

УДК 531.31.15+669

*к.т.н. Левченко Э. П.,
к.т.н. Вишневский Д. А.,
к.э.н. Зинченко А. М.,
к.т.н. Левченко О. А.,
Мороз В. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОВАЛКОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ДРОБИЛОК ГОРЯЧЕГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА

Работа посвящена анализу, развитию и усовершенствованию типовых конструкций одновалковых зубчатых дробилок, широко применяемых в агломерационном производстве для разделения на фракции предварительно полученного методом высокотемпературного спекания шихты агломерационного пирога. Рассмотрены направления совершенствования конструкций рассматриваемых дробилок и перспективы их дальнейшего развития.

Ключевые слова: *одновалковая зубчатая дробилка, горячий агломерат, дробление, усовершенствование конструкции, многоступенчатая обработка.*

Существенным фактором повышения эффективности доменного производства чугуна является улучшение условий работы печей, в том числе и за счет лучшей фракционной подготовки железорудного агломерата, что обеспечивает повышение их производительности при одновременном сокращении потребления кокса.

Процесс агломерации представляет собой окускование сыпучих материалов (в основном руд), служащих исходным сырьем перед выплавкой металлов, так как пылеватые материалы для непосредственной переплавки практически не пригодны по причине резкого снижения эффективности процесса. В дальнейшем таким образом спеченный пирог подвергается дроблению с целью получения кусков эффективных размеров, пригодных для плавки, а мелкие частицы отсеиваются и поступают на новый цикл окускования.

Предварительная фракционная подготовка материала связана с тем, что шихта, загруженная на колошник доменной печи при непрерывном опускании на высоту рабочего пространства печи (28–30 м) в среднем за 5–6 ч, постепенно превращается в шлак, чугун и газ. Навстречу шихте движутся печные газы — продукты горе-

ния кокса у фурм доменной печи и газообразные продукты ряда сложных реакций, происходящих в нижних горизонтах печи. Ввиду значительной скорости встречных газов, проходящих печь за 3–5 секунд при обычном давлении газа на колошнике $107,9 \text{ кН/м}^2$ (1,1 атмосферы) и за 5–6 секунд при повышенном давлении в рабочем пространстве печи до 245 кН/м^2 (2,5 атмосферы) на колошнике, они обладают существенным подъемным эффектом, за счет чего из печи выносятся частицы сырья размерами до 3–4 мм при работе с повышенным давлением газов в печи. При давлении на колошнике в $107,9 \text{ кН/м}^2$ (1,1 атм) из печи выносятся частицы шихты размером меньше 5–6 мм [1].

Следовательно, при загрузке значительная часть пылевой руды выносится газом из печи и затем оседает в пылеуловителях. Полное усвоение пылевой шихты печами возможно только при условии ее предварительного окускования. Все сказанное относится к пылевой руде, колошниковой пыли и в особенности к концентрату. Причем загрузка железорудного концентрата в печь без окускования не имеет смысла, т. к. он полностью выносятся газом из печи.

Влияние крупности кусков на газопроницаемость столба шихтовых материалов [2] показало, что в основном выносятся железорудные материалы крупностью до 2,3 мм, а отсеивая фракцию 0–2 мм полностью, можно загружать в доменную печь в ограниченном объеме мелкие фракции (2–5 и 1–4 мм) без ухудшения газопроницаемости слоя [3].

Качество шихты ухудшают не только мелкие материалы, но и большие куски, требующие большего времени на сушку, прогрев, удаление летучих компонентов и восстановление [4]. Кроме того, в них имеется много различных дефектов и крупных пор неспекшейся шихты. Поэтому крупные куски агломерата представляют собой крайне неустойчивую систему, состоящую из основного вещества и различных перемычек, мостиков и т. п., стенки которых имеют различные трещины и дефекты; крупные фракции кокса и агломерата больше измельчаются, чем мелкие. На любом горизонте доменной печи эти куски оказываются менее прогретыми и восстановленными, чем куски меньших размеров. Крупные куски, разрушаясь, дают много мелочи.

