

В.М. Павловец

Сибирский государственный индустриальный университет

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОКОМКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ В РЕЖИМЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ

Получение сырых окатышей на тарельчатом окомкователе по технологии принудительного зародышеобразования включает формирование зародышей по форме, близкой форме куба, в холостой зоне тарели методом напыления и создание оболочки окатышей их доокомкованием в рабочей зоне окомкователя в режиме переката [1, 2]. Эта технология экспериментально опробована в лабораторных условиях и позволяет получать окатыши с дифференцированным распределением пористости по их сечению и организовать процесс формирования массы окатыша с более высокой скоростью.

Другим достоинством технологии принудительного зародышеобразования является возможность использования трудноокомкуемых минеральных и техногенных материалов (углеродсодержащих, древесных, грубодисперсных и др.) для формообразования. Низкие адгезионные свойства этих материалов предлагается компенсировать усилиями, возникающими при напылении увлажненной дисперсной шихты сжатым воздухом на шихтовый гарнисаж окомкователя. Эти возможности технологии особенно актуальны для окусования дисперсного техногенного сырья, одним из методов формообразования которого является производство окатышей [3, 4].

Техника напыления позволяет расширить число управляющих воздействий на процесс зародышеобразования и формирования окатышей. К их числу относятся: давление, расход и угол атаки струи сжатого воздуха, соотношение воздух – шихта и их влажности, конструктивные характеристики струйного аппарата и механизмов деления напыленного слоя шихты. Эти параметры в большинстве способов окомкования должны быть увязаны с назначением оптимального угла наклона днища тарели к горизонту и ее частоты вращения [1, 2]. Для этого требуются теоретическая проработка силового воздействия на зародыш сложной формы в режиме переката со стороны окомкователя и экспериментальная проработка условий пластической деформации зародышей

в процессе принудительного зародышеобразования.

Целью настоящей работы явился анализ способов окомкования железорудной шихты, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.

На рис. 1 показано условие устойчивости зародыша на наклонной плоскости шихтового гарнисажа (ШГ) в отсутствии центробежной силы. Устойчивость зародыша на шихтовом гарнисаже определяется горизонтальным положением его центра масс (Ц) относительно линии опоры – ребра OO_1 (рис. 1). Это условие соблюдается в стационарном режиме работы окомкователя, когда зародыш правильной формы, образующийся в холостой зоне тарели (рис. 1, а), поступает в рабочую зону окомкователя и в процессе переката деформируется и наращивает свою массу (рис. 1, б, в).

Если линия действующей силы (в данном случае силы тяжести) переместится за опорное ребро OO_1 , то сформируется момент силы, который выведет зародыш из состояния устойчивости и обеспечит его перекаат (рис. 1, г). Это справедливо для зародыша со смятыми (деформированными) углами и ребрами (рис. 1, д) и в отношении зародыша, на котором при перекаате частично сформирована оболочка окатыша (рис. 1, е). Положение устойчивости характеризуется углом переката γ_k , составленным из перпендикуляра на опорную плоскость ШГ и линией действующей силы. Графически этот угол можно зафиксировать при $\gamma = \gamma_k$. Выход из состояния устойчивости и создание условий для переката окатышей происходят при $\gamma > \gamma_k$. Для этих условий у зародыша правильной кубической формы угол переката превышает 45° (рис. 1, а). Угол переката зависит от частоты вращения тарели окомкователя, угла наклона днища тарели к горизонту и степени деформации зародыша. В свою очередь более высокая степень деформации позволяет назначить более узкие интервалы изменения угла наклона днища тарели к горизонту [5]. Поэтому в процессе зародышеобразования желательнее иметь максимальную степень деформации зародыша.

