



УДК 669.162.12:622

DOI 10.17073/0368-0797-2023-5-529-537



Оригинальная статья

Original article

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ОКОМКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ

В. М. Павловец

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

pawlowets.victor@yandex.ru

Аннотация. Новые возможности процесса окомкования в производстве окатышей позволяют улучшить производственные показатели.

Принципы принудительного зародышеобразования в технике окомкования расширяют его технологические возможности. Технические показатели новой технологии производства окатышей и физические параметры влажных окатышей позволяют повысить металлургические свойства окучкованного сырья. Представленные технические схемы отражают производственные возможности принудительного зародышеобразования в процессах формирования напыленного слоя (НС) шихты и его деления различными техническими устройствами. Конструктивные особенности и технологические режимы разработанных технических схем реализованы на типичном тарельчатом окомкователе. Опытные данные, полученные при реализации разработанных технологических схем, позволяют изменять относительные величины прочности, массы и влажности окатышей в ходе окомкования железорудной шихты. Эти параметры можно регулировать в ходе загрузки шихты, ее напыления на шихтовый гарнисаж окомкователя, деления напыленного слоя шихты на зародыши и доокомкования зародышей с формированием оболочки окатышей. Оценка указанных технологических схем привела к выбору наиболее эффективных решений, основанных на теплосиловом напылении влажной шихты с учетом процесса ее налипания, материалоемкости и сложности конструктивного оформления оборудования. Для практического использования рекомендована комбинированная технологическая схема получения окатышей по технологии принудительного зародышеобразования на основе формирования НС одиночной воздушно-шихтовой струей, содержащей упрочняющие добавки, на предварительно профилированный гарнисаж и деления НС на зародыши коническим барабаном, снабженным металлической струной. В конце технологического цикла производства окатышей в центральной зародышевой части окатышей формируется повышенная пористость с высокой долей открытых пор. Окатыши обладают пониженной влажностью ($\Theta_{\text{в}} = 0,97$) и благоприятной поровой структурой. В прогнозе они требуют меньших энергозатрат на их последующую термообработку. Технология позволяет выпускать окатыши необходимой и максимальной прочности размером 12 – 16 мм с более высокой производственностью. В ходе экспериментов установлено, что технология предварительного зародышеобразования обладает высокой надежностью и универсальностью, легко внедряется в действующее производство.

Ключевые слова: железорудное сырье, техника и технология окомкования, окучкованное металлургическое сырье, железорудные окатыши, теплосиловое напыление влажной шихты, принудительное зародышеобразование

Для цитирования: Павловец В.М. Особенности развития техники и технологии окомкования железорудной шихты в производстве окатышей. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(5):529–537. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-529-537>

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT AND TECHNOLOGY FOR PELLETIZING IRON ORE CHARGE IN PRODUCTION OF PELLETS

V. M. Pavlovets

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

pawlowets.victor@yandex.ru

Abstract. New possibilities of pelletizing process in pellet production can improve the production performance. The principles of induced nucleation in the pelletizing technique expand its technological capabilities. The technical indicators of the new pellet production technology and the physical parameters of wet pellets make it possible to increase the metallurgical properties of agglomerated raw materials. The presented technical diagrams reflect the production capabilities of induced nucleation in the processes of forming a sprayed layer (SL) of the charge and its division by various technical devices. The design features and technological modes of the developed technical schemes are implemented on a typical disc pelletizer. Experimental data obtained during implementation of the developed technological schemes make it possible to change the relative values of strength, mass and moisture content of the pellets during pelletizing of the iron ore charge. These parameters can be adjusted during loading of charge, its spraying onto the charge shell of the pelletizer, dividing the sprayed layer of the charge into nuclei and further pelletizing of the nuclei to form a pellet shell. An assessment of these technological schemes led to selection of the most effective solutions based on thermal power spraying of wet

charge, taking into account its adhesion, material consumption and complexity of the equipment design. For practical use, we recommend a combined technological scheme for the production of pellets using the induced nucleation technology on the basis of SL formation of a single air-charge jet (ACJ) containing strengthening additives, on a pre-profiled skull and dividing the SL into nuclei by a conical drum equipped with a metal string. At the end of the technological cycle of pellet production, increased porosity with a high proportion of open pores is formed in the central embryonic part of the pellets. The pellets have a low moisture content ($\Theta_{\text{в}} = 0.97$) and a favorable pore structure. In the forecast, they require less energy consumption for their subsequent heat treatment. The technology makes it possible to produce pellets with the required and maximum strength ($\Theta_{\text{п}} \geq 1.0$) 12 – 16 mm in size with higher productivity ($\Theta_{\text{м}} = 0.68$). In the course of experiments, it was found that the technology of preliminary nucleation has high reliability and versatility, and it can be easily introduced into the existing production.

Keywords: iron ore raw materials, equipment and technology of pelletizing, agglomerated metallurgical raw materials, iron ore pellets, thermal power spraying of wet charge, induced nucleation

For citation: Pavlovets V.M. Development of equipment and technology for pelletizing iron ore charge in production of pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):529–537. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-529-537>