Производство агломерата размерами 5–30 мм с содержанием класса 0–5 мм не более 8–9 % позволяет повысить производительность доменной печи на 10–14 % и снизить расход кокса на плавку на 8–10 %, что является значительным потенциальным фактором повышения экономической эффективности производства чугуна [2, 3, 5, 6]. В связи с этим оптимизация конструкции применяемых одновалковых дробилок и технологии дробления агломерата с точки зрения повышения надежности работы и стабилизации крупности готового агломерата является актуальной. Их устанавливают непосредственно за разгрузочной частью конвейерной машины. Последующий отсев фракций обеспечивается стационарными и вибрационными грохотами.

На лучших аглофабриках Японии, США, Франции, Италии и Германии в основном

загружают железорудный материал крупностью 5–35 мм, при этом в скипе содержится не более 5–7 % фракции 0–5 мм [7].

Это достигается тем, что фракционную подготовку агломерационного сырья осуществляют многостадийным способом, посредством последовательной обработки на нескольких дробильных машинах с постепенным понижением крупности.

На отечественных предприятиях черной металлургии применяется одноступенчатая схема разрушения пирога агломерата, что не позволяет в полной мере выровнять гранулометрический состав готового продукта по требуемой крупности. При этом отсутствие свободных площадей исключает возможность установки дополнительного оборудования для обеспечения многостадийной обработки.

В этой связи целью данной работы является разработка усовершенствованной конструкции одновалковой зубчатой дробилки на базе типовой машины при условии ее минимальной модернизации и сохранении имеющихся габаритов.

Объект исследования — технологический процесс дробления агломерационного спека в одновалковой зубчатой дробилке путем обеспечения многоступенчатой обработки исходного материала.

Предмет исследования — конструктивные схемы и закономерности процесса дробления агломерационного спека в многоступенчатой одновалковой зубчатой дробилке.

Задачи исследования:

- анализ и оценка существующих конструктивных схем одновалковых зубчатых дробилок;

- определение причин неравномерности гранулометрического состава готового продукта;

- выявление способов повышения эффективности обработки агломерационного спека на основе достижения выровненности крупности готового продукта.

Известно, что одной из первых для дробления агломерационного пирога применялась типовая конструкция дробилки (рис. 1),

в свое время серийно выпускаемая заводом тяжелого машиностроения «Электросталь» [8].

Она имела размеры валков 1000×2200 мм и была оснащена шестизубыми звездочками. Зубья соседних звездочек поочередно смещались на круглом валу на 30° , дробление спека осуществлялось между зубьями и поддробильной плитой с отверстиями. Отличительной особенностью являлось наличие между зубьями и плитой регулируемой щели в диапазоне от 100 до 200 мм, что одновременно являлось и не-

достатком, т. к. значительно снижало эффективность дробления аглопирога.

В настоящее время в современном агломерационном производстве широко используются конструкции дробилок, выпускаемых производственным объединением «Волгоцеммаш» (рис. 2), где длинные зубья звездочек проходят сквозь колосниковую решетку.

Технические характеристики отечественных одновалковых длиннозубчатых дробилок приведены в таблице 1 [9].

