

Расчет характеристики гранулометрического состава продуктов дробления металлургического шлака с учетом различной дробимости фракций крупности

Гаркави М. С.¹, Горлова О. Е.^{2, 3*}, Колодежная Е. В.^{3, 1},
Колкова М. С.², Кутлубаев И. М.²

¹ ЗАО «Урал-Омега», г. Магнитогорск, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

³ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
г. Москва, Россия

*e-mail: o.gorlova@magtu.ru

Реферат

Целью работы является математическое моделирование процесса дробления металлургического шлака в технологических схемах его переработки для повышения эффективности вскрытия ценного компонента и оптимизации энергетических затрат. Эффективность извлечения металла в процессе магнитной сепарации шлака будет зависеть от количества образующегося при дроблении класса крупности, соответствующего крупности зерен ценного компонента. Для реализации такого раскрытия техническими средствами без переизмельчения необходимо адаптировать параметры работы дробилки.

Методология проведения исследований включала определение химического, фазового составов пробы текущего конверторного шлака ОАО «ММК» крупностью 0–70 мм; фракционирование на узкие классы крупности 0–5 мм, 5–10, 10–20 мм; определение в них содержания магнитной фракции. Немagnetные частицы трех фракций крупности дробились в центробежно-ударной дробилке ДЦ-0,36 при варьировании линейной скорости вращения ускорителя от 30 до 90 м/с с определением гранулометрического состава продуктов дробления.

Результаты и их анализ. Зерновой состав продуктов дробления шлака аппроксимирован классическим уравнением Розина–Раммлера, для чего были определены параметр, характеризующий крупность дробленого материала, и параметр, характеризующий однородность зернового состава. Определены уравнения, описывающие эти параметры как значение функции крупности конверторного шлака, поступающего на дробление, при заданной скорости вращения ускорителя.

Выводы. Разработанная электронная форма расчета параметров зернового состава дробленого продукта ДЦ позволяет прогнозировать трансформацию зернового состава продукта дробления шлака при изменении параметров исходного материала и режимных параметров дробилки и тем самым косвенно прогнозировать эффективность последующей магнитной сепарации шлаков.

Ключевые слова: математическое моделирование; дробление; металлургический шлак; функции распределения; гранулометрический состав; размер частиц; фракции крупности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00526, <https://rscf.ru/project/22-27-00526/>.

Введение. Мировой и отечественный опыт последних лет показывает, что металлургические предприятия обладают широкими возможностями по рециклингу отходов собственного производства, и шлаки становятся наиболее регенерируе-

мыми металлсодержащими отходами [1–5]. Это продиктовано необходимостью одновременного решения задач рационального недропользования, восполнения истощающейся минерально-сырьевой базы действующих металлургических предприятий, а также не менее актуальных природоохранных задач уменьшения объемов и площадей складироваемых и долговременно хранящихся многотоннажных отходов, снижения деструктивного трансформирования ими естественной природной среды, сохранения здоровья и улучшения качества жизни населения [1, 6–8]. Согласно отраслевой программе «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве» (*Паспорт отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве». Утв. Правительством РФ 17 ноября 2022 г. № 13493п-ППП, далее отраслевая программа*) в 2021 г. количество образовавшихся доменных шлаков составило 8,2 млн т, шлаков цветной металлургии – 5,8 млн т, сталеплавильных – 9,2 млн т. Часть из них была утилизирована в рамках собственного производственного рециклинга [6, 9, 10].