ВВЕДЕНИЕ

Окомкование железорудной шихты в производстве окатышей является начальной стадией окускования железорудного сырья, которое позволяет осуществить формообразование влажной сыпучей массы, ее первичное структурообразование и упрочнение [1; 2]. Задачей окомкования является получение округлой формы у окатышей и формирование максимально возможной прочности, позволяющей выполнять последующие транспортные и термические операции с окатышами без разупрочнения. Процесс формообразования влажной шихты в производстве окатышей начинается с зародышеобразования и заканчивается доокомкованием зародышей. В традиционной технологии производства окатышей воздействовать на процесс зародышеобразования существующими техническими средствами без привлечения вспомогательных физических полей достаточно трудно [3]. В последнее время предлагается расширить функциональные возможности участка окомкования с помощью теплосилового напыления влажной шихты на гарнисаж окомкователя, придав ему дополнительные формо- и структурообразующие функции в производстве окатышей [4; 5]. Данная технология принудительного зародышеобразования напылением и доокомкованием (ЗНД) зародышей позволяет существенно изменить процессы зародышеобразования и окомкования железорудной шихты. Она обладает широким набором инструментария для воздействия на структурные свойства окатышей и производственные параметры окомкователя [4 – 6]. Согласно этой технологии, на первом этапе получения сырых окатышей в холостой зоне вращающегося тарельчатого окомкователя проводят формирование плотного напыленного слоя (НС) шихты воздушно-шихтовой струей (ВШС). Для получения зародышевой массы в этой же зоне окомкователя НС механически делят на прочные зародыши, имеющие форму, близкую к сферокубу или сферопараллелепипеду. На последующем этапе формообразования в рабочей зоне окомкователя, занятой комкуемыми материалами, у зародышей сминаются углы, грани и формируется округлая форма. Одновременно с этим происходит доокомкование зародышей в смеси с увлажненной

шихтой в режиме переката и формируется оболочка окатышей [6 – 8]. Центральная часть двухслойных окатышей имеет пониженную влажность и в ней формируется более высокая пористость с повышенной долей открытых пор. Низкая влажность сырых окатышей с подобным характером пористости исключает трещинообразование и резко снижает температуру шокового разрушения при сушке [4; 5], что у обожженных окатышей уменьшает вероятность снижения прочности при последующем металлургическом переделе. Структура окатышей после высокотемпературного обжига также сохраняет повышенное количество проникаемых пор, открытых для восстановительных газов [5]. Такое структурное построение окатышей позволяет снизить диффузионные ограничения при последующем восстановлении и повысить реакционную способность окускованного сырья. Подобное формирование структурных свойств окатышей можно получить с помощью порообразующей биомассы [7; 8] или вспомогательных технологий [9 – 11]. Схематичное представление технологии ЗНД и макроструктуры материалов, участвующих в формообразовании влажной шихты, показаны на рис. 1, 2. Технологическая схема производства достаточно легко может быть реализована на действующем производстве, для чего существуют свободные производственные площади и технические возможности. На основе технологии ЗНД разработаны многочисленные технические решения [4; 5], позволяющие управлять процессами формирования зародышей и окатышей и их физическими свойствами, анализ технологической работы которых дает возможность сформулировать общие принципы зародышеобразования и структурообразования комкуемой массы для этой технологии.

Целью работы является анализ технических решений, направленных на развитие техники и технологии окомкования железорудной шихты в производстве окатышей, основанном на принудительном зародышеобразовании.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Технические схемы устройств для получения окатышей, включающих различные способы формиро-

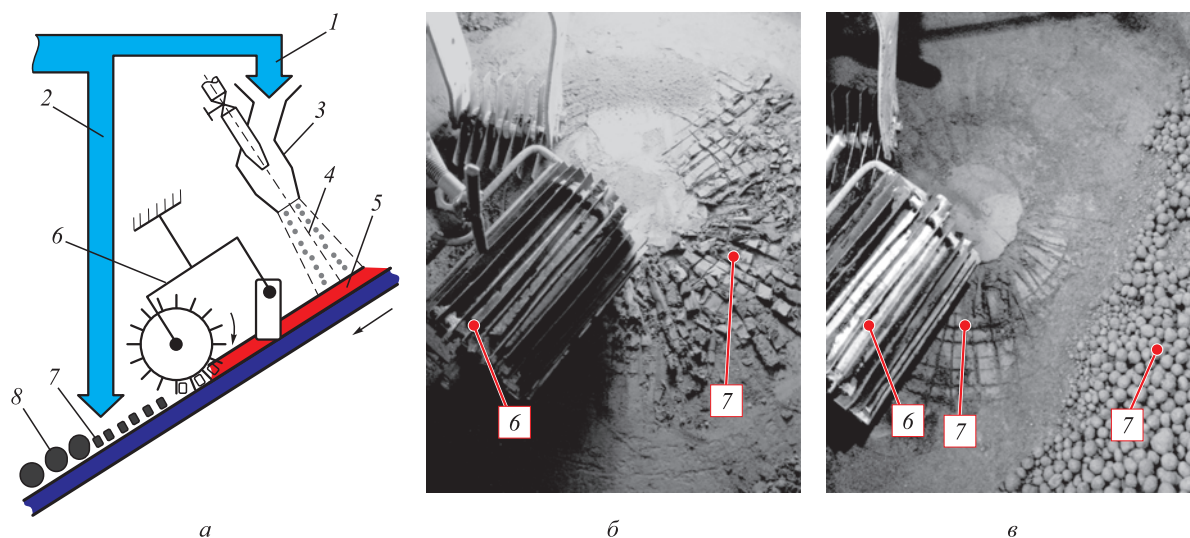


Рис. 1. Схема формообразования влажной шихты в зародыши и окатыши (а) и внешний вид экспериментальной установки на основе тарельчатого окомкователя для получения окатышей по технологии ЗНД (б, в):
1 – поток шихты для зародышеобразования; 2 – тоже для доокомкования зародышей; 3 – струйный аппарат; 4 – воздушно-шихтовая струя; 5 – напыленный слой шихты; 6 – делитель НС, состоящий из продольного (пластинчатые ножи) и поперечного (вращающийся барабан с ребрами) делителей; 7 – зародыши; 8 – окатыши