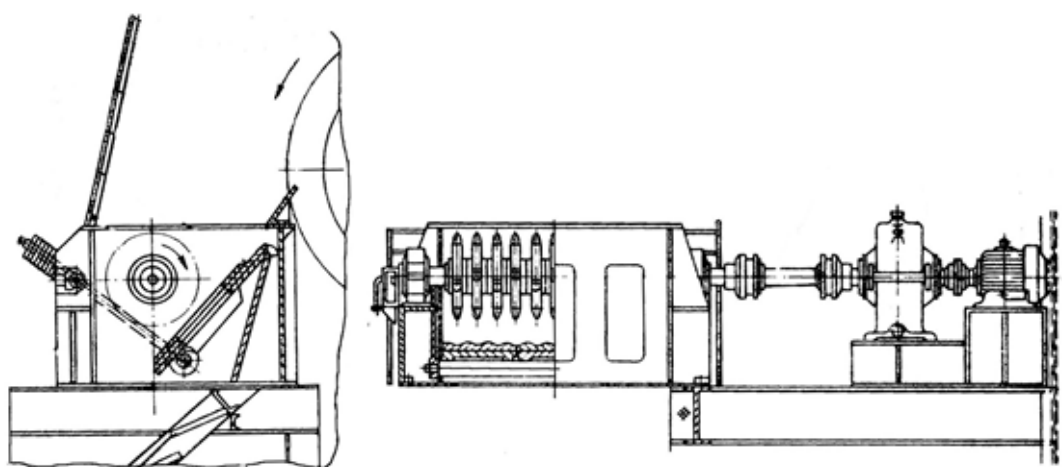
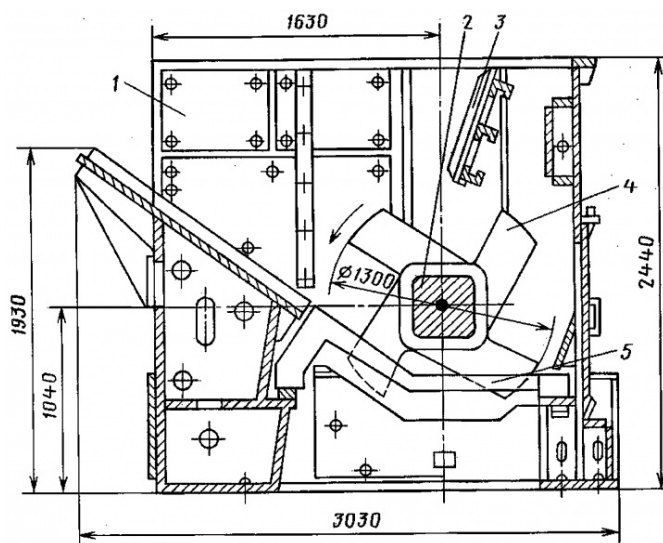


Рисунок 1 Конструктивная схема одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата, выпускаемой ранее заводом «Электросталь»



1 — корпус; 2 — вал; 3 — отбойная плита; 4 — зубчатый венец; 5 — колосники

Рисунок 2 Конструктивная схема одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата завода «Волгоцеммаш», применяемая в настоящее время

Таблица 1

Технические характеристики одновалковых дробилок

Показатель		СМД-1	СМД-2А	СМД-3Б
Размеры вала, мм	диаметр	1200	1300	1300
	длина	2100	2700	4200
Частота вращения вала, об/мин		3,2	4,7	3; 4,5; 6; 9
Наибольшие размеры загружаемого куска (агломерата), мм		250×1000×2000	250×1300×2500	400×1500×4000
Размер куска после дробления, мм		200	до 150	до 150
Ориентировочная производительность, т/год		80	200	800–900
Мощность двигателя, кВт		30	55	40; 60; 90; 125
Масса дробилки, т (без эл. двигателя)		22,3	27,8	52,7

Указанные дробилки предназначены для дробления горячего агломерата температурой 600–850 °С, поэтому для отвода теплоты, поступающей к цапфам вала при непосредственном контакте ротора с горячим агломератом, вал выполняют полым, и в нем предусмотрена циркуляция воды для охлаждения. Станина представляет собой сварную конструкцию из листового проката, в нижней ее части расположены сменные колосники, и боковые стенки облицованы износостойкими плитами. Вал ротора установлен на подшипниках качения. На валу насажены звездочки и дистанционные втулки.

При работе дробилки ротор захватывает звездочками поступающий в нее агломерат, дробит его и продавливает в зазоры колосниковой решетки.