Анализ априорной информации [7, 11–15] и собственные проводимые исследования [10, 16, 17] показали, что целесообразность и эффективность извлечения скрапа и корольков металла из шлаков черной металлургии магнитной сепарацией будут непосредственно зависеть от способа их разрушения, селективности и полноты раскрытия железосодержащих магнитных фаз в процессе рудоподготовки. Гранулометрический состав и распределение зерен ценного компонента по крупности является важной характеристикой дробленого дисперсного материала и во многом определяет показатели операций обогащения. При исследовании и расчетах процессов дезинтеграции, пылеулавливания и сепарации зачастую необходимо аналитическое описание распределения частиц по размерам. Математическое описание процесса дезинтеграции материала также позволит прогнозировать и просчитывать отклонение гранулометрического состава при изменении режимных параметров работы дробилок еще на стадии разработки технологической схемы. Для этого чаще всего используются функции распределения Розина–Раммлера, Плитта, нормальный логарифмический закон и др. [18–20].

Для аналитического описания распределения размера частиц продуктов дробления фракционированного металлургического шлака было использовано уравнение Розина–Раммлера. При проведении испытаний было учтено, что выбранная функция относится к инфинитным и определяет свои значения на интервале изменения размера частиц от нуля до бесконечности. Однако в данном исследовании больший интерес представляет определение содержания в дробленом шлаке частиц размера, соответствующего крупности зерен ценного компонента. При этом полученные распределения используются для сравнения значений различных режимов дробления, а не для определения абсолютных значений.

Этап подготовки техногенного минерального сырья к обогащению важен как с точки зрения обеспечения рационального гранулометрического состава материала, так и с точки зрения снижения материальных и энергетических затрат на дезинтеграцию. Машины, для которых характерны наименьшие удельные энергетические затраты, имеют следующие отличительные признаки: материал после акта разрушения немедленно удаляется из их рабочей зоны; осуществляется объемное (многоосное) нагружение куска материала в процессе дробления. Центробежно-ударные дробилки, обладая всеми перечисленными преимуществами, обеспечивают получение более равномерного гранулометрического состава продуктов дробления и возможность его оперативного регулирования путем

изменения скорости вращения ускорителя, что позволяет встраивать их в технологические схемы переработки сложноструктурного техногенного сырья [16, 21, 22]. Характерным для центробежной дробилки является многократное превышение кинетической энергией куса величины энергии, физически достаточной для его разрушения. Эффективность работы подобных устройств обеспечивается высокой интенсивностью столкновений множества частиц, изначально обладающих избыточной энергией, а диапазон энергий частиц определяется гранулометрическим составом материала и массой фрагментов, сходящих с разгонного ротора [23]. В работе [24] дробление в центробежно-ударных дробилках, наряду с дроблением в конусных инерционных, виброинерционных и пресс-валковых дробилках, отнесено к специальным селективным методам дезинтеграции сложных тонкодисперсных упорных руд.

Цель исследования. На основании изложенного определена цель работы, заключающаяся в оптимизации параметров процесса дробления металлургических шлаков в центробежно-ударной дробилке для достижения максимального раскрытия королек металла в процессе рудоподготовки, снижения энергозатрат и повышения качества выпускаемой продукции. В качестве параметров процесса дезинтеграции шлаков выбраны крупность исходного материала, морфометрические характеристики ценного компонента и величина прилагаемой нагрузки. Решение поставленной задачи позволит выявить скрытые резервы, совершенствовать и развивать существующие технологии переработки техногенного сырья.

Объект и методика исследования. В качестве объекта исследования для проведения испытаний была отобрана проба текущего конверторного шлака ОАО «ММК» фракции 0–70 мм. Химический состав исходного конвертерного шлака, %: $Fe_{\text{общ}}$ – 22,4; SiO_2 – 12,4; CaO – 39,4; Al_2O_3 – 4,2; SO_3 – 0,3; MgO – 14,6; Cr_2O_3 – 0,3; TiO_2 – 0,5; MnO – 2,6; P_2O_5 – 0,5; V_2O_5 – 0,3.