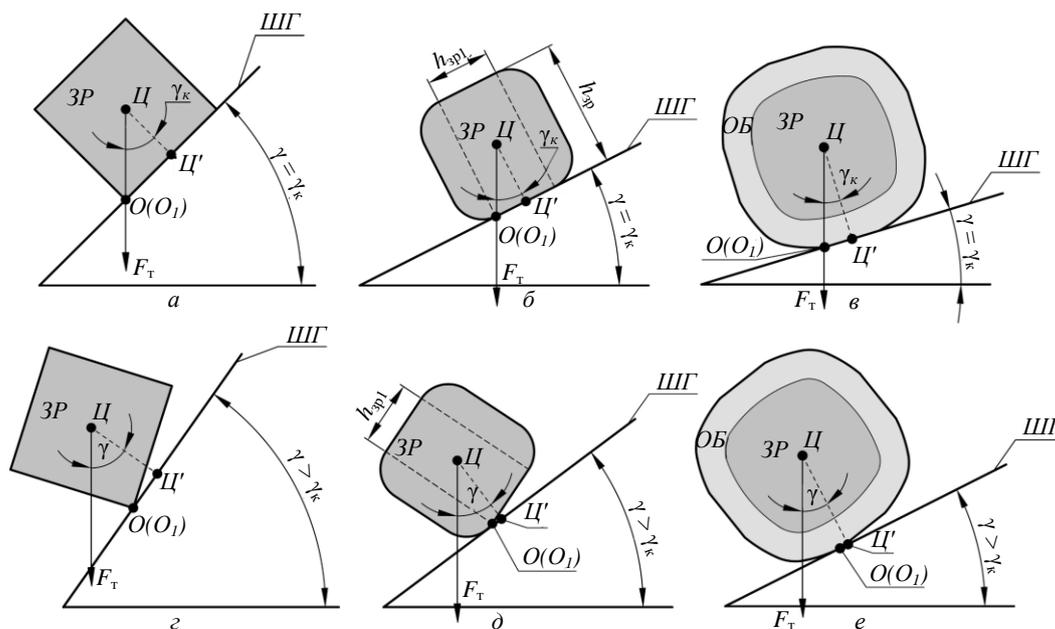


Рис. 1. Схемы, иллюстрирующие устойчивость (а – в) зародыша и режим его переката (з – е) на ШГ; зародыши: а, з – правильной кубической формы; б, д – с частично смятыми углами и ребрами; в, е – с полностью смятыми углами и ребрами

Угол переката может быть определен из треугольника ЦЦ'О (рис. 1, б) как арктангенс отношения его сторон:

$$\gamma_k = \arctg(h_{зр1} / h_{зр}) = \arctg K_{см}, \quad (1)$$

где $K_{см} = h_{зр1} / h_{зр}$ – коэффициент смятия зародыша (может принимать значения в диапазоне 0 – 1); $h_{зр}$ – размер ребра несмятого зародыша после зародышеобразования, м; $h_{зр1}$ – размер ребра смятого (деформированного) зародыша, м.

В работе [5] установлено, что назначение режима окомкования тарельчатого окомкователя (частоты вращения, угла наклона тарели к горизонту) в технологии принудительного зародышеобразования зависит от формы зародыша и коэффициента смятия последнего. Формула (1), по которой определяется параметр γ_k с учетом коэффициента $K_{см}$, справедлива для симметрично-сминаемого зародыша. В практических условиях зародышеобразования смятие происходит несимметрично. Причем в первую очередь смятию подвергаются углы зародыша, поэтому указанная формула справедлива только для одного из двенадцати произвольно выбранного ребра. Поэтому для повышения достоверности вычислений параметра $K_{см}$ количество отобранных для измерительных действий зародышей должно быть не менее десяти. С учетом смятия углов и уменьшения размеров всех граней зародыша формула (1) примет следующий вид:

$$K_{см} = \sum_1^n \left\{ \sum_{i=1}^{12} h_{зрi} / (12 n) \right\} / \sum_1^n \left\{ \sum_{i=1}^{12} h_{зрi} / (12 n) \right\}, \quad (2)$$

где $i = 12$ – число граней зародыша; $n = 10$ – количество зародышей, отобранных для измерения размеров ребер и взятых для анализа.

Экспериментальные схемы, реализующие режим окомкования железорудной шихты в режиме принудительного зародышеобразования (рис. 2), были оформлены в виде объектов интеллектуальной собственности (получены патенты). На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь диаметром $D = 0,62$ м работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели к горизонту составлял 45° . Расход шихты на зародышеобразование не превышал 0,05 кг/с. Все технологические схемы были ориентированы на получение несмятых зародышей правильной кубической формы с размерами граней $h_{зр}$ на уровне 10 – 11 мм. В работе [2] подробно показана техническая возможность получения зародышей такой формы. Зародыши для расчета параметра $K_{см}$ и анализа эффективности экспериментальной схемы отбирали после зародышеобразования (несмятые) и в нижней части холостой зоны тарели (смятые).

