

Оригинальная статья

УДК 669.162.142:622.788

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-77-85

**АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТНЫМ
РЕЛЬЕФОМ НАПЫЛЕННОГО СЛОЯ ШИХТЫ И ПОРИСТОСТЬЮ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ**

© 2024 г. В. М. Павловец

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

Аннотация. Проанализирована роль поверхностного рельефа зародышевых центров, полученных в процессе струйного напыления влажной шихтовой массы, в формировании пористости и структуры железорудных окатышей. Показаны возможности повышения реакционной способности окускованного металлургического продукта за счет формирования открытой пористости окатышей методом струйного напыления железорудной шихты на поверхность шихтового гарнисажа. Для анализа свойств зародышевой массы предложен фактор структурной корреляции, характеризующий связь между относительным объемом структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты, формирующего зародышевую массу, и пористостью зародышей. Установлены две области структурной корреляции между объемными изменениями на поверхности зародышей и пористостью в зависимости от фактора структурной корреляции. В первой, наиболее протяженной области ($\Phi = 1,0 - 2,4$) установлена линейная структурная корреляция между рельефными объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и его пористостью. Коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный с помощью программы MS Excel, для этой зависимости составляет 0,99. Эта область структурной корреляции соответствует широкому интервалу параметров воздушно-шихтовой струи и показателей шихтовых материалов, применяемых для получения влажных окатышей по технологии принудительного зародышеобразования. Во второй области ($\Phi < 1,0$) не зафиксирована структурная корреляция, характерная для первой области зависимости между объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и пористостью зародышей. Этот уровень структурной корреляции обусловлен преимущественным воздействием воздушно-шихтовой струи на глубинные зоны напыленного слоя, вызывающем вязкое течение массы и активное проявление массобменных процессов в объеме зародышей при повышенных давлениях воздушно-шихтового потока, приводящего к формированию открытой пористости. Представлены примеры из производственной практики окомкования влажной железорудной шихты, которые коррелируются с полученными результатами исследований. На основе полученных данных сформулированы условия оптимизации структуры зародышей, уточнен механизм формирования структуры и пористости зародышевой массы в процессе струйного напыления влажной шихты при производстве железорудных окатышей.

Ключевые слова: структурная корреляция, реакционная способность, окускованное металлургическое сырье, железорудные окатыши, пористость, фактор структурной корреляции.

Для цитирования: Павловец В.М. Анализ структурной корреляции между поверхностным рельефом напыленного слоя шихты и пористостью железорудных окатышей. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):77–85. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-77-85](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-77-85)

*Original article***ANALYSIS OF STRUCTURAL CORRELATION BETWEEN THE SURFACE RELIEF OF THE SPRAYED CHARGE LAYER AND THE POROSITY OF IRON ORE PELLETS**

© 2024 V. M. Pavlovets

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The role of the surface relief of the germ centers obtained in the process of jet spraying of wet charge mass in the formation of porosity and structure of iron ore pellets is analyzed. The possibilities of increasing the reactivity of the pelletized metallurgical product due to the formation of open porosity of pellets by the method of jet spraying of iron ore charge onto the surface of the charge garnishing are shown. To analyze the structural properties of the germ mass, a structural correlation factor is proposed that characterizes the relationship between the relative volume of structural depressions on the surface of the deposited charge layer forming the germ mass and the porosity of the embryos. Two areas of structural correlation have been established between volumetric changes on the surface of the embryos and porosity, depending on the structural correlation factor. In the first, most extended region ($\Phi = 1.0 - 2.4$), a linear structural correlation was established between the relief volume changes on the surface of the sprayed charge layer and its porosity. The Pearson correlation coefficient, calculated using the MS Excel program, is 0.99 for this dependence. This area of structural correlation corresponds to a wide range of parameters of the air-charge jet and indicators of charge materials used to produce wet pellets using forced nucleation technology. In the second region ($\Phi < 1.0$), no structural correlation was recorded, characteristic of the first region of the dependence between volumetric changes on the surface of the sprayed charge layer and the porosity of the embryos. This level of structural correlation is due to the predominant effect of the air-charge jet on the deep zones of the deposited layer, which causes a viscous mass flow and an active manifestation of mass-exchange processes in the volume of embryos at elevated pressures of the air-charge current, leading to the formation of open porosity. Examples from the production practice of pelletizing wet iron ore charge are presented, which correlate with the obtained research results. On the basis of the obtained data, the conditions for optimizing the structure of the embryos are formulated, the mechanism for the formation of the structure and porosity of the germ mass in the process of jet spraying of wet charge in the production of iron ore pellets is clarified.