Производительность зубчатой дробилки для агломерата упрощенно определяют по формуле [8]

$$Q = 60 \cdot \pi \cdot D \cdot n \cdot B \cdot s \cdot \rho \cdot \varphi, \quad (1)$$

где D — диаметр звездочек, м; n — частота вращения вала, об/мин; B — рабочая длина вала, м; s — размер разгрузочной щели между ступицами и зубьями звездочек для двухвалковых дробилок или между ступицами звездочек и колосниками одновалковых дробилок, м; ρ — плотность агломерата, т/м³; φ — коэффициент производительности, учитывающий разрыхление агломерата и использование длины вала ($\varphi = 0,2-0,6$).

Мощность приводного электродвигателя приблизительно рассчитывается по формуле

$$N_{дв} = k_n \cdot B \cdot D \cdot n, \quad \text{кВт}, \quad (2)$$

где k_n — опытный коэффициент, для агломерата средней прочности может быть принят равным 2.

Несмотря на большое распространение одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата, длительный производственный опыт показал, что выбранный в данном случае способ наложения разрушающих усилий в полной мере не позволяет обеспечить гарантированную выровненность гранулометрического состава готового продукта касательно его рациональной крупности, необходимой при доменной выплавке чугуна. Следовательно, необходимо дальнейшее усовершенствование подобных дробилок с тем учетом, что такая модернизация должна минимально затрагивать изменения типовой конструкции, т. к. металлургические предприятия очень неохотно относятся к серьезным изменениям устоявшихся технологических процессов.

Это существенным образом затрудняет задачу обеспечения условий разрушения агломерационного спека с получением его фракций, близких к оптимальным. Однако в ДонГТИ уделяется постоянное внимание данному вопросу, что, например, позволило несколько преобразовать исполнение колосниковой решетки, через которую продавливается аглоспек, таким образом, что вместо

традиционного среза был организован сравнительно менее энергоемкий способ излома.

Проведенные экспериментальные исследования физической модели одновалковой зубчатой дробилки [10], изготовленной в масштабе 1:10 от реальных размеров (рис. 3, 4), показали, что при наличии перепада плоскостей верхних поверхностей колосников удельные затраты энергии сокращаются на 9–12 %, по срав-

нению с установкой верхних поверхностей колосников в одной плоскости. При этом величина перепада плоскостей существенной роли не играет, что характеризуется наложением линий на графике друг на друга. Это говорит о том, что возможно определение минимальной высоты перепада, при которой аглоспек может разрушаться с меньшими усилиями со стороны зубьев звездочек ротора.