В ходе эксперимента от места деления напыленного слоя (НС) шихты на зародыши и до нижней части холостой зоны зародыши проходили относительное расстояние L/D , где происходило частичное смятие их углов и граней за счет переката по гарнисажу и ударного

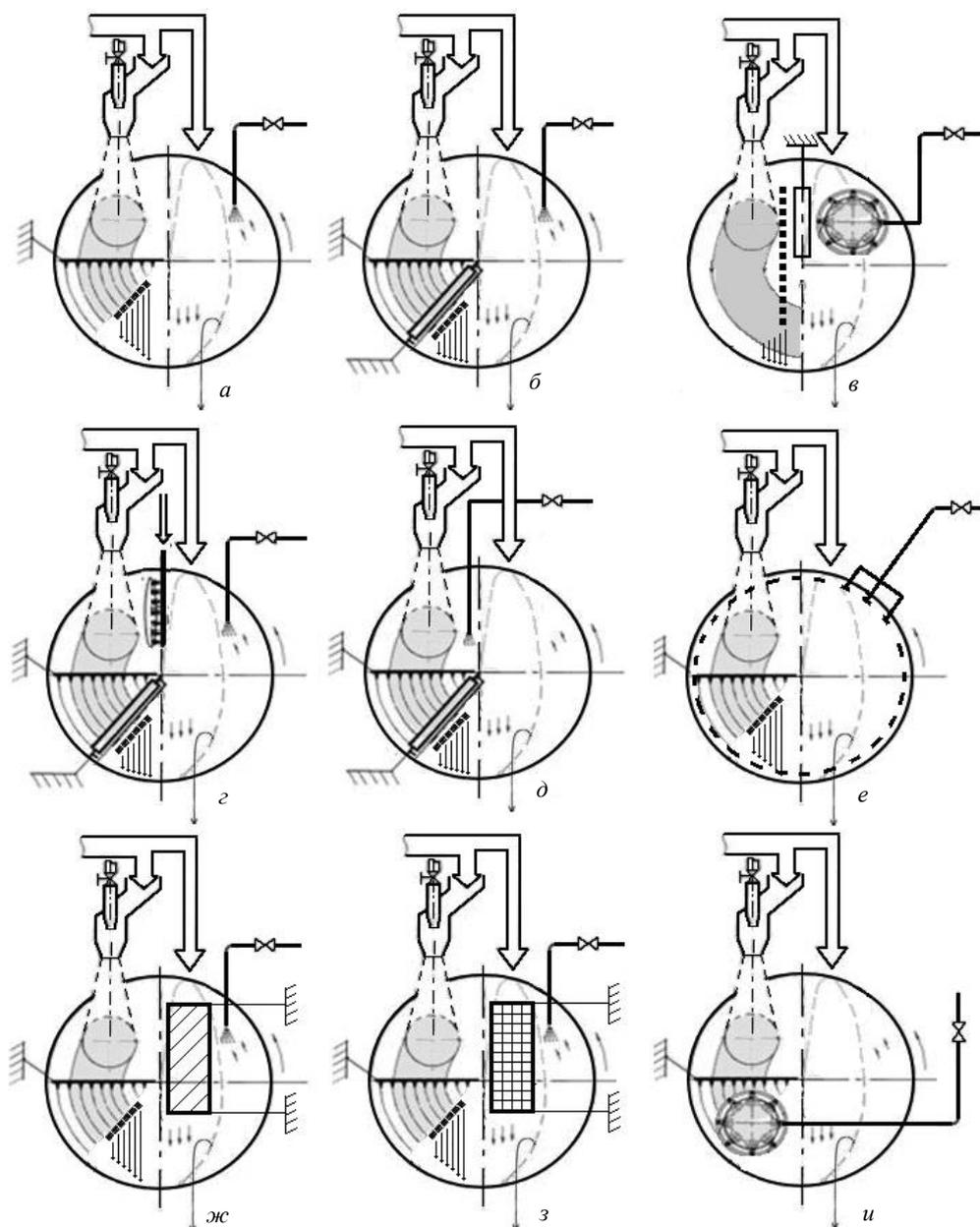


Рис. 2. Экспериментальные схемы, реализующие окомкование железорудной шихты в режиме принудительного зародышеобразования:

a – плужковым делителем; *б* – вращающимся барабаном; *в* – то же в верхней части холостой зоны; *г* – то же с увлажнением напыленного слоя; *д* – то же с его увлажнением; *е* – плужковым делителем с профилированием и увлажнением бортового гарнисажа; *ж* – плужковым делителем и ленточным пригрузом, установленным над нисходящим слоем зародышей; *з* – то же с ленточным пригрузом, снабженным ячейковой решеткой; *и* – вращающимся барабаном и увлажнением массива зародышей

взаимодействия друг с другом. Соотношение L/D является конструктивной характеристикой и безразмерным параметром физической модели (экспериментальной схемы), непосредственно влияющей на выходные показатели способов окомкования и позволяющей перенести результаты моделирования на производственный объект [1, 2].