Таблица 1. Фазовый состав пробы конверторного шлака
Table 1. Chemical composition of converter slag

Минерал	Химическая формула	Содержание, %
Ларнит	$2CaO \cdot SiO_2$	23,7
Браунмиллерит	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	14,2
Ожелезненный периклаз	MgO	14,9
Феррит кальция	$2CaO \cdot Fe_2O_3$	8,7
Трехкальциевый силикат	$3CaO \cdot SiO_2$	12,5
Майенит	$12CaO \cdot 7Al_2O_3$	3,4
Магнезиовюстит	(Mg, Fe)O	3,0
Известь	CaO	3,5
Твердый раствор оксидов	RO-фаза	12,7

Химический состав отобранной пробы материала является типичным для шлаков конверторного производства. Соотношение $CaO/SiO_2 = 3,2$. Фазовый состав шлака представлен в табл. 1.

Согласно проведенным исследованиям, основной фазой конверторного шлака является двухкальциевый силикат, содержание которого составило 23,7 %. Содержание ферритной и алюмоферритной фаз, представляющих собой твердый раствор браунмиллерита и двухкальциевого феррита, также находится в пределах 23 %.

Для оценки влияния крупности материала, подаваемого на дробление в центробежно-ударную дробилку, исходный шлак предварительно был раздроблен в щековой дробилке ST-1 (ООО «Инфел») и рассеян на классы крупности: проба 1 – фракция 0–5 мм (выход 27,9 %); проба 2 – фракция 5–10 мм (выход 16,9 %); проба 3 – фракция 10–20 мм (выход 46,8 %). В процессе фракционирования дробленого шлака также было выделено 8,4 % фракции крупностью +20 мм. Рентгенофазовый анализ показал, что данный материал состоит из железа более чем на 80 %.

Таблица 2. Геометрические характеристики металлических частиц в немагнитных продуктах шлаков

Table 2. Geometric characteristics of metal particles in non-magnetic slag products

Фракция шлака, мм	Размеры металлических частиц, мм	
	от	до
0–5	0,169	0,543
5–10	0,395	0,801
10–20	0,175	1,200

Магнитный анализ проб шлака, выделенных с помощью ручного ниобиевого магнита (90 мТл), показал наличие во всех трех пробах магнитной фракции. В пробе 1 выход магнитной фракции составил 18,7 %; в пробе 2 – 14,6 %, максимальный выход 21,3 % – в пробе 3.

С помощью современного минералого-аналитического комплекса «Минерал С7» установлено, что в немагнитных продуктах сепарации всех трех проб шлака присутствуют нерас-

крытые частицы металла. Анализ морфометрического состава металлических частиц показал, что они имеют размер от 0,2 до 1,2 мм (табл. 2).

На рис. 1 в качестве примера показаны геометрические параметры металлических частиц в немагнитной фракции шлака 10–20 мм.

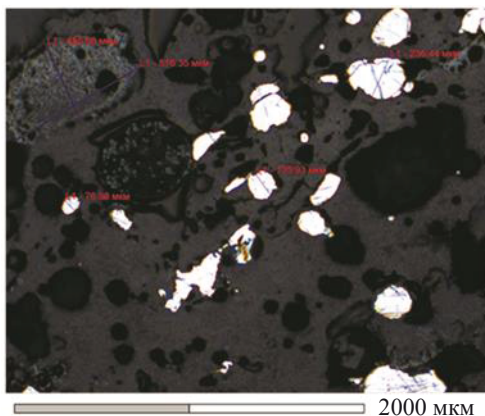


Рисунок 1. Микрофотография немагнитной фракции шлака 10–20 мм: светлые зерна – металл; темные – силикаты

Figure 1. Micrograph of non-magnetic fraction of 10–20 mm slag: light grains – metal; dark grains – silicates

следовательно, эффективность извлечения металла в магнитный продукт при магнитной сепарации шлака будет напрямую зависеть от количества образующегося при дроблении класса крупности 0,2–1,2 мм. Для реализации такого раскрытия техническими средствами без переизмельчения необходимо адаптировать параметры работы дробилки для получения гранулометрического состава дробленого материала с максимальным выходом требуемого класса крупности.