Keywords: structural correlation, reactivity, agglomerated metallurgical raw materials, iron ore pellets, porosity, structural correlation.

For citation: Pavlovets V.M. Analysis of structural correlation between the surface relief of the sprayed charge layer and the porosity of iron ore pellets. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):77–85. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-77-85](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-77-85)

Введение

Практика технологий напыления в различных отраслях техники показывает, что при напылении дисперсных материалов на поверхности обрабатываемых изделий формируется специфический структурный рельеф [1 – 3]. В металлургической технологии принудительного зародышеобразования, основанной на технике напыления, шихтовые материалы образуют сложные объемные изменения на поверхности зародышевых центров [4 – 6]. В качестве силового и структурообразующего средств используется воздушно-шихтовая струя (ВШС), формируемая холодным или нагретым до 100 – 150 °С компрессорным воздухом. Она позволяет получить плотный напыленный слой (НС) шихты на гар-

низаже, металле, резиновом экране или шихтовой поверхности, расположенных в рабочем пространстве окомкователя [7; 8]. Ближайшим прототипом этого процесса является торкретирование теплозащитных футеровок металлургических печей и тепловых агрегатов. Типичные объемные изменения на поверхности напыления в большинстве случаев представлены структурными углублениями и шихтовыми наплывами, создающими специфический волнообразный рельеф влажной шихтовой поверхности. Подобные проявления структуры характерны и для газотермического напыления металлических порошков [9; 10]. Они появляются в результате деформации и пластического течения напыляемой массы, вследствие чего формируется волнообразный или столбчатый рельеф поверхно-

сти НС с чередованием углублений и шихтовых напылов. Технология напыления в широких пределах позволяет регламентировать свойства напыленных покрытий, применяемых в различных отраслях техники и в сложных производственных системах [11 – 15].

Эти структурные изменения имеют различную глубину и ширину, форму, извилистость, плотность расположения. Они могут быть одной из визуальных характеристик техники напыления, позволяющей идентифицировать процесс порообразования в глубине зародыша с рельефными изменениями на поверхности НС. Структурные углубления НС представляют собой поровые каналы, располагающиеся по траектории вокруг оси круглого с коническим профилем НС (при угле атаки струи β , равном 90°). Эти каналы легко фиксируются при микроскопическом исследовании, а на фотографиях поверхности они отображаются темными слабоизвилистыми линиями шириной от 0,1 до 2,5 мм. Объемные структурные углубления представляют собой начальную форму пористости в поверхностном слое НС. Ширина шихтовых напылов или столбов имеет более значительную величину (от 1 до 5 мм). Шихтовые напылы наклонены под небольшим углом ($10 - 40^\circ$) к плоскости атаки ВШС и имеют крутой наклон с обратной (теневой) стороны [4; 5].

Было установлено, что геометрия и характер объемных изменений зависят от давления воздушно-шихтовой струи, влажности материала, крупности частиц и некоторых технологических факторов [6]. При проведении лабораторных экспериментов было установлено, что подобные структурные изменения и специфический характер силового воздействия на шихту являются первопричиной для формирования проницаемой открытой пористости шихтовых зародышей, которая не залечивается даже после высокотемпературного обжига. Формирование регламентированной пористости окускованного металлургического сырья является одним из перспективных направлений в повышении качества железорудных окатышей [16; 17].

В свою очередь, проницаемые поры существенно увеличивают реакционную способность подготовленного окускованного сырья в ходе металлургической плавки. Первичные объемные изменения на поверхности зародышей формируют поровые каналы, которые при дальнейшем напылении заполняются влажной шихтой и являются основой для формирования общей и проницаемой для газов пористости в глубине зародышей. Количественные характеристики объемных изменений позволяют установить структурную идентичность и корреляцию между

макрорельефом НС и пористостью зародышевой массы, а затем и кондиционных окатышей. Массовая доля зародышей в объеме окатышей может достигать 90 %, поэтому структурные свойства окатышей в целом определяются свойствами зародышевой массы. Корреляционная зависимость между объемными изменениями на поверхности напыления и пористостью зародышей, сформированных техникой напыления, представляет практический интерес для производителей, которые могут получить дополнительный фактор для управления процессами структуро- и формообразования при производстве железорудных окатышей. Подобные поверхностные образования у напыленных покрытий являются предметом изучения у отечественных и зарубежных исследователей [3; 18 – 22].

Целью настоящей работы является исследование структурной корреляции между визуально наблюдаемыми объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и его пористостью в процессе зародышеобразования, а также обоснование механизма формирования структуры и пористости зародышевой массы в процессе струйного напыления влажной шихты при производстве железорудных окатышей.

