размера структурных углублений в поперечном разрезе НС показаны на рис. 2.

Структурные углубления НС шихты представляют собой концентрические слабоизвилистые каналы, сформированные соседними шихтовыми напылами и располагающиеся по круговой траектории вокруг вертикальной оси НС. Эти каналы, как правило, замкнутые друг на друга, обладающие переменной извилистостью. Часть из них имеет прерывистый характер.

Наличие структурных углублений канального типа, безусловно, является причиной формирования открытой пористости. Сечение каналов имеет форму, близкую к перевернутому усеченному конусу. На фотографиях макроструктуры (рис. 1) дно каналов отображается темными линиями толщиной $0,1 - 1,5$ мм, которые по существу являются малым основанием усеченного конуса. Форма и геометрические размеры структурных углублений, по-видимому, влияют на форму и размер пор в глубине НС.

Ширина шихтовых напылов более существенная: от 1 до 3 мм. Со стороны атаки ВШС поверхность округлых напылов покатая, у противоположной (теневого) стороны сформирован крутой наклон. Эту особенность напыленных покрытий отмечают авторы работы [12], в которой напылы отождествляют со столбами, а их появление объясняют «теневым эффектом» напыленного слоя для потока частиц, ускоренных высокотемпературной плазмой. В результате формируется столбчатая структура напыленного покрытия, состоящая из столбов (напылов) и углублений. На поверхности шихтовых напылов НС также можно найти мелкие короткие впадины длиной $1 - 3$ мм и глубиной менее 1 мм, которые в расчетах не учитывали, но они играли определенную роль в формировании пористости.

В качестве параметров макроструктуры НС использовали относительную величину структурных углублений напыленного слоя θ_{h_0} и относительное количество структурных углублений θ_N , число углублений на м^2 ($1/\text{м}^2$), на его поверхности. Параметр θ_{h_0} на поверхности НС определяли по выражению

$$\theta_{h_0} = h_0/h,$$

где h_0 – среднее значение структурных углублений, мм; h – среднее значение высоты напыленного слоя на его оси, мм.

Среднее значение структурных углублений определяли по шести величинам расстояний, за-

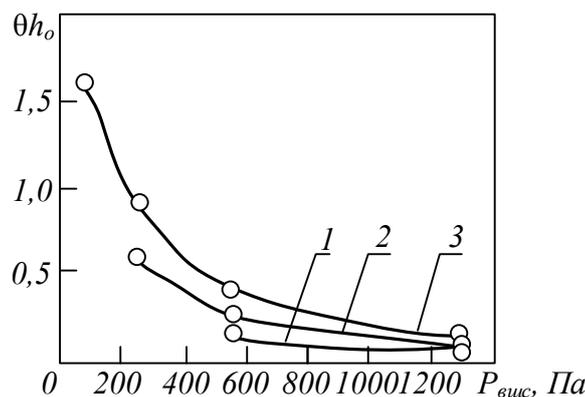


Рис. 3. Зависимость относительной величины структурных углублений от давления ВПС; уравнения регрессии для различной влажности шихты: 1 – $W_{ш} = 5,5\%$ ($y = 1,878e^{-0,0024x}$, $R^2 = 0,9884$; $y = \theta_{ho}$, $x = P_{впс}$); 2 – $W_{ш} = 7,5\%$ ($y = 0,9376e^{-0,0018x}$, $R^2 = 0,9925$); 3 – $W_{ш} = 9,5\%$ ($y = 0,3644e^{-0,001x}$, $R^2 = 1$)

меряемых в трех зонах НС во взаимно перпендикулярных направлениях, между гребнем шихтового напыля и дном структурного углубления (рис. 2). Усреднение проводили по трем опытам при фиксированных значениях $L/d_{са}$ и $W_{ш}$.

Относительное количество структурных углублений θ_N вычисляли по выражению

$$\theta_N = N/f_{нс},$$

где N – численное значение структурных углублений, определяемое по количеству концентрических теневых каналов в каждой зоне НС; $f_{нс}$ – площадь напыленного слоя шихты диам. d , m^2 .