Решение данной задачи возможно осуществить посредством разработки математической модели, описывающей процесс дробления шлака при свободно-ударном разрушении. Такая модель позволит производить расчёт

гранулометрического состава продукта дробления в зависимости от начальной крупности измельчаемого материала и величины прилагаемой нагрузки, а следовательно, адаптировать работу дробилки для получения требуемого зернового состава шлака. Модель идентифицирована по экспериментальным данным,

полученным при дроблении проб шлака в промышленной центробежно-ударной дробилке типоразмера ДЦ-0,36 с металлической отбойной поверхностью и максимальной крупностью питания 20 мм. В центробежно-ударной дробилке величина прилагаемой нагрузки (сила удара куса материала об отбойную поверхность) определяется скоростью вылета частиц материала с ускорителя и, следовательно, скоростью вращения ускорителя [16, 21]. Немагнитные продукты трех подготовленных проб шлака различной крупности дробились в ДЦ-0,36 при скорости вращения ускорителя 30, 50, 70 и 90 м/с. В дробленом шлаке определялся granulометрический состав и содержание магнитного продукта.

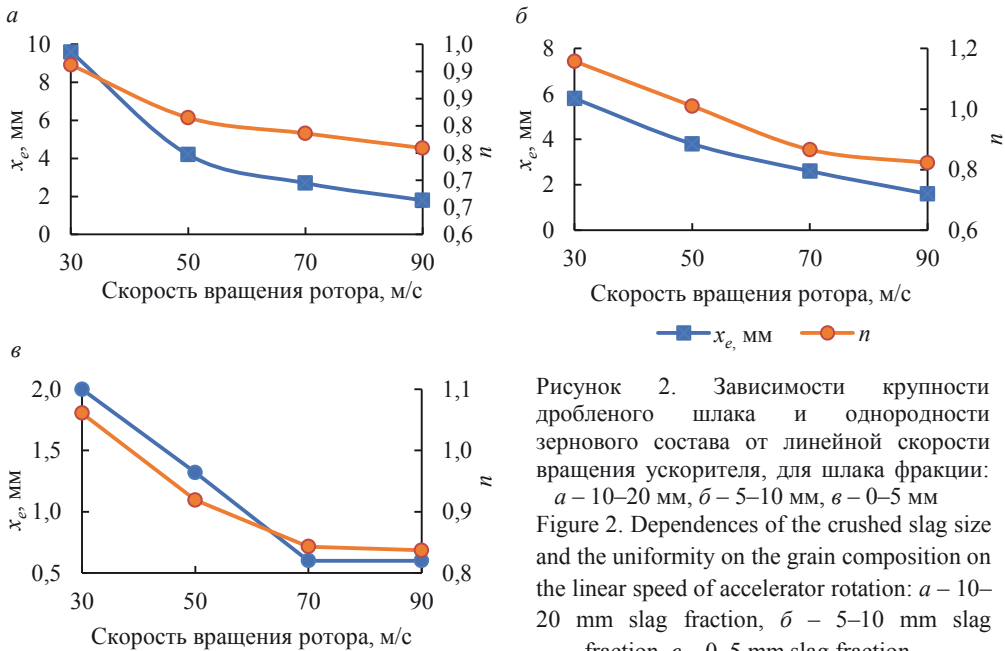


Рисунок 2. Зависимости крупности дробленого шлака и однородности зернового состава от линейной скорости вращения ускорителя, для шлака фракции: а – 10–20 мм, б – 5–10 мм, в – 0–5 мм

Figure 2. Dependences of the crushed slag size and the uniformity on the grain composition on the linear speed of accelerator rotation: а – 10–20 mm slag fraction, б – 5–10 mm slag fraction, в – 0–5 mm slag fraction

Зерновой состав продуктов дробления шлака в центробежно-ударной дробилке может быть аппроксимирован уравнением Розина–Раммлера, широко используемым для большинства полидисперсных систем: $R = 100\exp(-bx^n)$, где R – суммарный выход класса крупнее x , %; x – диаметр частиц, мм; b – постоянный коэффициент, зависящий от материала; n – показатель степени, характеризующий рассеяние частиц по размерам (однородность зернового состава).