Методы исследования и материалы

В рамках поставленной цели вычисляли фактор структурной корреляции Φ между относительным объемом структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты Θ_v , доли ед, и общей пористостью зародышей Π , доли ед., по следующему выражению:

$$\Phi = \Theta_v / \Pi. \quad (1)$$

Общую пористость зародышей определяли экспериментально, используя модельные образцы, вырезанные из НС, применяли стандартную методику [1; 2]. Относительный объем структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты вычисляли по выражению:

$$\Theta_v = \sum V_{cy} / V_o, \quad (2)$$

где $\sum V_{cy}$ – суммарный объем структурных углублений на поверхности НС, м^3 ; V_o – объем поверхностного участка напыленного слоя шихты, в котором расположены структурные углубления, м^3 .

Суммарный объем структурных углублений на поверхности НС вычисляли по следующей формуле:

$$\sum V_{cy} = V_{cy} N = 0,25 \pi K h_o b_o d_{nc} N, \quad (3)$$

Значение коэффициента K
The value of the coefficient K

Давление ВШС, Па	Значение коэффициента K при влажности напыляемой шихты, %		
	5,0	7,5	10,0
100 – 400	1,0 – 1,1	1,1 – 1,2	1,1 – 1,3
400 – 700	1,1 – 1,2	1,2 – 1,3	1,3 – 1,4
700 – 1000	1,2 – 1,3	1,3 – 1,4	1,4 – 1,6
1000 – 1400	1,3 – 1,4	1,4 – 1,5	1,5 – 1,8

где V_{cy} – объем структурного углубления в среднем сечении $(0,5R_{nc})$ кругового напыленного слоя шихты, m^3 ; N – среднее количество структурных углублений, определяемое по количеству концентрических теневых каналов на поверхности НС [4; 5]; K – коэффициент, учитывающий сложность рельефа и неравномерность поперечного профиля структурных углублений на поверхности НС; h_o и b_o – средняя высота и ширина структурных углублений в среднем сечении $(0,5R_{nc})$ напыленного слоя шихты, м [4; 5]; d_{nc} – средний диаметр напыленного слоя шихты по результатам десяти экспериментов, м [4; 5].

Объем поверхностного участка напыленного слоя шихты, в котором располагаются структурные углубления, в первом приближении приняли, равным объему цилиндра диаметром d_{nc} и высотой h_o :

$$V_o = 0,25\pi d_{nc}^2 h_o. \quad (4)$$

После подстановки выражений (3) и (4) в формулу (2) уравнение для параметра Θ_v примет окончательный вид:

$$\Theta_v = KNb_o/d_{nc}. \quad (5)$$

Параметры N , b_o , d_{nc} были определены в работах [4 – 8]. Коэффициент K был рассчитан по данным, полученным в ходе экспериментов. Для этого напыленный слой шихты вместе с напыляемой основой (металлической пластиной) сушили ($t = 105^\circ C$, $\tau = 20$ мин) и обжигали в нагревательной печи при температуре $1200^\circ C$ для придания ему повышенной прочности и фиксации размеров структурных углублений. Считали, что в процессе термической усадки размеры углублений и НС уменьшаются на 1,0 – 1,5 % [6]. После охлаждения на поверхности находили кольцевое концентрическое углубление, которое заполняли расплавленным парафином. Парафин растекался по углублению, затвердевал, формируя контрастное русло светло-серого цвета [7; 8]. После затвердевания парафина его извлекали из струк-

турного углубления, повторно нагревали до жидкотекучего состояния и определяли объем V_n , m^3 , используя мерные емкости для жидкости. Коэффициент K вычисляли по выражению:

$$K = V_n / (0,25\pi h_o b_o d_{nc}). \quad (6)$$

После экспериментов и вычислений установили, что величина K зависит от давления воздушной среды $P_{вшс}$ и влажности напыляемого материала (см. таблицу). В расчетах по формуле (5) использовали среднее значение K .

Визуализация процесса заполнения поверхностных углублений расплавленным парафином дает расширенные возможности для дополнительной информации. Она позволяет уточнить рельеф поверхности НС, измерить более тщательно размеры структурных напылов и углублений, а также определить направление течения массы по руслу углублений на поверхности. Наряду с микроскопическими исследованиями, в которых измерения геометрических характеристик проводятся в отдельных объемах НС с высокой точностью, эта методика позволяет уточнить структурные характеристики объемных изменений на всей поверхности НС и детализировать механизм формирования пористости зародышевой массы.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов и вычислений приведены на рис. 1 – 4. Зависимость параметра Θ_v (рис. 1) от давления ВШС показывает, что с ростом $P_{вшс}$ объем структурных углублений на поверхности НС уменьшается, особенно резко в интервале 100 – 600 Па. Это характерно для шихт с низкой влажностью 5,0 и 7,5 %, но более ярко выражено при $W = 10$ %. Увеличение относительного объема поверхностных углублений НС практически линейно приводит к росту пористости напыленного слоя шихты и всей зародышевой массы, сформированной на его