Параметры θ_{ho} и θ_N оценивали в зависимости от давления ВПС, относительного расстояния $L/d_{са}$ и влажности напыляемой шихты. Результаты экспериментов представлены на рис. 3 и 4.

Установили, что в общем случае параметр θ_{ho} резко снижается с ростом давления ВПС до 600 – 800 Па, после чего происходит замедленное снижение его величины (рис. 3). Одновременно с ростом давления ВПС высота структурных углублений снижается, но одновременно с этим растет средний размер НС. Характер зависимости показывает, что интенсивность снижения

параметр h_o существенно выше интенсивности роста параметра h . Это объясняется геометрическими особенностями формирования напыленного слоя шихты, подробно рассмотренными в источнике [8]. Поскольку размер структурных углублений является физической основой для формирования размеров пор, то можно предположить, что с ростом давления ВПС размер пор и величина пористости в глубине НС будут уменьшаться. Большую роль на параметр θ_{ho} оказывает влажность напыляемой шихты. При $W_{ш} = 5,5\%$ и давлении ВПС менее 600 – 800 Па на поверхности формируются невысокие напылы и мелкие структурные углубления ($h_o < 0,1 - 0,2$ мм), недоступные для инструментального измерения. Их можно замерить и анализировать при достаточно большом увеличении, поэтому величину структурных углублений точно измерить практически невозможно и ее условно приняли равной 0,1 мм. Можно считать, что твердожидкостная пульпа в шихте с низкой влажностью в этом режиме напыления не образуется и не играет особой роли в сруктурообразовании [9]. Поэтому структурные углубления здесь самые минимальные и их образование почти не зависит от давления ВПС. Подобное утверждение

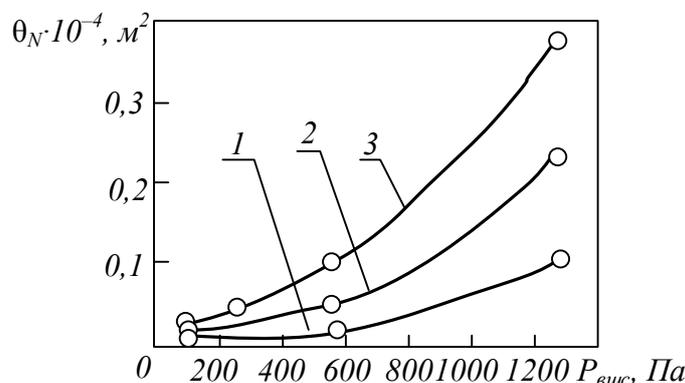


Рис. 4. Зависимость относительного количества структурных углублений напыленного слоя шихты от давления ВПС; уравнения регрессии для различной влажности шихты: 1 – $W_{ш} = 5,5\%$ ($y = 0,0237e^{0,0023x}$, $R^2 = 0,9921$, $y = \theta_N \cdot 10^{-4}$, $x = P_{впс}$); 2 – $W_{ш} = 7,5\%$ ($y = 0,0163e^{0,0022x}$, $R^2 = 0,9996$); 3 – $W_{ш} = 9,5\%$ ($y = 0,0079e^{0,002x}$, $R^2 = 0,9801$)

можно отнести к пористости НС, формируемой в глубине слоя. При влажности шихты 7,5 и 9,5 % образуется подвижная шихтовая пульпа [8], которая облегчает деформацию шихты на ее поверхности и приводит к появлению крупных шихтовых наплывов и структурных углублений, доступных для визуального наблюдения и инструментального измерения.

Параметр θ_N характеризует количество концентрических структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты в зависимости от давления $P_{\text{внс}}$ (рис. 4). До значения $P_{\text{внс}} = 500 - 600$ Па рост параметра θ_N происходит более медленно, чем при $P_{\text{внс}} > 600$ Па (при $W_{\text{ш}} = 7,5\%$ и $W_{\text{ш}} = 9,5\%$). Это объясняется тем, что с ростом параметра $P_{\text{внс}}$ интенсивность роста количества структурных углублений существенно превышает рост площади напыленного слоя $f_{\text{нс}}$ и его диаметра d . Причем с ростом влажности шихты с 5,5 до 9,5 % параметр θ_N возрастает почти в 4 раза при $P_{\text{внс}} = 1280$ Па. При формировании напыленного слоя шихты, полученного при $W_{\text{ш}} = 5,5\%$ и $P_{\text{внс}} < 800 - 1000$ Па, значение параметра θ_N близко к нулю.