Приняв, согласно предложенному Беннетом [24], что $b = 1/x_e^n$ уравнение примет вид: $R = 100\exp(-(x/x_e)^n)$, где x_e – размер частицы, характеризует действительную крупность материала. Отсюда ясен физический смысл x_e . При $x = x_e R$ становится равен 36,8 %, т. е. x_e характеризует действительную крупность материала и является размером, крупнее которого оказывается более 36,8 % материала.

Параметр x_e , характеризующий крупность дробленого материала, определялся по характеристикам зернового состава дробленого шлака как размер зерна, при котором интегральная кривая принимает значение 63,2 % ($100 - 36,8$ %).

Для определения параметра n , характеризующего однородность зернового состава, необходимо произвести следующие преобразования. Дважды логарифмируя уравнение $100/R$, получим выражение $\lg(\lg(100/R))$. В координатах $\lg \lg(100/R) - \lg x$ зерновой состав дробленого шлака отобразится как прямая линия

с углом наклона α . Значение параметра однородности зернового состава n определялось как тангенс угла наклона $\operatorname{tg}\alpha$ прямой зернового состава дробленого шлака в логарифмических координатах.

Известно, что эффективность магнитной сепарации шлака напрямую зависит от параметров зернового состава материала после дробления. С одной стороны, чем более однородным или монодисперсным будет материал, тем более контрастными свойствами будут обладать одноразмерные частицы и, следовательно, более эффективно будет происходить их магнитная сепарация. С другой стороны, чем ближе крупность дробленого материала к размеру частиц ценного компонента, тем больше вероятность раскрытия зерен ценного компонента и их перехода в магнитную фракцию при сепарации.

Таблица 3. Данные для расчета параметров дробления шлака в ДЦ
Table 3. Data for slag crushing parameters calculation in centrifugal impact crusher ДЦ

Скорость вращения ускорителя, м/с	Уравнение функции $n = f(d_i)$	Уравнение функции $x_e = f(d_i)$
30	$n = 0,9342 + 0,0612d - 0,0042d^2$	$x_e = 0,9627d - 0,0203d^2 - 0,28$
50	$n = 0,8072 + 0,0536d - 0,0035d^2$	$x_e = 0,8501d - 0,0354d^2 - 0,584$
70	$n = 0,8086 + 0,0168d - 0,0012d^2$	$x_e = 0,7093d - 0,0309d^2 - 0,98$
90	$n = 0,8364 + 0,0013d - 0,0004d^2$	$x_e = 0,3387d - 0,0139d^2 - 0,16$

Результаты и обсуждение. По результатам дробления проб шлака трех фракций при различной скорости вращения ускорителя, построения характеристик дробленых продуктов (суммарных по минусу и после их двойного логарифмирования) были определены параметры зернового состава x_e и n . Построены графики зависимости, иллюстрирующие влияние линейной скорости вращения ротора дробилки, которая определяет кинетическую энергию удара, на параметры гранулометрического состава (рис. 2).

При дроблении шлака фракции 10–20 мм (рис. 2, а) на различной скорости вращения ускорителя параметр x_e изменяется в широком диапазоне (от 1,8 до 9,6 мм). Уже при скорости вращения ускорителя 50 м/с величина параметра x_e становится меньше 5 мм и продолжает снижаться с увеличением скорости. При этом результаты свидетельствуют о равномерной однородности зернового состава дробленого шлака при скорости ускорителя выше 50 м/с. При дроблении шлака фракции 5–10 мм наблюдается аналогичная ситуация: параметр x_e закономерно уменьшается от 5,8 до 1,6 мм при увеличении скорости вращения ускорителя. Однородность дробленого шлака при увеличении скорости ускорителя свыше 50 м/с снижается на 15–20 %.