Сложность экспериментальной схемы (ЭС) определяли по количеству конструктивных элементов схемы, наличию вращающихся узлов, налипания шихты на детали схемы, по

появлению отказов и затруднений в работе. Численное значение выхода годного (ВГ) вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и массой образовавшейся мелочи (фракции ≤ 5 мм) в течение определенного цикла зародышеобразования и доокомкования (5 мин).

Размеры граней зародышей измеряли с помощью измерительного шаблона и штангенциркуля с точностью 0,1 мм. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Результаты экспериментов

Номер ЭС (рис. 1)	Показатели работы экспериментальной схемы			
	L/D	Сложность ЭС	ВГ, %	$K_{см}$
<i>a</i>	0,25 – 0,30	Простая	85	0,92
<i>б</i>	0,25 – 0,30	Сложная	92	0,87
<i>в</i>	0,80 – 1,00	Сложная	88	0,74
<i>г</i>	0,25 – 0,30	Сложная	94	0,79
<i>д</i>	0,25 – 0,30	Сложная	93	0,91
<i>е</i>	0,25 – 0,30	Простая	86	0,90
<i>ж</i>	0,25 – 0,30	Сложная	78	0,78
<i>з</i>	0,25 – 0,30	Сложная	73	0,77
<i>и</i>	0,25 – 0,30	Сложная	94	0,78

Процесс зародышеобразования и деления НС по схеме *a* осуществляется плужковым делителем достаточно простой формы, в котором отсутствуют вращающиеся элементы конструкции, что является достоинством схемы [6, 7]. Плужковый делитель сочетает в одном устройстве функции продольного и поперечного делений напыленного слоя. Для уменьшения налипания шихты на делитель его поверхность покрыта бакелитовым лаком. Недостатком схемы является большой разброс размеров зародышей, которые преимущественно имеют форму параллелепипеда. В этой связи перекаат зародышей происходит перпендикулярно большей (продольной) оси зародыша. Поэтому изменение формы зародыша происходит несимметрично, а наибольшей деформации подвержены только нескольких граней. В этой связи пластическая деформация зародышей по этой схеме развивается в минимальной степени, а значение $K_{см}$ самое высокое из всех представленных ниже технических решений. Эксперименты, проведенные по указанной технической схеме [2], позволили впоследствии усовершенствовать конструкцию делителей напыленного слоя шихты и получить ряд работоспособных технических решений, способных управлять процессами принудительно зародышеобразования и окомкования.

По схеме *б* зародышеобразование и деление напыленного слоя осуществляются снабженным ребрами вращающимся барабаном, получающим движение от ШГ [2]. Эта схема аппаратно более сложная по сравнению со схемой *a*, но обладает основным преимуществом – дает возможность получить зародыши с узким фракционным составом ($h_{зр} = 10 - 11$ мм). Относительное расстояние (длина пути) L/D имеет практически такое же значение, как и в схеме *a*. Это обусловлено тем, что габариты продольного делителя существенно уменьшились по сравнению с габаритами плужкового делителя.

На освободившейся площади днища тарели был установлен вращающийся барабан с ребрами из нержавеющей стали. Продольный делитель выполнен в виде тонких ножей, покрытых бакелитовым лаком, что позволило почти полностью исключить налипание шихты. Установлено, что уменьшение диаметра вращающегося барабана увеличивает скорость его вращения, а это дополнительно снижает налипание шихты на металлические части делителей. Опытным путем установлено, что снижение налипания влажной шихты на металл можно обеспечить интенсивным орошением (смывом) поверхности делителей распыленной водой. Образующиеся зародыши имеют форму, близкую к форме куба. Они перекаатываются по всем своим граням, что усиливает процесс пластической деформации и снижает коэффициент смятия до 0,87. Необходимо отметить, что в технике действующего производства проблема налипания шихты на гарнисаж окомкователя решается путем установки разнообразных по конструкции очистительных устройств [8 – 11]. Главное требование к таким устройствам – это высокая износостойкость их поверхности. При работе очистителей не должны формироваться бесформенные куски шихты и возникать затруднения при перекаате зародышей.