Характер и размеры шихтовых наплывов и структурных углублений и механизм структурообразования существенно зависят от давления ВШС, оказываемого на поверхность НС. Полное давление ВШС включает динамическое (скоростное) давление движущегося потока и статическое (неподвижное) заторможенного газа на поверхности преграды [13]. Причем эпюры распределения динамического и статического давлений существенно отличаются друг от друга по диаметру НС. Динамическое давление на оси НС при $\beta = 90^\circ$ равно нулю, после чего возрастает до максимального значения примерно на половине радиуса НС (зона II), затем плавно убывает до минимума в зоне III. Динамическое давление замеряется у воздушного потока, движущегося вдоль (параллельно) поверхности НС [8, 13].

Движущийся поток газов и частиц испытывает при движении сопротивление со стороны НС за счет сил трения. По этой причине поверхностная зона НС подвергается сдвиговым нагрузкам [8, 9]. Перед напылением ровная и относительно гладкая поверхность ШГ во время напыления видоизменяется и становится шероховатой, формируются шихтовые наплывы и структурные впадины, форма НС становится конусообразной [8]. Можно утверждать с высокой долей вероятности, что давление ВШС снижается из-за повышенного сопротивления микрорельефа поверхности НС. Характер формирования макроструктуры НС в динамическом состоянии можно визуально зафиксировать при видеосмотре и при достаточном увеличении.

После снятия баронагрузки со стороны ВШС макроструктура поверхности НС в статическом состоянии может измениться, поскольку подвижная шихтовая пульпа разглаживается и выравнивается, частично заполняя структурные углубления. Этими причинами во многом можно объяснить различные особенности формирования шихтовых наплывов и структурных углублений в каждой зоне НС в зависимости от давления ВШС. Частицы и шихтовые коагулянты, внедряющиеся с высокой скоростью в поверхность жидкотекучего НС, способны сформировать волновое движение шихтовой пульпы. Если в НС внедряется массивный коагулянт, то волновое движение будет определяющим. Одновременно с этим поток газа-носителя на поверхности НС поворачивает на угол 90° и при движении вдоль поверхности НС усиливает волновое движение, формирует на ней волнообразные шихтовые наплывы и характерные структурные углубления, хорошо заметные при видеосмотре.

После снятия баронагрузки шихтовая пульпа частично растекается, макроструктура поверхности НС меняется и размер структурных углублений уменьшается. Уровень этих процессов оценить затруднительно, и анализировать макроструктуру НС можно только в статическом состоянии после снятия баронагрузки. При повышенных давлениях ВШС (свыше 1400 – 1600 Па, $W_{\text{ш}} > 7,5 - 9,5\%$) поток воздуха и ускоренные частицы шихты способны не только сформировать шихтовую пульпу, но и выдавить ее из зоны I НС в зону II НС (рис. 2, з). При этом в центре НС образуется пустотелое полусферическое углубление, которое является устранимым дефектом. В теории гидродинамики указывается на то, что наличие полости и ее форма способны усилить силовое воздействие на НС [13, 14]. Отмеченное объясняет определяющее влияние гидродинамики шихтовой пульпы на структурообразование НС.

В зоне II НС (рис. 2, б) динамическое давление газа-носителя максимальное, а статическая составляющая полного давления минимальная. Количество шихтовой пульпы в этой зоне уменьшается или отсутствует полностью при $P_{\text{внс}} < 600 - 800$ Па и $W_{\text{ш}} < 7,5\%$. Одной из причин этого является бародиффузионное влагоудаление с поверхности НС, усиливающееся с ростом температуры газа-носителя [8]. Поэтому шихтовые наплывы образуются путем сдвига поверхностных слоев НС не только подвижной пульпы, но и сдвигом влажной и пластичной шихты в направлении движения ВШС. Структурообразованию способствует создание барьеров и неровностей на пути движения частиц за счет

сил трения. На формирование размеров напылов и углублений оказывает влияние теневой эффект [9].