При дроблении самой мелкой фракции шлака 0–5 мм полученные зависимости размера частиц дробленого продукта и однородности зернового состава от величины прилагаемой нагрузки имеют аналогичный характер. Это может свидетельствовать о том, что предел крупности материала, при котором разрушение свободным ударом становится неэффективным из-за малой массы частицы, и, следовательно, низкой кинетической энергии удара, не был достигнут при дроблении шлака. Следовательно, додрабмливание металлургического шлака даже такой мелкой фракции как 0–5 мм в центробежно-ударной дробилке с целью вскрытия зерен ценного компонента является целесообразным в схемах обогащения данного техногенного сырья.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что необходимая и достаточная величина прилагаемой нагрузки достигается при скорости вращения ускорителя 50 м/с. При дальнейшем увеличении скорости вращения ускорителя возрастают энергетические затраты, при этом крупность дробленого шлака уменьшается незначительно. Анализ зависимости параметра n от скорости вращения ускорителя при дроблении шлака различных фракций позволяет сделать вывод, что чем крупнее исходный материал, тем менее однороден зерновой состав дробленого шлака. Наиболее однородный зерновой состав шлака получен при скорости вращения ускорителя 30 и 50 м/с.

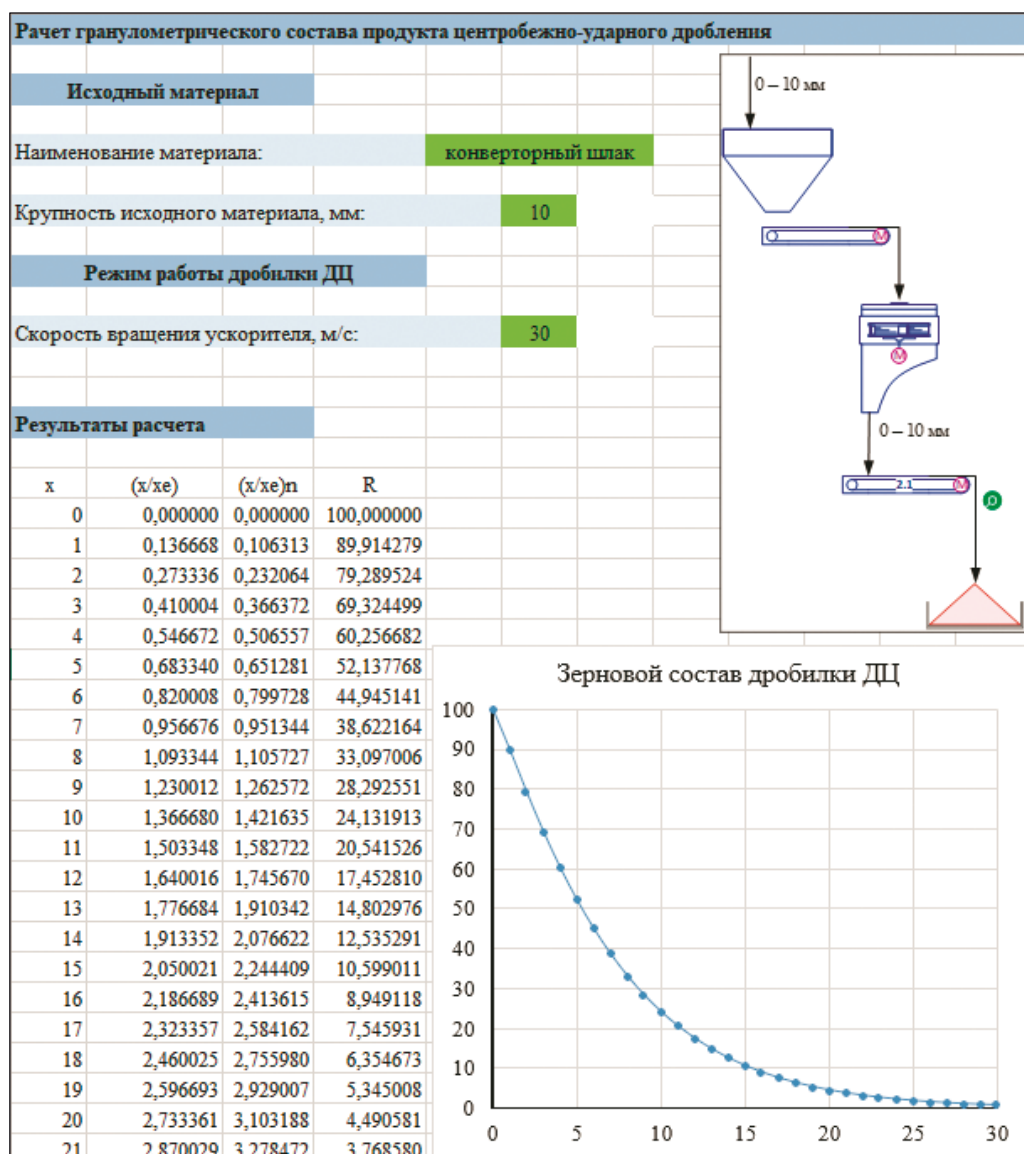


Рисунок 3. Экранная форма расчета параметров зернового состава ДЦ при скорости вращения ускорителя 30 м/с

Figure 3. Screen form for calculating the centrifugal impact crusher ДЦ grain composition parameters under the accelerator rotation speed of 30 m/s

Для прогнозирования изменения дисперсного состава конверторного шлака при дроблении в центробежно-ударной дробилке ДЦ в зависимости от его исходной крупности и скорости вращения ротора дробилки разработана электронная форма в программе Microsoft Excel. Для аппроксимации гранулометрического состава исходного шлака использована функция распределения Розина–Раммлера. Параметры уравнения x_e и n рассчитываются как значение функции от крупности исходных кусков шлака d_p , поступающих на дробление, при заданной скорости вращения ускорителя (табл. 3).