Fig. 1. Scheme of wet charge forming into nuclei and pellets (a) and appearance of experimental installation based on a disk pelletizer for producing pellets using the NSF technology (nucleation by spraying and final pelletizing of nuclei – б, в):
1 – charge flow for nucleation; 2 – charge flow for the final pelletizing of nucleus; 3 – jet unit; 4 – air-charge jet; 5 – sprayed charge layer; 6 – SL divider, consisting of longitudinal (lamellar knives) and transverse (rotating drum with edges) dividers; 7 – nucleus; 8 – pellets

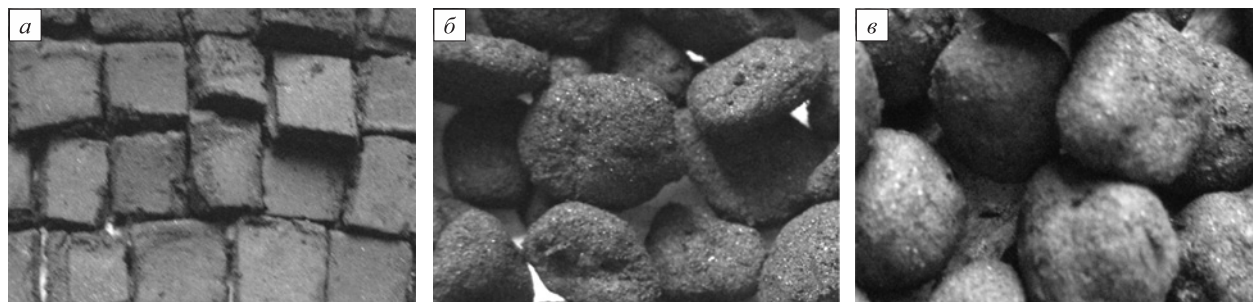


Рис. 2. Внешний вид шихтовых материалов и последовательность формирования окатышей из зародышей по технологии ЗНД:
а – фрагмент НС, разделенного на зародыши; б и в – зародыши через 60 и 300 с после доокомкования соответственно

Fig. 2. Appearance of charge materials and sequence of pellets formation from nuclei using NSF technology:
а – fragment of SL divided into nuclei; б – nucleus 60 s after final pelletizing; в – nucleus 300 s after final pelletizing

вания НС методом напыления влажной шихты на гарнисаж, показаны на рис. 3. Перспективные схемы деления НС на зародыши в этих устройствах представлены на рис. 4. На указанные технические схемы (рис. 3, 4) автором получены патенты РФ. В качестве базового устройства, на котором реализованы технические схемы для получения окатышей, использовали лабораторный полупромышленный тарельчатый окомкователь (диаметр 0,62 м, угол наклона тарели $\gamma = 45^\circ$, число оборотов $n = 12$ об/мин), снабженный струйным аппаратом (СА) (диаметр $d_{\text{СА}} = 0,02$ м, расход шихты $G_{\text{ш}} = 0,03 - 0,04$ кг/с, давление $P_{\text{в}} = 0,2$ МПа, расход сжатого воздуха $V_{\text{в}} = 0,6$ м³/мин) и устройствами различной конструкции для деления НС на зародыши. Для реализации многоструйных технических

схем использовали три СА диаметром 0,02 м при том же расходе шихты и первоначальных условиях. Окомкователь работал на влажной шихте, состоящей из железорудного концентрата Тейского месторождения ($d_{\text{ч}} = 0,068$ мм) и 1 % бентонита. Шихта массой 5 кг напылялась в течение 60 с на шихтовый гарнисаж (ШГ) толщиной 30 мм ($\rho_{\text{шг}} = 2230$ кг/м³, $W_{\text{шг}} = 8,14$ %) в холостой зоне тарели при $\Theta_L = 25$ ($\Theta_L = L/d_{\text{СА}}$ – безразмерное расстояние, $L = 0,5$ м). Для доокомкования зародышей и формирования кондиционных окатышей в рабочую зону окомкователя дополнительно подавали 5 кг влажной шихты. Для всех сформированных материалов определяли среднюю прочность и влажность. У НС измеряли его размеры (диаметр $d_{\text{НС}}$, м и высоту НС на его оси h_0 , м). Зародышевую массу и массив окатышей