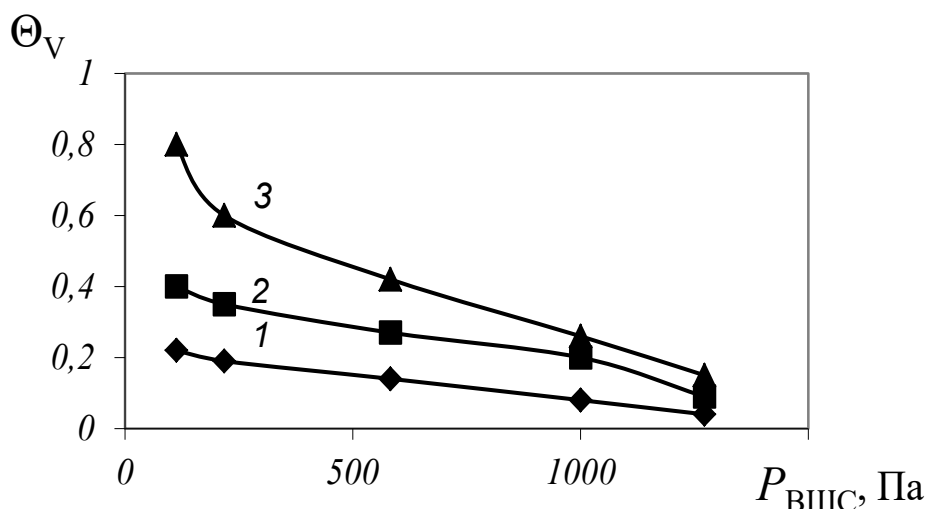


Рис. 1. Зависимость параметра Θ_v от давления ВШС
(здесь и далее влажность шихты 5,0 % (1); 7,5 % (2); 10,0 % (3))
Fig. 1. Dependence of the parameter Θ_v on the pressure of the HC
(hereinafter, the moisture content of the charge 5.0 % (1); 7.5 % (2); 10.0 % (3))

основе (рис. 2). Коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный с помощью программы MS Excel, для этой зависимости составляет 0,98.

Однако фактор структурной корреляции (рис. 3) изменяется в широком интервале значений (от 0,33 до 2,40) и существенно зависит от давления ВШС (рис. 4), что привело к необходимости весь массив данных разделить на две области. В первой области ($\Phi = 1,0 - 2,4$) структурной корреляции величина Φ соответствует условию $\Phi \geq$

1. Эта область, наиболее протяженная по значению Θ_v , характерна для относительно низкого давления ВШС и более высокой влажности шихты ($P_{\text{ВШС}} \leq 580 \text{ Па}$, $W = 5 \%$; $P_{\text{ВШС}} \leq 1100 \text{ Па}$, $W = 7,5 \%$). К этой области структурной корреляции относится и весь интервал давлений ВШС для шихт с влажностью $W = 10 \%$. Это значит, что в области указанных значений $P_{\text{ВШС}}$ и W относительный объем структурных углублений ($\Theta_v = 0,14 - 0,81$) на поверхности НС стабильно