P , кВт/кг

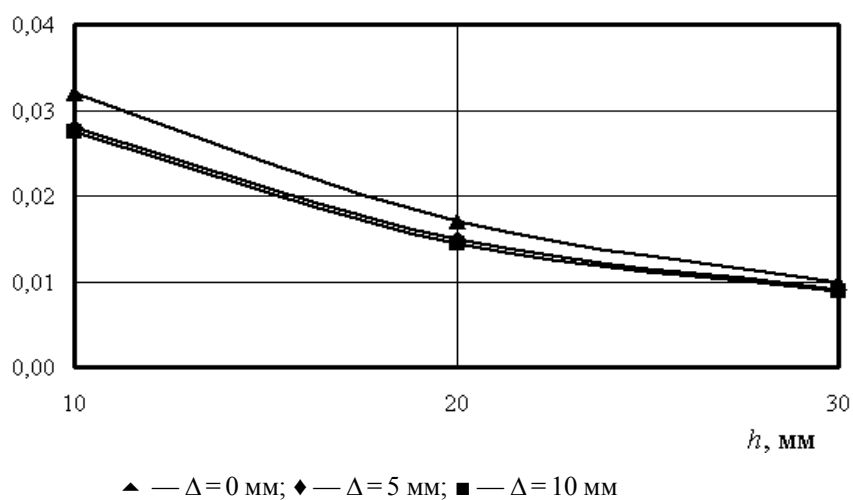


Рисунок 3 Удельные затраты электроэнергии на дробление при величине перепада

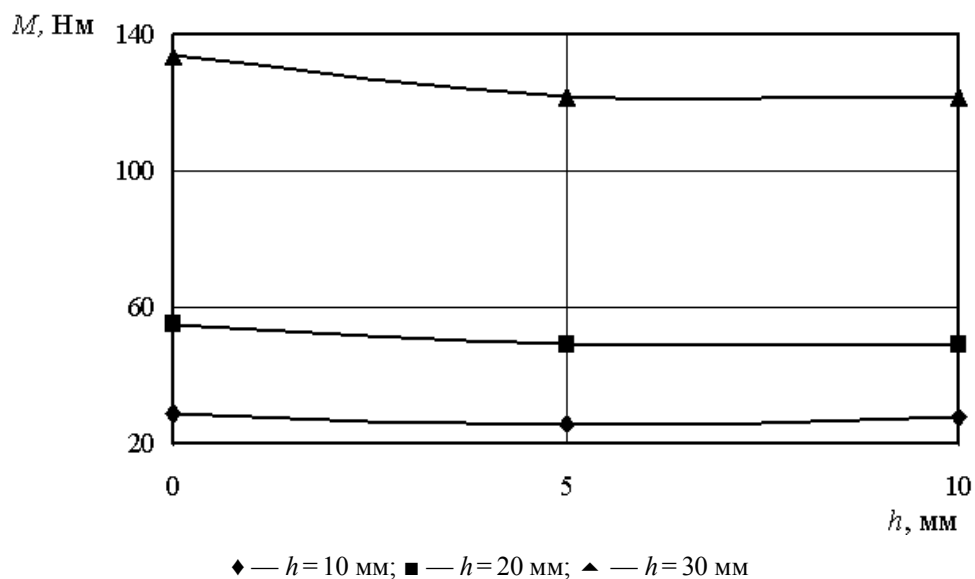


Рисунок 4 Зависимость крутящего момента от величины смещения верхних плоскостей колосников

Дальнейшее наращивание данной величины не влияет на результаты дробления. С увеличением толщины пирога крутящий момент увеличивается почти в два раза. Крутящий момент при размещении колосников с наличием перепада их верхних плоскостей ориентировочно на 9 % меньше, чем при их обычном размещении.

Также при исследованиях физической модели с помощью ситового анализа контролировалась крупность готового продукта (табл. 1).

Лучшие результаты по выходу качественного продукта соответствуют наименьшим высотам спекания, а перепад высот колосников, способствующий процессу излома при разрушении агломерационного пирога, сокращает количество крупных

кусков на 3–13 % и мелких частиц на 9–6 % при высотах от 30 до 10 мм соответственно.

Зависимость удельного расхода электроэнергии на дробление от предела прочности материала на сжатие представлена на рисунке 5. Можно предположить, что удельные затраты энергии на дробление агломерата пропорциональны его пределу прочности на сжатие. В результате проведения физического моделирования найдено качественное и количественное подтверждение правильности принятого технического решения. Выигрыш в удельных затратах зависит от механической прочности материала, подвергаемого дроблению. Чем выше прочностные характеристики, тем больше эффект снижения энергетических затрат на разрушение материала.

Таблица 1

Величина готового продукта

Исходная высота пирога, h , мм	Величина перепада верхних плоскостей колосников, Δ , мм								
	0			5			10		
	Выход классов, %								
	<0,5	>0,5<6	>6	<0,5	>0,5<6	>6	<0,5	>0,5<6	>6
10	13,6	42,2	43,2	12,8	53,9	33,3	12,3	54,6	33,1
20	17,2	39,6	44,2	15,6	38,7	41,9	15,3	42,9	41,8
30	20,7	28,2	51,1	18,8	31,4	49,8	19,0	31,3	49,7