На рис. 3 приведена экранная форма результатов расчета параметров зернового состава дробленого продукта центробежно-ударной дробилки в программе Microsoft Excel.

Разработанная математическая модель позволяет проводить численные эксперименты по дроблению конверторного шлака при возможности изменения крупности исходного куска и режимных параметров работы дробилки ДЦ, в частности, ее основного регулируемого параметра – скорости вращения ротора. Полученные данные позволяют оперативно определять количество материала, соответствующего по крупности размеру металлических включений в шлаках, и тем самым косвенно прогнозировать эффективность последующей магнитной сепарации.

Выводы. Для технологического совершенствования схем переработки такого сложноструктурного техногенного сырья как металлургические шлаки, повышения вскрытия ценного компонента в процессе дезинтеграции и оптимизации энергетических затрат проводятся исследования по математическому моделированию процесса дробления сталеплавильного шлака в центробежно-ударной дробилке.

На основании проведенных исследований дробления узких фракций шлака в центробежно-ударной дробилке ДЦ при различной скорости вращения ускорителя и аппроксимации зернового состава дробленых продуктов с помощью классического уравнения Розина–Раммлера разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать преобразование гранулометрического состава дробленого продукта в дробилках, реализующих ударный способ разрушения.

Определены уравнения, описывающие параметры зернового состава дробленого продукта как значение функции крупности конверторного шлака d_p , поступающего на дробление, при заданной скорости вращения ускорителя центробежно-ударной дробилки.