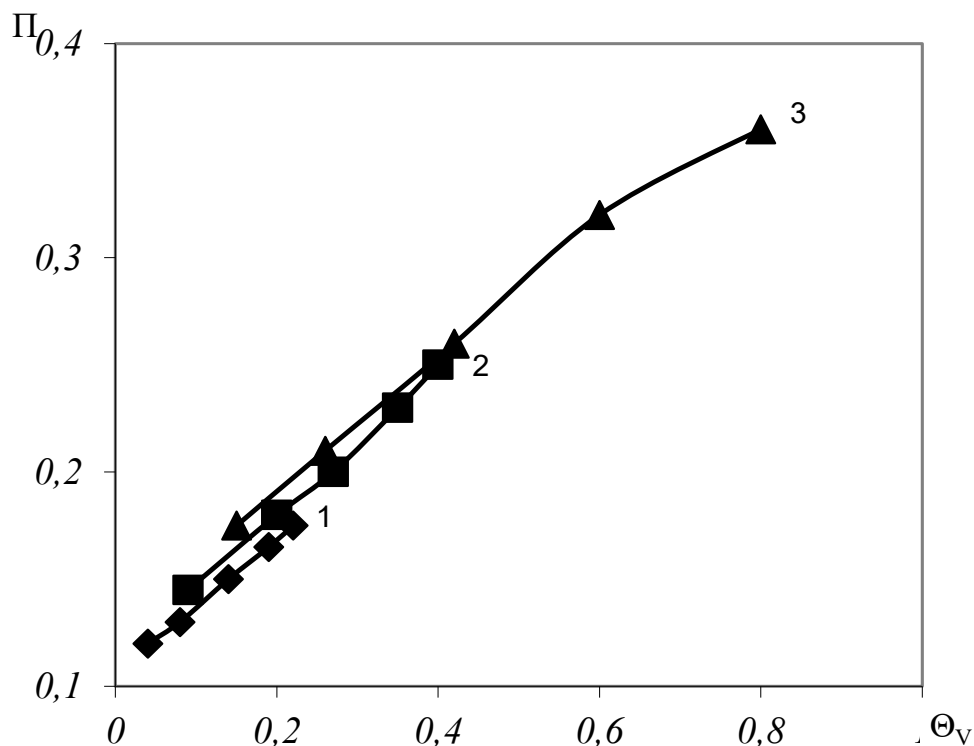


Рис. 2. Зависимость пористости образцов, вырезанных в среднем сечении ($0,5 R_{\text{НС}}$) кругового напыленного слоя шихты, от параметра Θ_v
Fig. 2. Dependence of the porosity of samples cut in the middle section ($0.5 R_{\text{НС}}$) of the circular sprayed layer of the charge on the parameter Θ_v

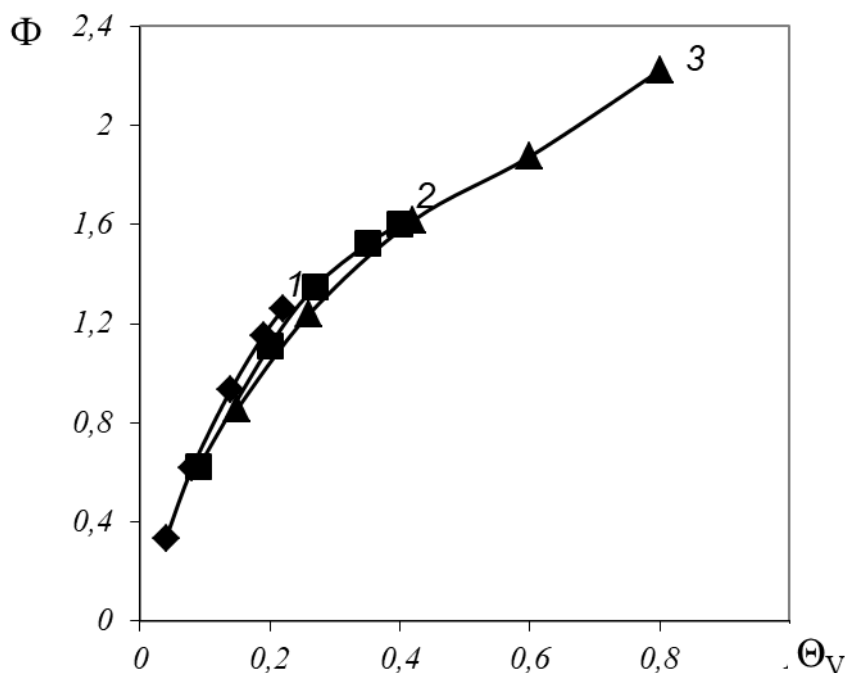


Рис. 3. Зависимость фактора структурной корреляции от параметра Θ_v
 Fig. 3. Dependence of the structural correlation factor on the parameter Θ_v

превышает пористость (0,14 – 0,36) зародышевой массы. Коэффициент корреляции Пирсона для этой области составляет 0,99. При этом пористость закономерно уменьшается от поверхности к центру НС. Это объясняется тем, что при непрерывном поступлении шихтовой массы во время напыления объемные полости заполняются материалом, происходит уменьшение их свободного объема, развивается процесс порообразования. Пористость внутри структурных углублений формируется в результате действия многочисленных факторов: перекрытия углубления шихтой, надвига напылов, пластического течения вязкой массы, растворения-осаждения в среде жидкой пульпы, разломов-расслоений и других факторов [4 – 8]. Поэтому пористость после напыления в глубине НС естественным образом становится меньше величины Θ_v . В области $\Phi \geq 1$ можно считать, что величина Π пропорциональна Θ_v и коррелируется с ней по зависимости, близкой к линейной (рис. 1 – 3). Во второй области значений ($\Phi < 1$) $\Theta_v \leq \Pi$. Протяженность этой области по величине Θ_v существенно меньше. Это в основном область более высокого давления ВШС и пониженной влажности шихты ($P_{\text{ВШС}} \geq 580$ Па, $W = 5\%$; $P_{\text{ВШС}} \geq 1100$ Па, $W = 7,5\%$). Коэффициент корреляции Пирсона для этой области составляет 0,97. Однако, в этой области не зафиксирована структурная корреляция между параметрами Θ_v и Π , характерная для первой области. Это значит, что на поверхности НС объем структурных углублений меньше пористости за-