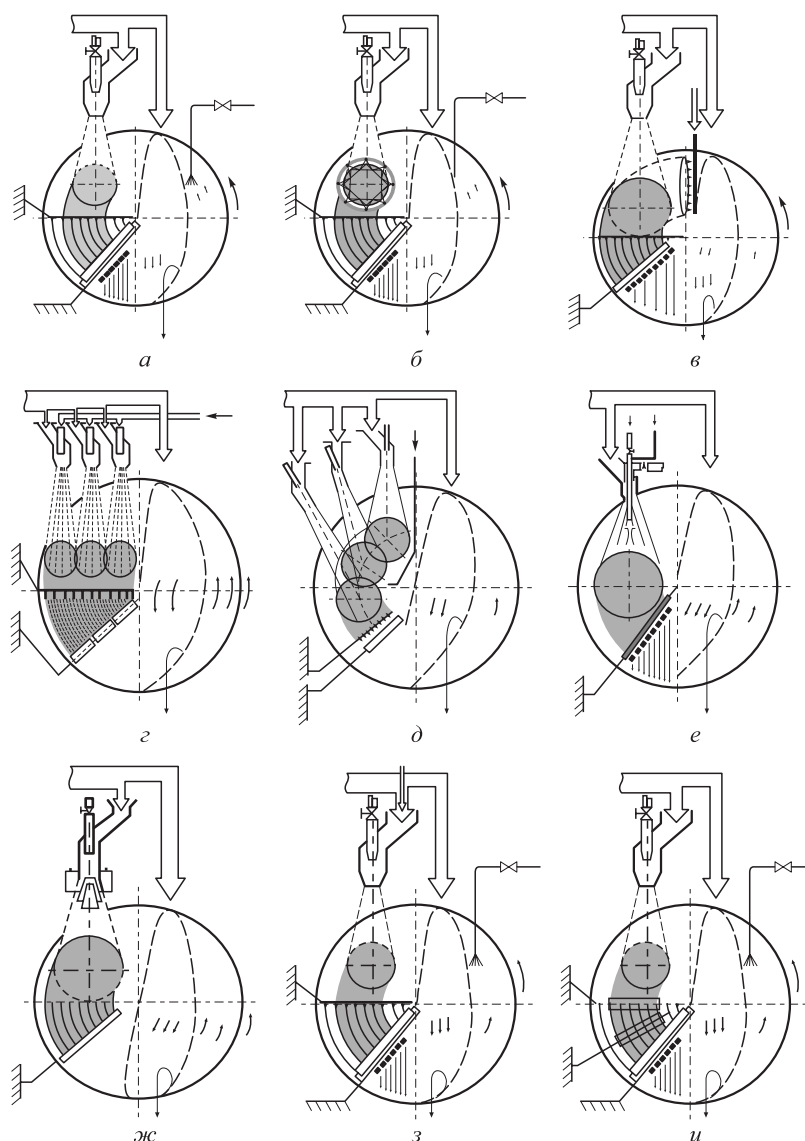


Рис. 3. Технические схемы формирования НС на гарнисаже окомкователя:

a – одной ВШС; *б* – тоже с увлажнением зоны напыления; *в* – увлажнение ШГ; *г* – несколькими ВШС с наложением НС по радиусу; *д* – тоже с наложением НС по дуге; *е* – одной ВШС с вспомогательным потоком воздуха; *жс* – одной ВШС с отклоняющими насадками на пути ВШС; *з* – одной ВШС с упрочняющими добавками в шихте; *и* – дополнительное уплотнение НС барабанами

Fig. 3. Technical schemes of SL formation on pelletizer skull:

a – one ACJ; *б* – the same with moistening of the deposition zone; *в* – moistening of the charge skull (CS); *г* – several ACJ with superposition of SL along the radius; *д* – the same with superposition of SL along an arc; *е* – one ACJ with auxiliary air flow; *жс* – one ACJ with deflecting nozzles on the path of ACJ; *з* – one ACJ with hardening additives in the charge; *и* – additional compaction of SL with drums

рассеивали на ситах. Методика отбора проб подробно изложена в работах [4; 5].

Для технических схем, реализующих различные способы формирования НС (рис. 3), определяли коэффициент напыления $K_{НС}$, %:

$$K_{НС} = \frac{M_{ш} - M_{м}}{M_{ш}},$$

где $M_{ш}$ – масса напыляемой шихты, кг; $M_{м}$ – масса шихты, оставшейся после формирования НС, кг.

Для технических схем, реализующих различные способы деления НС на зародыши (рис. 4), определяли

фракционный состав зародышевой массы и коэффициент зародышеобразования $K_{зр}$, %:

$$K_{зр} = \frac{M_{зр}}{M_{ш}} = \frac{M_{ш} - M_{м} - M_{н}}{M_{ш}},$$

где $M_{зр}$ – масса зародышей размером 2 – 10 мм, кг; $M_{н}$ – масса зародышевой мелочи размером менее 2 мм, кг.

Для каждой технической схемы выполнено несколько экспериментов, что позволило получить среднее значение анализируемых величин. Для расширения объема информации при оценке эффективности технологии ЗНД и свойств НС, зародышей и окатышей

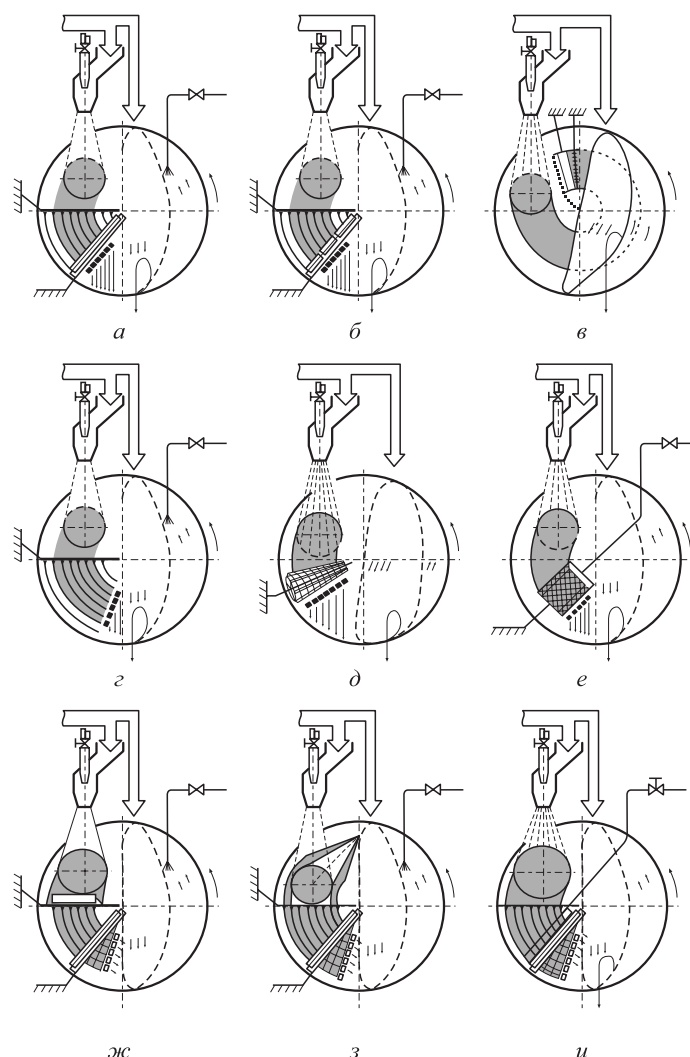


Рис. 4. Технические схемы деления напыленного слоя шихты на зародыши на гарнисаже окомкователя:

a – продольными пластинчатыми ножами и барабаном с поперечными ребрами; *б* – тоже с составными вращающимися барабанами; *в* – деление НС продольными пластинчатыми ножами и вращающимся барабаном с поперечными ребрами на выходе из слоя комкуемых материалов; *г* – плужковыми делителями; *д* – коническим барабаном, снабженным металлическими струнами; *е* – барабаном, снабженным ребрами с полукруглыми ячейками; *ж* – с профилированием НС по ширине и высоте; *з* – с профилированием ШГ; *и* – барабаном с поперечными ребрами и системой стержней

Fig. 4. Technical schemes of charge SL division into nuclei on pelletizer skull with:

a – longitudinal plate knives and drum with transverse ribs; *б* – the same with composite rotating drums; *в* – division of SL by longitudinal plate knives and rotating drum with transverse ribs at outlet from lumpy materials layer; *г* – plow dividers; *д* – conical drum equipped with metal strings; *е* – drum equipped with ribs with semicircular cells; *ж* – SL profiling in width and height; *з* – CS profiling; *и* – drum with transverse ribs and system of rods

часть результатов опытов была представлена в безразмерном виде [4; 5]. Относительную прочность сформованных материалов Θ_{Π} определяли по выражению

$$\Theta_{\Pi} = \frac{\Pi_{\text{ср}}}{\Pi_{\text{ок}}},$$

где $\Pi_{\text{ср}}$ – средняя прочность образцов НС, зародышей и окатышей, кПа; $\Pi_{\text{ок}}$ – средняя прочность окатышей размером 12 – 16 мм, кПа; $\Pi_{\text{ок}} = 280$ кПа.

Относительную массу сформованных материалов (НС, зародышей и окатышей) Θ_M вычисляли по формуле

$$\Theta_M = \frac{M_M}{M_0},$$

где M_M – средняя масса сформованных материалов (НС, зародышей и окатышей), кг; M_0 – общая массы шихты, используемой для получения окатышей, включая подачу шихты на доокомкование зародышей в рабочую зону окомкователя, кг, $M_0 = 10$ кг.

Относительную влажность сформованных материалов Θ_W определяли по выражению

$$\Theta_W = \frac{W_{\text{ср}}}{W_{\text{ш}}},$$

где $W_{\text{ср}}$ – средняя влажность образцов НС, зародышей и окатышей, %; $W_{\text{ш}}$ – влажность напыляемой шихты, %; $W_{\text{ш}} = 8,2\%$.

Относительную длительность процессов загрузки, напыления шихты, деления НС и доокомкования зародышей Θ_{τ} определяли по выражению

$$\Theta_{\tau} = \frac{\tau_i}{\tau_{\text{ок}}},$$

где τ_i – длительность процессов загрузки, напыления шихты, деления НС и доокомкования зародышей, с, длительности напыления, деления и доокомкования составляли 15, 5 и 300 с соответственно; $\tau_{\text{ок}}$ – общая длительность процесса формирования окатышей, с, $\tau_{\text{ок}} = 380$ с.

Для определения характеристик НС ($K_{\text{НС}}$, Θ_M , Θ_{Π} , Θ_W), полученного в различных способах его формирования (рис. 3), окомкователь работал без делителей в течение всего времени напыления. Для сравнительного анализа показателей этих технических схем использовали базовую схему для сравнения (рис. 3, а), которая опиралась на работу одиночного СА, напыляющего влажную шихту на неподготовленный ШГ. Следует добавить, что в большинстве промышленных технологий на основе напыления к устройствам и технологиям напыления предъявляются многочисленные требования по эффективности их работы [12 – 15].

Для расчета параметров зародышевой массы (фракционный состав, $K_{\text{зр}}$, Θ_M , Θ_{Π} , Θ_W), полученной в устройстве, реализующем различные способы деления НС на зародыши (рис. 4), после формирования НС на окомкователе работал делитель НС. Для сравнительного анализа показателей этих технических схем использовали базовую схему (рис. 1 и 3, а), которая дополнительно была снабжена делителем, состоящим из продольного (система пластинчатых ножей) и поперечного (вращающийся барабан с ребрами) делителей, покрытых баке-