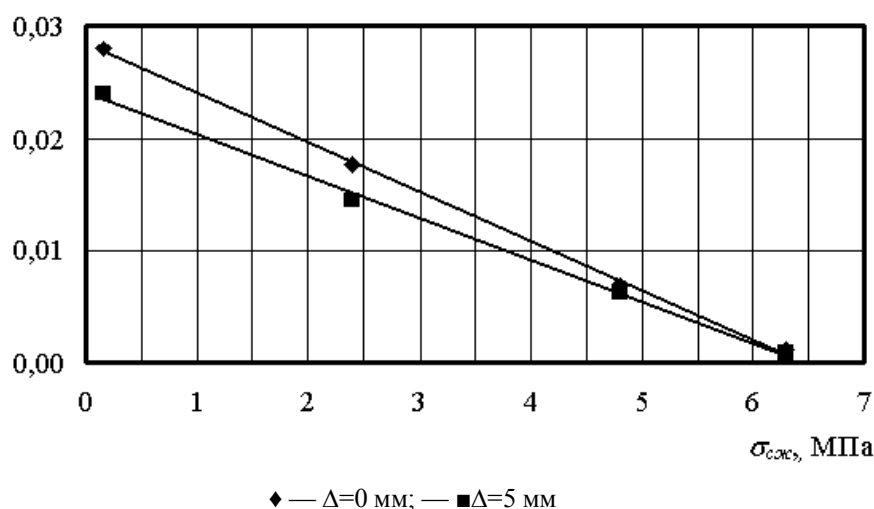
 P , кВт/кг

Рисунок 5 Зависимость удельного расхода электроэнергии на дробление

В производственных условиях исследовалась усовершенствованная конструкция одновалковой зубчатой дробилки (по декларационному патенту Украины № 9865), работающая в агломерационном цехе на агломашине № 6 ОАО «Алчевский металлургический комбинат» (г. Алчевск). При проведении исследований сначала в рабочей камере машины были установлены колосники в одной плоскости, а потом подняты через один относительно друг друга на 50 мм. Производственные испытания усовершенствованной конструкции проводились согласно договору о взаимном сотрудничестве.

Вместо разрушения агломерата путем среза (продавливания) в дробилке был организован процесс излома. При этом было установлено, что усилия, необходимые для разрушения аглопирога изломом, на 3,2 % меньше, чем усилия среза, а мощность, потребляемая электродвигателем, на 4,8 % ниже, по сравнению с процессом среза. Учитывая значительные объемы производства, достигающие на ОАО «АМК» 5 млн тонн в год, экономическая эффективность проведенной работы является очевидной.

Однако следует отметить, что такое решение также в полной мере не удовлетворяет образование частиц, крупность которых гарантирует наилучшие условия доменной плавки. Поэтому в настоящее время данное направление исследований активно развивается с целью создания в рабочей камере типовой одновалковой зубчатой дробилки многоступенчатой схемы, согласно которой воздействие зубьев звездочек ротора будет осуществляться на агломерат до тех пор, пока размеры его кусков не придут в соответствие с величиной зазоров в колосниковой решетке, играющей роль классификатора готового продукта. При этом видоизменяется лишь форма колосников (в виде полукруглой формы), на которых дополнительно организуются выступы для обеспечения многоступенчатого дробления. Возможность

такой схемы теоретически доказана и обоснована [11] в ранее проведенных исследованиях. Моделирование изменения фракционного состава при многоступенчатом дроблении возможно на основе математического решения матрицы [10], описывающей состояние крупности частиц:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ 0 & Q_{22} & \dots & Q_{2n} \\ 0 & 0 & \dots & Q_{nn} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где Q_{ij} — часть материала с размерами после разрушения от Q_i до Q_{j+1} с предыдущими размерами от Q_i до Q_{j+1} ($i, j = \overline{1, n}$).

Однако решение ее в конечном итоге требует осуществления итерационного процесса, начинается со свободного приближения, что задает заблаговременно заданную точность. Для таких целей целесообразно применять численные методы.

В конечном же итоге любая зависимость, описывающая крупность конечного продукта на любом этапе его образования подчиняется экспоненциальной зависимости и может быть выражена уравнением Розина — Раммлера:

$$\frac{100}{R} = e^{m \cdot d^n}, \quad (4)$$

где R — суммарный остаток на сите с диаметром ячейки d , %; e — основание натурального логарифма; m и n — постоянные, характерные для данного материала.