В зоне III НС все составляющие полного давления ВШС имеют минимальное значение. Напыленный слой шихты в этой зоне состоит преимущественно из слабосвязанных шихтовых конгломератов пониженной влажности $W = (0,85 - 0,95)W_{ш}$, которые сформированы преимущественно из разрушившихся гребней напылов, на поверхность которых налипли частицы ВШС. По этой причине прочностные параметры НС имеют минимальное значение. В источниках [8, 9] зону III НС предлагается исключить из процесса зародышеобразования технологическими способами.

Первый механизм образования пористости основан на том, что шихтовые напылы надвигаются друг на друга под динамическим давлением ВШС. Воздушная полость (пора) в наибольшей степени вероятности может образоваться в основании структурного углубления, где наиболее сильное сцепление шихтового напыла с основой. Силами, препятствующими отрыву напыла от основы, являются силы капиллярного и межчастичного взаимодействия, силы вязкого трения [8, 9]. Гребень напыла, находящийся под динамическим давлением ВШС, напротив, обладает более высокой подвижностью и деформацией в силу особой геометрической формы и потому может перекрыть пустоту в зоне, недоступной для давления ВШС. В силу разных причин он может обломиться и вклиниться всей массой в полость углубления.

Если шихтовые напылы не обладают достаточной подвижностью, необходимой для развития первого механизма порообразования, то возможен другой механизм образования пустот – путем механического перекрытия структурных углублений напыляемой шихтой. Этот механизм особенно вероятен в зоне I, где ширина углублений не превышает 0,1 – 0,5 мм и соизмерима с размерами напыляемых частиц и массивных коагулянтов. Возможность такого развития событий подтверждают результаты работ [15, 16], в которых доказана возможность создания упрочняющего каркасного перекрытия для заживления дефектов и пустот НС методом газовой напыления.

Не исключен и комбинированный механизм образования пористости по обоим указанным механизмам. Поскольку механизм напыления носит слоевой характер, то в процессе уплотнения НС в глубине слоя возможно продолжение порообразования по пути уменьшения размеров пор, их удлинения, сфероидизации и др. Ввиду сложности этих процессов, протекающих в ди-

намическом состоянии и в закрытой системе, все описанные механизмы имеют вероятностный характер.

Выводы. Предложен вероятный механизм порообразования окатышей с учетом макроперемещений шихтовой пульпы в условиях динамического воздействия воздушношихтовой струи на шихтовую массу напыленного слоя. Показано влияние характеристик шихты на структурные изменения в объеме напыленного слоя, ответственных за порообразование окатышей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2015. – 334 с.
2. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2014. – 345 с.
3. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, Л.К. Антоненко и др. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
4. Ожогин В.В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья. – Мариуполь: изд. ПГТУ, 2010. – 442 с.
5. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
6. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением, теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 412 с.
7. Газотермическое напыление / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин и др. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
8. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2016. – 373 с.
9. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. – 386 с.
10. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 9 – 13.
11. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
12. Гнездовец А.Г., Калита В.И. Модель формирования макроструктуры покрытий при

- плазменном напылении // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 1. С. 30 – 39.
- 13.** Павловец В.М. Прикладная механика жидкости и газа. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2009. – 216 с.
- 14.** Швыдкий В.С. Механика жидкости и газа / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон и др. – М.: Металлургия, 2003. – 464 с.
- 15.** Павловец В.М. Сравнение способов получения комбинированных окатышей путем напыления шихты низкотемпературными струями сжатого воздуха // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 6. С. 11 – 17.
- 16.** Павловец В.М. Исправление дефектов на поверхности окатышей напылением влажной железорудной шихты на слой комкуемых материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 6. С. 3 – 8.

© 2019 г. *В.М. Павловец*
Поступила 3 сентября 2019 г.