литовым лаком в качестве покрытия, препятствующего налипанию шихты (рис. 4, а).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типичное изменение параметров Θ_M , Θ_{Π} , Θ_W в процессе формообразования шихты (напыление шихты с образованием НС и его деления на зародыши) и формирования окатышей для базовой схемы напыления (рис. 3, а и 4, а) приведено на рис. 5. Результаты экспериментов представлены в табл. 1, 2. Полученные зависимости (рис. 5) позволяют обобщить результаты исследований и выявить узкие места в технологии ЗНД. Общим для всех технических схем (табл. 1, 2) является быстрое формообразование влажной шихты со средней скоростью роста массы зародышей более 3,0 г/с, сопровождаемое ростом прочности ($\Theta_{\Pi} > 0,39$) и незначительной потерей массы сформованных материалов в процессе напыления шихты (до $\Theta_M = 0,44$) и деления НС (до $\Theta_M = 0,29$) на зародыши (рис. 5). Напылением шихты можно сформировать прочность НС, близкую к прочности всего окатыша ($\Theta_{\Pi} > 0,8 - 0,9$) [4; 5], но в таком режиме снижается пористость и доля открытых пор в зародышевой части окатыша, что противоречит принципам структурообразования технологии ЗНД. Незначительный рост прочности зародышей при делении НС объясняется механическим уплотнением влажной массы делителями или вспомогательными устройствами. В процессе доокомкования зародышей происходит рост массы и прочности окатышей за счет формирования оболочки в режиме переката. Процесс обезвоживания НС связан с бародиффузионным переносом влаги ВШС, в которую при напылении попадает НС и зародышевая масса. Процесс доокомкования зародышей

Таблица 1

Показатели технических схем, реализующих различные способы формирования НС

Table 1. Indicators of technical schemes that implement various methods of SL formation

Схема на рис. 3	Показатели					
	$K_{\text{НС}}$	$d_{\text{НС}} / d_{\text{СА}}$	$d_{\text{НС}} / h_o$	Θ_M	Θ_{Π}	Θ_W
а	0,88	10,5	20,5	0,44	0,39	0,96
б	0,95	11,5	21,5	0,46	0,41	0,99
в	0,92	11,5	21,5	0,46	0,42	0,97
г	0,92	29,0	94,0	0,46	0,40	0,96
д	0,91	11,5	21,5	0,46	0,45	0,94
е	0,88	14,5	59,0	0,43	0,36	0,96
ж	0,86	15,0	60,0	0,43	0,35	0,96
з	0,86	10,5	20,5	0,45	0,48	0,96
и	0,88	11,5	23,5	0,44	0,45	0,95

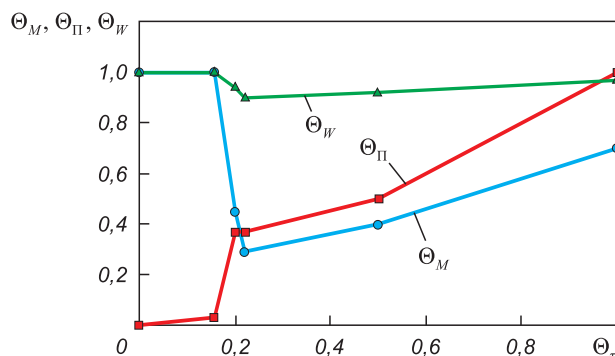


Рис. 5. Кинетика изменения относительной прочности Θ_{Π} , массы Θ_M и влажности Θ_W материалов в процессе формообразования шихты и формирования окатышей

Fig. 5. Kinetics of changes in relative strength Θ_{Π} , mass Θ_M and moisture content Θ_W of materials during charge forming and pellets formation

Показатели технических схем, реализующих различные способы деления НС на зародыши

Table 2. Indicators of technical schemes that implement various methods of SL division into nuclei

Схема на рис. 4	Показатели								
	фракционный состав зародышей, мм					$A_{зр}$, мм	$K_{зр}$	Θ_M	Θ_{II}
	0 – 2	2 – 4	4 – 6	6 – 10	>10				
<i>a</i>	34,1	18,8	18,2	28,1	0,8	4,34	0,58	0,29	0,42
<i>б</i>	32,5	18,5	20,2	28,4	0,4	4,21	0,61	0,30	0,42
<i>в</i>	33,2	19,5	20,5	26,2	0,6	4,09	0,61	0,30	0,51
<i>г</i>	43,4	22,6	15,4	10,4	8,2	2,71	0,45	0,22	0,41
<i>д</i>	26,1	18,6	24,6	30,2	0,5	4,51	0,69	0,35	0,43
<i>е</i>	25,4	19,3	25,4	29,9	0	4,49	0,58	0,29	0,42
<i>ж</i>	15,2	21,3	30,6	32,9	0	5,67	0,62	0,31	0,42
<i>з</i>	12,3	22,2	31,9	33,6	0	6,22	0,67	0,38	0,42
<i>и</i>	32,1	19,8	20,2	26,1	0,8	4,15	0,58	0,29	0,38

дышей сопровождается ростом параметров Θ_M , Θ_{II} , Θ_W , имеет несколько стадий и протекает в течение значительно большего времени (300 с), что существенно снижает скорость роста массы (до 0,11 г/с) и прочности [4; 5]. Рост влажности формуемых окатышей при доокомковании зародышей происходит за счет переувлажнения оболочки окатышей. На заключительном этапе производства окатышей для большинства технических схем, реализующих технологию ЗНД, формируется максимальное количество окатышей размером 12 – 16 мм ($\Theta_M > 0,7$) со средней скоростью роста массы (более 0,3 г/с), необходимой прочности ($\Theta_{II} = 1,0$) с пониженным количеством влаги в их структуре ($\Theta_W < 1$). В центральной зародышевой части окатышей это снижение еще больше ($\Theta_W < 0,95$).