По технической схеме *в* деление напыленного слоя на зародыши осуществляется вращающимся барабаном с ребрами, аналогичным схеме *б*. Отличие заключается в том, что деление НС происходит на выходе из нисходящего слоя материалов на более удаленном расстоянии от нижней части холостой зоны тарели [2]. Нахождение НС под давлением слоя восходящих материалов в рабочей зоне окомкователя позволяет повысить прочность зародышей и выровнять плотность НС по его длине. Поэтому протяженность пути зародышей по этой схеме существенно возрастает до $L/D = 0,8 - 1,0$. Перекаат зародышей и ударное взаимодействие на

этом расстоянии способствуют более интенсивному смятию их углов и ребер и обеспечивают значение параметра $K_{см}$ до 0,74. Это единственная экспериментальная схема, построенная без привлечения дополнительных конструктивных элементов и имеющая максимальное значение L/D и минимальную величину $K_{см}$.

По схеме z деление напыленного слоя на зародыши осуществляется аналогично схеме b , но НС перед делением целенаправленно переувлажняют до $(1,05 - 1,10) W_{ш}$, где $W_{ш}$ – влажность загружаемой шихты, %. Поэтому образующиеся зародыши более пластичные и в большей степени сминаемы до $K_{см}=0,79$. Повышенная влажность зародышей также способствует эффективному доокомкованию шихтовой мелочи и получению более высокого значения ВГ. Можно прогнозировать, что комбинация позиций b и z может дать максимальный эффект по коэффициенту смятия и снизить его значение ориентировочно до 0,6 – 0,7. Выход годного может превысить 95 %. К недостаткам указанной схемы возможно отнести избыточное содержание влаги в зародышах, что может создать дополнительные трудности при последующей термической обработке.

Увлажнение ШГ до влажности $W_{ш} = (0,9 - 1,1) W_{ш}$ (схема d) способствует более эффективному сцеплению НС с ШГ и повышению степени напыления шихты. Поэтому в процессе принудительного зародышеобразования эта технологическая операция направлена преимущественно на повышение эффективности напыления шихты на движущийся шихтовый гарнисаж [2]. На процесс деления НС на зародыши она практически не влияет. Поэтому все параметры (ВГ = 93 %, $K_{см} = 0,91$) близки к параметрам, полученным при реализации схемы b . К недостаткам можно отнести возможность диффузии влаги из ШГ в напыленный слой, что также может усложнить процесс последующей термической сушки.

На бортовом шихтовом гарнисаже окомкователя согласно технологической схеме e выполнены продольные волнообразные каналы, которые в момент удара зародышей о борта способствуют мягкому смятию углов зародышей и снижению значений $K_{см}$ до 0,90. Эта технологическая схема отличается простотой, отсутствием вращающихся частей и минимальным налипанием шихты на элементы конструкции. Недостатком ее является необходимость выполнения волнообразных каналов малого диаметра (20 – 25 мм) на поверхности шихтового гарнисажа.

Установка массивного пригруза (лента, нагруженная влажной шихтой) на поверхности

перекатывающихся зародышей в рабочей зоне окомкователя по схемам $ж$ и $з$ является достаточно простым и эффективным мероприятием [2]. По схеме $ж$ на слое зародышей установлена гладкая эластичная лента, изготовленная из резины или ткани. По схеме $з$ поверхность ленты дополнительно снабжена пластмассовой ячейковой решеткой, увеличивающей массу пригруза и усиливающей пластическую деформацию зародышей, позволяющей снизить параметр $K_{см}$ до 0,77. Выход годного снижается до 73 % за счет частичного захвата шихты ячейками пригруза. К недостатку этой схемы можно отнести некоторое ограничение визуализации процесса окомкования и снижение контроля над технологическим процессом окомкования.

Переувлажнение образующихся зародышей в зоне зародышеобразования до $W_{зр} = (1,05 - 1,15) W_{ш}$ увеличивает их пластичность аналогично схеме z , что позволяет достичь относительно низкого значения $K_{см} = 0,78$. Эта схема также близка по сложности схеме z , по параметру L/D и относится к наиболее эффективной по выходу годного, но имеет тот же недостаток.

Можно отметить, что технически простые схемы a , e , направленные на регулирование пластической деформации зародышей, менее эффективны, чем более сложные. Применение технологически более сложных схем на практике позволяет получить коэффициент смятия в пределах значений 0,74 – 0,91, а выход годного обеспечить на уровне 73 – 94 %. Комбинация схем b , z и b , $и$ позволяет прогнозировать снижение параметра $K_{см}$ до 0,6 – 0,7. Но в этом случае теряются преимущества технологии получения окатышей с пониженным содержанием влаги в зародышевом центре.