родышевой массы ($\Theta_v \leq \Pi$), а пористость растет от поверхности к центру. Если аппроксимировать полученные данные (рис. 2), то при $\Theta_v = 0$ пористость образцов, вырезанных из НС, должна составлять 0,12. Это объясняется особенностями аэродинамической картины на поверхности НС при высоких давлениях ВШС, усложненной активными массообменными процессами, искажающими условия структурной корреляции [4 – 8], согласно которым рельеф поверхности содержит минимальное количество объемных изменений после напыления. Особенностью аэродинамики напыления является то, что для шихт с пониженной влажностью в рассматриваемой области давлений ВШС превалирует статическое давление струи, препятствующее формированию структурных изменений на поверхности НС, за которые отвечает динамическое давление ВШС. Поскольку в процессе напыления глубинные слои испытывают динамические нагрузки от ВШС, действующие от оси НС к его периферии, то вероятно по этой причине появляются сдвиговые усилия, ответственные за формирование пористости в глубине зародышей. Предварительный прогноз показывает, что пока НС находится в зоне действия ВШС, на поверхности напыленного слоя не происходит структурных изменений, в его глубине продолжается структурообразование. Можно предположить, что механизм формирования пористости близок к механизму формирования структуры по технологии механического прессования [4; 6].

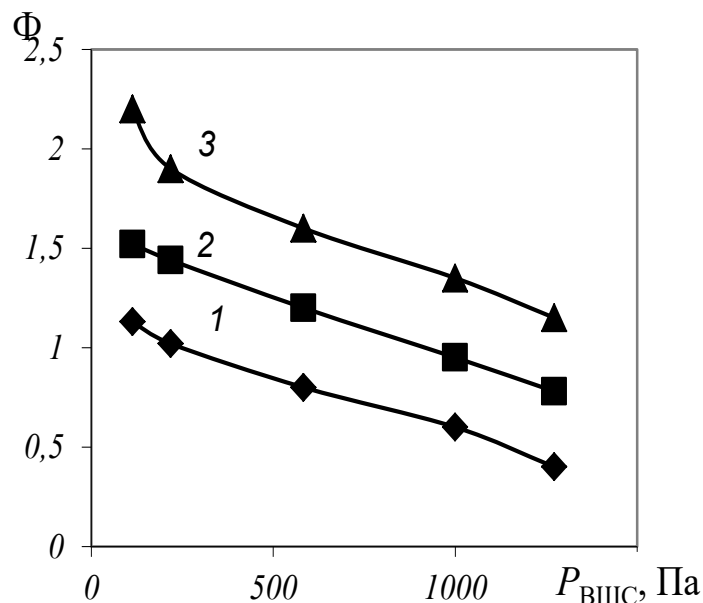


Рис. 4. Зависимость фактора структурной корреляции от давления ВШС
 Fig. 4. Dependence of the structural correlation factor on the air-charge jet pressure

Механизм формирования структуры и пористости зародышей в режиме напыления шихты существенно отличается от развития структуры зародышей и окатышей, получаемой по промышленной технологии в режиме переката. Для обсуждаемой проблемы можно найти некоторые аналогии из практики производства окатышей. В частности, качественная взаимосвязь между объемными изменениями на поверхности влажных окатышей и их пористостью подтверждается практикой производства окатышей. Известно, что если влажность комкуемой шихты по каким-либо причинам превышает ее оптимальное значение ($W \geq 9 - 10 \%$), то режим переката нарушается и окатыши получаются бесформенными и грязеподобными с большим количеством объемных изменений на их поверхности, формирующих повышенную пористость и низкую плотность [4; 5]. Для этого нетипичного режима окомкования в первом приближении можно считать, что между поверхностными изменениями и пористостью окатышей существует структурная корреляция, требующая корректировки технологического режима. Этот факт требует экспериментального доказательства, так как на структуру окатышей влияет режим увлажнения и окомкования [6; 7]. При оптимальной влажности железорудной шихты окомкование (в режиме переката) имеет незначительные структурные изменения на своей поверхности, но их пористость для этого режима достаточно высокая (20 – 28 %). Объемные изменения на поверхности окатышей минимальные, но пористость в структуре гранул достаточно высокая, что близко к выводам, сделанным в настоящей работе для второй области значений Φ , которая не соответствует

принципам структурной корреляции между величинами Φ_v и Π в первой области. Этот факт может быть предметом дальнейших исследований. В виду сложности и многофакторности этих процессов, протекающих в динамическом состоянии и в закрытой дисперсной системе, все описанные механизмы поро- и структурообразования при производстве окатышей имеют вероятностный характер.