Целесообразно представить краткий анализ работоспособности рассмотренных технических схем. Схема, представленная на рис. 3, б, отличается от базовой интенсивным увлажнением зоны напыления и поверхности НС, что позволяет повысить $K_{НС}$ до 0,95, увеличить геометрические размеры НС и параметры Θ_M , Θ_{II} , Θ_W (табл. 1). Однако переувлажнение НС до $W_{НС} = 0,99W_{ш}$ и, соответственно, зародышей и годных окатышей, увеличивает продолжительность последующей сушки окатышей на стадии термообработки. Близкие характеристики НС формирует схема, показанная на рис. 3, в, которая отличается от базового решения предварительным увлажнением ШГ перед напылением. Схема, показанная на рис. 3, г, позволяет увеличить поперечные размеры и сформировать постоянную толщину НС за счет наложения друг на друга граничных ($\delta = 1,0 - 0,8$, где δ – безразмерный радиус НС) зон НС, обладающих высокой пористостью и низкой прочностью. Подобное воздействие на процесс напыления представлено в источниках [16 – 20], где регулирова-

ние расхода дисперсной фазы в СА увязано с изменением скорости вращения напыляемой основы. Схема, показанная на рис. 3, д, более сложная по конструкции и отличается от базовой последовательным напылением шихты тремя СА, что увеличивает продольную площадь напыления и ориентировочно в три раза длительность силового воздействия ВШС на НС. Это повышает прочность НС примерно на 10 – 15 %, интенсифицирует влагоудаление из НС, оставляя уровень показателей Θ_M , Θ_W близким к базовой схеме. Схема, приведенная на рис. 3, е, направлена на повышение равномерности толщины НС одним СА, работающим на вспомогательном вентиляторном воздухе, подаваемом по оси СА. К достоинствам этой схемы относится увеличение геометрических размеров НС из-за возрастания угла раскрытия струи до 30°, а к недостаткам – более низкие прочностные свойства НС вследствие снижения давления ВШС. Схема, приведенная на рис. 3, ж, снабжена отклоняющими механическими устройствами, расположенными на пути ВШС. Она имеет аналогичные недостатки и позволяет получить НС с характеристиками, близкими предыдущей схеме. Показанная на рис. 3, з схема отличается от базовой возможностью подачи в ВШС вспомогательных материалов (упрочняющих, вяжущих, труднокомкуемых и структурообразующих добавок). При введении в напыляемую шихту сравнительно небольшого (до 1 – 2 %) количества добавок (например, водного раствора жидкого стекла) прочность НС можно повысить на 10 – 15 % [4; 5]. Схема, показанная на рис. 3, и, кроме давления ВШС использует дополнительную упрочняющую и профилирующую (выравнивающую по высоте) нагрузку, формируемую вращающимися барабанами, установленными на поверхности НС перед его делением. Она позволяет повысить прочность НС и равномерность его

геометрических размеров, но технически более сложная и отличается повышенной налипаемостью шихты на металлические барабаны.

Схема деления НС на зародыши, приведенная на рис. 4, б, отличается от базовой наличием составных барабанов, позволяющих учесть различие в окружных скоростях НС, что облегчает деление НС большого диаметра и приводит к повышению прочности зародышей на 5 % и снижению содержания мелочи до 33,2 % (табл. 2). Схема, показанная на рис. 4, в, позволяет использовать давление слоя собственных материалов большой высоты и массы, циркулирующих в рабочей зоне окомкователя, для упрочнения НС. Она дает возможность обеспечить его деление на выходе из слоя комкуемых материалов [4; 5], а также повысить (на 5 – 10 %) прочность зародышей при достаточно равномерном фракционном составе. Делитель окомкователя, представленный на рис. 4, г, позволяет разделять НС криволинейным плужковым делителем упрощенной конструкции. Такая схема дает возможность получать зародыши в широком диапазоне размеров, включая большое количество мелочи фракции 0 – 2 мм (43,4 %) и крупных кусков размером более 10 мм. В схеме, показанной на рис. 4, д, в качестве делителя НС используется тонкая металлическая струна, натянутая на конический барабан, которая одновременно выполняет функции продольного и поперечного деления НС и дает возможность существенно снизить усилия, прикладываемые к НС при его делении. Устройство характеризуется низкой налипаемостью массы, малой металлоемкостью и высокой технологичностью [4; 5]. Подобные устройства используют в керамической промышленности для деления формуемой массы. В схеме деления НС, приведенной на рис. 4, е, в качестве делителя используется цилиндрический барабан с волнообразными ребрами, позволяющими формировать из НС зародыши таблетированной формы. Повышенная налипаемость шихты в этой схеме устраняется интенсивным увлажнением ребер барабана перед делением НС на зародыши, что повышает их влажность. В схемах профилирования НС и ШГ, приведенных на рис. 4, ж, з, реализована возможность получения НС постоянной толщины, что значительно повышает равномерность фракционного состава и средний размер зародышей $A_{\text{зр}}$ до 6,22 мм. В схеме деления НС, приведенной на рис. 4, и, делитель снабжен системой стержней, формирующих особую структуру зародышей. Однако в данном случае прочностные показатели существенно ниже показателей базовой схемы.

Учитывая характеристики НС и зародышевой массы (Θ_M , Θ_{Π} , Θ_W , табл. 1, 2), полученные при реализации исследуемых технических схем, а также технологичность устройств (уровень налипаемости шихты, материалоемкость дополнительного оборудования, сложность конструктивного оформления, надежность и стабильность работы), для практического использования рекомендуется комбинированная технологическая схема

получения окатышей. Она включает технологию принудительного зародышеобразования ЗНД на основе формирования НС одиночной ВШС (рис. 3, а), позволяющей использовать упрочняющие добавки в напыляемой шихте (рис. 3, з). Напыление материала в этой схеме организуют на предварительно профилированный шихтовый гарнисаж (рис. 4, ж), а деление НС на зародыши выполняют коническим барабаном, снабженным металлической струной (рис. 4, д). Реализация технологии ЗНД на основе этих элементов позволяет получать окатыши с пониженной влажностью ($\Theta_W = 0,97$), ее рациональным распределением по сечению, необходимой и достаточной прочностью ($\Theta_{\Pi} \geq 1,0$), благоприятной поровой структурой и максимальным выходом окатышей размером 12 – 16 мм ($\Theta_M = 0,72$). В традиционной технологии зародышеобразования и окатыwania эти параметры существенно ниже ($\Theta_W = 1,1$, $\Theta_M = 0,33$) [4; 5]. По этим результатам можно прогнозировать более высокую производительность окомкователя, а при последующей термообработке окатыши потребуют меньших энергозатрат на термическую сушку.