Общим недостатком проанализированных технических схем является трудность согласования режима зародышеобразования, осуществляемого в холостой зоне тарели окомкователя, и технологического режима переката, реализуемого в рабочей области тарели окомкователя, на одном технологическом агрегате. Эта трудность заключается в том, что после процесса зародышеобразования зародыш представляет собой недеформированный брикет правильной кубической формы. Если условно предположить, что после переката зародышей в холостой зоне тарели он не деформируется, то для обеспечения переката зародышей такой формы в рабочей зоне окомкователя минимальным углом наклона днища тарели к горизонту является угол в 45 градусов. Как было показано выше, в реальном процессе переката зародышей в холостой зоне та-

рели в нижнюю часть днища тарели происходит деформация углов и ребер зародышей. В результате этого меняется степень деформации зародыша, и он становится более округлым. Вследствие этого изменяются условия доокомкования зародышей до окатышей в режиме переката в рабочей зоне тарели, поскольку минимальное значение угла наклона днища тарели к горизонту становится еще меньше. При этом коэффициент смятия зародышей в холостой зоне тарели почти не меняется, уменьшаясь от единицы до некоторого определенного значения (см. таблицу), не превышающего 0,74 – 0,92. Среднее значение $K_{см}$ составляет 0,87 – 0,96. В рабочей зоне окомкователя, напротив, происходит резкое падение значений $K_{см}$ от 0,74 – 0,92 до нуля. Среднее значение $K_{см}$ составляет 0,37 – 0,46. Это значит, что, назначая угол $\gamma = \gamma_k$ по условиям параметра $K_{см}$, сформированного в рабочей зоне окомкователя, мы заведомо усложняем режим транспортировки и деформирования зародышей в холостой зоне окомкователя. Наиболее простым решением является выравнивание условий деформирования и формообразования в этих зонах. Необходимо добиться техническими мероприятиями выравнивания значений коэффициентов $K_{см}$ в этих зонах. Наиболее действенным решением является искусственная деформация зародышей в холостой зоне тарели, желательна совмещенная с приростом массы.

Известно много решений, направленных на привлечение сопутствующих технологических операций (напыление, деление, очистка) к формообразованию шихты [2]. Следует признать, что они, зачастую, технически сложны. Возможно комбинированное решение задачи, в которой задаются благоприятные условия зародышеобразования по углу γ с использованием полученного коэффициента $K_{см}$ в холостой зоне окомкователя, ограничивая при этом режим переката в зоне, занятой шихтовыми материалами. Для выравнивания условий формообразования в этом случае целесообразно использовать дополнительные управляющие воздействия в рабочей зоне окомкователя: частоту вращения тарели, влажность шихты и гарнисажа, механические активаторы шихты и др. Используя принцип выравнивания условий деформирования в разных зонах окомкователя можно применять частичную деформацию зародышей механическим ускорением при перекате в холостой зоне окомкователя и другие инженерные решения. Ускоренный перекаат зародышей позволяет в свою очередь повысить скорость упрочнения и роста массы окатышей.

Выводы. Проанализированы технические схемы, позволяющие управлять пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании. Получены опытные данные и результаты наблюдений, необходимые для сравнения и подбора оптимального технического решения. Проведена оценка конструктивных и технологических преимуществ каждой схемы. Предложены механизмы выравнивания условий формообразования шихты в разных зонах окомкователя и методы сближения условий деформирования зародышей, позволяющие интенсифицировать перекаат материалов и рост массы зародышей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии : учебное пособие для вузов. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.
4. Газоочистные устройства сталеплавильных агрегатов и утилизация промышленных отходов : учебное пособие для вузов / Е.В. Протопопов, Ю.И. Дерин, Е.П. Волынкина, С.Г. Коротков – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2005. – 96 с.
5. Павловец В.М., Герасимук А.В. Особенности движения зародыша сложной формы на тарели окомкователя в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2017. Вып. 37. С. 15 – 24.
6. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 9 – 13.
7. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
8. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин,

Н.Ф. Пашков, П.К. Антоненко, Р.М. Жак. – М.: Metallurgy, 1994. – 240 с.

9. Ручкин И.Е. Производство железорудных окатышей. – М.: Metallurgy, 1976. – 184 с.

10. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Metallurgy, 1982. – 232 с.

11. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Metallurgy, 1966. – 152 с.

© 2017 г. В.М. Павловец
Поступила 8 ноября 2017 г.