В настоящее время ведется подготовка физической модели дробилки и лабораторной базы для организации поисковых и многофакторных экспериментов.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Выпускаемая конструкция одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата, широко применяемая в агломерационном производстве на многих предприятиях металлургической отрасли, хоть и обладает простотой и надежностью, однако в настоящее время является морально устаревшей.

2. Способ создания усилий разрушения преимущественно срезом характеризуется повышенными энергозатратами, и рекомендуется его замена на способ организации преимущественно излома за счет перепада поверхностей колосников.

3. Так как достичь в полной мере рациональной крупности товарного агломерата в обычной конструкции одновалковой зубчатой дробилки не удается, то она нуждается в доработке путем создания в ее рабочей камере многоступенчатого наложения усилий на материал, чего реально дос-

тичь за счет изменения геометрической формы колосников.

4. Возможность многоступенчатого дробления агломерата в типовой одновалковой зубчатой дробилке доказана теоретически, поэтому требуется ее экспериментальное подтверждение.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики ведения многофакторных исследований многоступенчатого дробления агломерата в типовой конструкции одновалковой зубчатой дробилки.

Библиографический список

1. Вегман, Е. Ф. Окускование руд и концентратов [Текст] / Е. Ф. Вегман. — М. : Металлургия, 1968. — 258 с.
2. Готлиб, А. Д. Доменный процесс [Текст] / А. Д. Готлиб. — М. : Металлургия, 1966. — 504 с.
3. Hirosidi, S. Influence of the particle size on the gas permeability of the column of charge materials [Text] / S. Hirosidi // J. Iron and steel. — 1985. — № 3. — P. 348–356.
4. Базилевич, С. В. Агломерация [Текст] / С. В. Базилевич, Е. Ф. Вегман. — М. : Металлургия, 1967. — 368 с.
5. Наукове обґрунтування та оптимізація технологічного процесу дроблення агломерату : звіт про НДР (пром.ж.) / Донбаський державний технічний університет. — Алчевськ, 2007. — 131 с. — № ДР 0295U003812.
6. Наукове обґрунтування та оптимізація технологічного процесу дроблення агломерату. Звіт про НДР (заключ.) / Донбаський державний технічний університет. — Алчевськ, 2007. — 203 с. — № ДР 0295U003812.
7. Базилевич, С. В. Всесоюзное совещание по подготовке руд к доменной плавке [Текст] / С. В. Базилевич, Е. Ф. Вегман // Сталь. — 1971. — № 12. — С. 1074–1075.
8. Притыкин, Д. П. Механическое оборудование заводов цветной металлургии. Ч. 1. Механическое оборудование для подготовки шихтовых материалов [Текст] / Д. П. Притыкин. — М. : Металлургия, 1988. — 392 с.
9. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с.
10. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О. А. Левченко, Э. П. Левченко, А. М. Зинченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 190 с.
11. Мороз, В. В. Анализ обеспечения возможностей организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / В. В. Мороз, В. И. Рубежанский, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 5 (50). — С. 153–157.

© Левченко Э. П.

© Вишне夫斯基 Д. А.

© Зинченко А. М.

© Левченко О. А.

© Мороз В. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.

Статья поступила в редакцию 29.11.2021.

PhD in Engineering Levchenko E. P., PhD in Engineering Vishnevskiy D. A., PhD in Economics Zinchenko A. M., PhD in Engineering Levchenko O. A., Moroz V. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)
FEATURES OF MODERNIZATION OF SINGLE-ROLL CRUSHERS DESIGN OF HOT IRON-ORE SINTER

The work is devoted to analyzing, development and improvement of standard designs of single-roll crushers, widely used in sintering production for the separation into fractions of sintering cake previously obtained by high-temperature sintering. The directions of improving the designs of studied crushers and the prospects for their further development are considered.

Key words: *single-roll crusher, hot sinter, crushing, design improvement, multi-stage processing.*