Выводы

Проанализирована роль поверхностного рельефа зародышевых центров в формировании пористости и структуры железорудных окатышей. Сформулированы условия оптимизации структуры и предложены методы получения окатышей с улучшенными металлургическими свойствами. Проанализирован фактор структурной корреляции, характеризующий связь между относительным объемом структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты, формирующего зародышевую массу, и пористостью зародышей. Установлены две области соответствия между объемными изменениями на поверхности зародышей и пористостью в зависимости от фактора корреляции. В первой области корреляции ($\Phi \geq 1$) установлено линейное структурное соответствие между рельефными объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и его пористостью. Во второй области ($\Phi < 1$) зафиксирована низкая степень структурной корреляции между объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и пористостью зародышей. Это обусловлено вязким течением массы и активным проявлением массообменных процессов в объеме зародышей при по-

вышенном давлении воздушно-шихтовой струи, приводящее к формированию открытой пористости. На основе полученных данных уточнен механизм формирования структуры и пористости зародышевой массы в процессе струйного напыления влажной шихты при производстве железорудных окатышей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. *Нанесение покрытий напылением, теория, технология и оборудование*. Москва: Металлургия, 1992:412.
2. Балдаев Л.Х. и др. *Газотермическое напыление*. Москва: Маркет ДС, 2007:344.
3. Гнездовец А.Г., Калита В.И. Модель формирования макроструктуры покрытий при плазменном напылении. *Физика и химия обработки материалов*. 2007;1:30–39.
4. Павловец В.М. *Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022:336. EDN: EBYWIW
5. Павловец В.М. *Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023:328.
6. Павловец В.М., Герасимук А.В. Особенности движения зародыша сложной формы на тарельчатом окомкователе в производстве железорудных окатышей. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;62(2):87–95.
7. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016;10:857–863.
8. Павловец В.М. *Окатыши в технологии экстракции металлов из руд*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022:284.
9. Калита В.И., Комлев Д.И. Механизм формирования аморфной структуры в металлических сплавах при плазменном напылении. *Металлы*. 2003;6:30–37.
10. Pivinskii Yu.E., Rozhkov E.V. Ceramic castables – final stage in the evolution of low-cement refractory castables. Part 3. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003;44(3):134–140.
11. Frantes K. North American Iron Mines Running Flat Out to Meet Domestic and Worldwide Demand. *Skilling's Mining Review*. 2005;94(7):6–21.
12. *BASICS IN MINERAL PROCESSING*: Metso Corporation, 2015:752.
13. Poveromo J.J. Grade pellet quality and supply. *AISTech (Assoc. Iron & Steel Technology) Annual Meeting*, Indianapolis, 2015:751–762.
14. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Bjorkman M.T. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*. 2008;181(3):321–330.
15. Wang Zhaocai, Mansheng Chu, Shiqiang Chen etc. Effects of B-Mg additive on metallurgical properties of oxidized pellets. *Advanced Materials Research*. 2011;284-286:1232–1236.
16. Абзалов В.М. и др. *Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей*. Екатеринбург: НППП «ТОРЕКС», 2012:340.
17. Okrkr S.I., Onukwuli O.D. Effect of basicity on metallurgical properties of pellets produced from Itakpe iron ore concentrates. *Discovery and Innovation*. 1999;11(3-4):170–176.
18. Goejen J.G., Miller R.A., Brindley W.J., Leisler G.W. *A simulation technique for predicting defects of thermal sprayed coatings: NASA Technical Memorandum TM-106939*, 1995.
19. Hansbo A., Nylén P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects. *Surface Coatings Technol.* 1999;122:191–201.
20. Zhang Y., Bandyopadhyay A. Direct fabrication of compositionally graded Ti – Al₂O₃ multi-material structures using Laser Engineered Net Shaping. *Additive Manufacturing*. 2018;21:104–111.
21. Valladares L. De Los Santos, Domínguez A.B., Félix L.L., Kargin J.B., Mukhambetov D.G., Kozlovskiy A.L., Moreno N.O., San-tibañez J.F., Cabrera R.C., Barnes C.H.W. Characterization and magnetic properties of hollow α -Fe₂O₃ microspheres obtained by sol gel and spray roasting methods. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2019;4(3):483–491.
22. Chikashi Kamijo, Masaki Hara, Takazo Kawaguchi et al. Sinter feed granulation improvement technique by pan pelletizer. *Zairyo to Prosesu = CAMP ISIJ*. 2010;23(1):5.