Выводы

Проанализированы результаты исследований работоспособности технических схем на основе технологии ЗНД, позволяющих управлять процессом формирования зародышей и окатышей. Сформулированы общие принципы зародышеобразования и структурообразования комкуемой массы для этой технологии. Получено типичное изменение параметров Θ_M , Θ_{Π} , Θ_W в процессе формообразования шихты и формирования окатышей для базовых и ряда исследуемых технических схем. На основе показателей технологии ЗНД и технологичности процесса (уровень налипаемости шихты, материалоемкость дополнительного оборудования, сложность конструктивного оформления, надежность и стабильность работы) проведена оценка указанных технических схем и выбраны наиболее эффективные решения. Для практического использования рекомендована комбинированная схема получения окатышей по технологии ЗНД на основе формирования НС одиночной ВШС, позволяющей использовать упрочняющие добавки. Напыление материала в этой схеме организуют на предварительно профилированный шихтовый гарнисаж, а деление НС на зародыши выполняют коническим барабаном, снабженным металлической струной. Реализация технологии ЗНД на основе этих элементов позволяет получать окатыши с пониженной влажностью ($\Theta_W = 0,97$) с ее рациональным распределением по сечению, необходимой и достаточной прочностью ($\Theta_{\Pi} \geq 1,0$) и максимальным выходом окатышей размером 12 – 16 мм ($\Theta_M = 0,72$). По результатам исследований прогнозируются более высокая производительность окомкователя и меньшие энергозатраты на последующую термообработку окатышей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Павловец В.М. *Окатыши в технологии экстракции металлов из руд*. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия; 2022:284.
2. Абзалов В.М. и др. *Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей*. Екатеринбург: НПВП «ТОРЕКС»; 2012:340.
3. Юсфин Ю.С. и др. *Интенсификация производства и улучшение качества окатышей*. Москва: Металлургия; 1994:240.
4. Павловец В.М. *Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке*. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2023:328.
5. Павловец В.М. *Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии*. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия; 2022:336.
6. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009;52(6):9–13.
Pavlovets V.M. Study of thermal power modes of wet charge spraying intended for induced nucleation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009;52(6):9–13.
7. Iwase K., Higuchi T., Yamamoto T., Murakami T. Design for carbon core pellet toward co-production with sinter. *Tetsu-to-Hagane*. 2021;107(6):483–493.
<https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-080>
8. Kieush L., Boyko M., Koveria A., Yaholnyk M., Poliakova N. Production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2021;27(4):167–171.
<https://doi.org/10.36547/ams.27.4.1052>
9. Okeke 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):170–176.
<https://doi.org/10.4314/dai.v11i3.15549>
10. Frantes K. North American iron mines running flat out to meet domestic and worldwide demand. *Skillings' Mining Review*. 2005;94(7):6–21.
11. *Basics in Mineral Processing*. Metso: Outotec, 2015:752. Available at URL: https://www.metso.com/globalassets/insights/ebooks/mo-basics-in-mineral-processing-handbook_lowres.pdf
12. Goejen J.G., Miller R.A., Brindley W.J., Leissler G.W. *A simulation technique for predicting defects of thermal sprayed coatings: NASA Technical Memorandum TM-106939*, 1995.
13. Hansbo A., Nylén P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects. *Surface and Coatings Technology*. 1999;122(3-4):191–201.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00255-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00255-8)
14. Enszt M.T., Griffith M.L., Reckaway D.E. *Critical issues for functionally graded material deposition by laser engineered net shaping*. Available at URL: <http://edge.cs.drexel.edu/GICL/people/schroeder/references/mpif02me.pdf>
15. De Los Santos Valladares L., Domínguez A.B., Félix L.L., Kargin J.B., Mukhambetov D.G., Kozlovskiy A.L., Moreno N.O., Santibañez 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2019.07.004>
16. Walker W.J., Reed J.S., Verma S.K. Influence of slurry parameters on the characteristics of spray-dried granules. *Journal of the American Ceramic Society*. 1999;82(7):1711–1719.
17. Chen C., Planche M.-P., Deng S., Huang R., Ren Z., Liao H. Strengthened peening effect on metallurgical bonding formation in cold spray additive manufacturing. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019;28:769–779.
<https://doi.org/10.1007/s11666-019-00854-4>
18. Assadi H., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*. 2003;51(15):4379–4394.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X)
19. Dorfman M. Thermal spray materials. *AM&P Technical Articles*. 2002;160:49–51.
20. Kasparova M., Houdkova S., Cubrova J. Thermally sprayed coatings for high temperature application. In: *Proceedings of the 21st Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 23–25.05.2012*. 2012:144–146.

Сведения об авторе

Information about the Author

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

Viktor M. Pavlovets, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University
E-mail: pawlowets.victor@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.05.2022
После доработки 16.11.2022
Принята к публикации 04.09.2023

Received 11.05.2022
Revised 16.11.2022
Accepted 04.09.2023