REFERENCES

1. Kudinov V.V., Bobrov G.V. *Application of coatings by spraying, theory, technology and equipment*. Moscow: Metallurgy, 1992:412. (In Russ.)
2. Baldaev L.Kh. et al. *Thermal spraying*. Moscow: Market DS, 2007:344. (In Russ.)
3. Gnezdovets A.G., Kalita V.I. Model of formation of coating macrostructure during plasma spraying. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2007;1:30–39. (In Russ.)

4. Pavlovets V.M. *Development of technology and technology for pelletizing iron ore raw materials in metallurgy*. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022:336. (In Russ.). EDN: EBYWIW
5. Pavlovets V.M. *Expansion of functional capabilities of units for preparation of iron ore raw materials for metallurgical smelting*. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023:328. (In Russ.)
6. Pavlovets V.M., Gerasimuk A.V. Features of the movement of a complex-shaped embryo on a disc pelletizer in the production of iron ore pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;62(2):87–95. (In Russ.)
7. Pavlovets V.M. Formation of the structure of iron ore pellets obtained using thermal power spraying of wet batch. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016;10:857–863. (In Russ.)
8. Pavlovets V.M. *Pellets in the technology of extraction of metals from ores*. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022:284. (In Russ.)
9. Kalita V.I., Komlev D.I. Mechanism of formation of amorphous structure in metal alloys during plasma spraying. *Metally*. 2003;6:30–37. (In Russ.)
10. Pivinskii Yu.E., Rozhkov E.V. Ceramic castables – final stage in the evolution of low-cement refractory castables. Part 3. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003;44(3):134–140.
11. Frantes K. North American Iron Mines Running Flat Out to Meet Domestic and Worldwide Demand. *Skilling's Mining Review*. 2005;94(7):6–21.
12. *BASICS IN MINERAL PROCESSING*: Metso Corporation, 2015:752.
13. Poveromo J.J. Grade pellet quality and supply. *AISTech (Assoc. Iron & Steel Technology) Annual Meeting*, Indianapolis, 2015:751–762.
14. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Bjorkman M.T. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*. 2008;181(3):321–330.
15. Wang Zhaocai, Mansheng Chu, Shiqiang Chen etc. Effects of B-Mg additive on metallurgical properties of oxidized pellets. *Advanced Materials Research*. 2011;284-286:1232–1236.
16. Abzalov V.M. et al. *Physicochemical and thermal engineering principles of iron ore pellet production*. Ekaterinburg: NPVP «TOREKS», 2012:340. (In Russ.)
17. Okrkr S.I., Onukwuli O.D. Effect of basicity on metallurgical properties of pellets produced from Itakpe iron ore concentrates. *Discovery and Innovation*. 1999;11(3-4):170–176.
18. Goejen J.G., Miller R.A., Brindley W.J., Leisler G.W. *A simulation technique for predicting defects of thermal sprayed coatings: NASA Technical Memorandum TM-106939*, 1995.
19. Hansbo A., Nylén P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects. *Surface Coatings Technol.* 1999;122:191–201.
20. Zhang Y., Bandyopadhyay A. Direct fabrication of compositionally graded Ti – Al₂O₃ multi-material structures using Laser Engineered Net Shaping. *Additive Manufacturing*. 2018;21:104–111.
21. Valladares L. De Los Santos, Domínguez A.B., Félix L.L., Kargin J.B., Mukhambetov D.G., Kozlovskiy A.L., Moreno N.O., San-tibañez J.F., Cabrera R.C., Barnes C.H.W. Characterization and magnetic properties of hollow α -Fe₂O₃ microspheres obtained by sol gel and spray roasting methods. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2019;4(3):483–491.
22. Chikashi Kamijo, Masaki Hara, Takazo Kawaguchi et al. Sinter feed granulation improvement technique by pan pelletizer. *Zairyo to Prosesu = CAMP ISIJ*. 2010;23(1):5.

Сведения об авторах

Виктор Михайлович Павловец, к.т.н., доцент, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: pawlowets.victor@yandex.ru
SPIN-код: 8380-9354

Information about the authors:

Viktor M. Pavlovets, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: pawlowets.victor@yandex.ru
SPIN-код: 8380-9354

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.08.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 12.09.2024

Received 28.08.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 12.09.2024