Разработанная электронная форма расчета параметров зернового состава дробленого продукта центробежно-ударной дробилки позволяет прогнозировать трансформацию зернового состава продукта дробления шлака при изменении параметров исходного материала и режимных параметров дробилки и тем самым косвенно прогнозировать эффективность последующей магнитной сепарации шлаков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экологически ориентированная переработка горнопромышленных отходов: монография / под науч. ред. В. А. Чантурия, И. В. Шадруновой. М.: «Спутник+», 2018. 200 с.
2. Shen H., Forssberg E. An overview of recovery of metals from slag // Waste Management. 2003. Vol. 23. P. 933–949. DOI: 10.1016/s0956-053x(02)00164-2
3. Niladri Shekhar Samanta, Pranjal P. Das, Simons Dhara, Mihir K. Purkait. An overview of precious metal recovery from steel industry slag: recovery strategy and utilization // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2023. Vol. 62(23). P. 9006–9031. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c00604
4. Sultamurat G. I., Boranbaeva B. M., Maksyutin L. A., Aktaeva N. A. Evaluation of possibility of converter slag utilization in the conditions of «ArcelorMittal Temirtau» JSC // Chernye Metally. 2015. № 11. P. 26–31.
5. Reuter M., Xiao Y., Boin U. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes // VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. P. 349–356.

6. Naidu T. S., Sheridan C. M., van Dyk L. D. Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses // *Minerals Engineering*. 2020. Vol. 149. Art. 106234. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106234

7. Современные технологии переработки техногенного сырья: монография / под науч. ред. Булатова К. В., Газалеевой Г. И. Екатеринбург: Уральский Рабочий, 2019. 200 с.

8. Газалеева Г. И., Мамонов С. В., Братыгин Е. В., Ключников А. М. Проблемы и инновационные решения в обогащении техногенного сырья // *ГИАБ*. 2017. № 1. С. 257–272.

9. Кузнецов А. В., Петров В. В. О реализации Министерством природных ресурсов и экологии Свердловской области полномочий по обращению с отходами производства и потребления в 2017 году // *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований*: тр. V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов». Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 18–21.

10. Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Орехова Н. Н., Колодежная Е. В. Ресурсосбережение и ликвидация накопленного экологического ущерба в старопромышленных регионах при переработке шлаков металлургического производства // *ГИАБ*. 2018. № S1. С. 300–320.

11. Гарабрина Л. А., Курган Т. А., Игнатъева Н. С. Переработка сталеплавильных шлаков в ОАО «ММК». М.: Металлург, 2000. 101 с.

12. Чижевский В. Б., Гришин И. А., Шавакулева О. П. Разработка высокоэффективной технологии глубокой переработки и комплексного использования сталеплавильных шлаков // *Черные металлы*. 2016. № 9(1017). С. 18–23.

13. Demin B. L., Sorokin Yu. V., Smirnov L. A., Shcherbakov Ye. N. Secondary recycling of smelter slags // *In IV Congress Fundamental Research and Applied Developing of Recycling and Utilization Processes of Technogenic Formations*. 2020. P. 593–600.

14. Foniok K., Matejka V., Maierová P., Vlček J. Separation of the magnetic fraction from the slags originated during steel production // *Proceedings 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Brno, Czech Republic, EU, May 26–28, 2021. P. 153–158. DOI: 10.37904/metal.2021.4092

15. D. Satish Kumar, Rameshwar Sah, Sarbendu Sanyal, Ganapathi Prasad. Measurement of metallic iron in steel making slags // *Measurement*. 2018. Vol. 131. P. 156–161. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.08.066

16. Shadrinova I. V., Ozhogina E. G., Kolodezhnaya E. V., Gorlova O. E. Slag disintegration selectivity // *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49. No. 5. P. 831–838.

17. Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Колодежная Е. В. Технология получения высококачественных концентратов из отвальных металлургических шлаков // *Обогащение руд*. 2019. № 4. С. 54–60.

18. Nicolov S. Modelling and simulation of particle breakage in impact crusher // *International Journal of Mineral Processing*. 2004. 74S. P. 219–S225. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.07.031

19. Шишкин А. С. Аппроксимация гранулометрического состава финитными распределениями // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2009. № 4. С. 78–81.

20. Чупшев В. Б. Математические методы определения зерновых характеристик сыпучих материалов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2006. Т. 8. № 4. С. 1153–1155.

21. Vorob'ev V. A., Ivanov E. N., Larionov A. N., Ryazanov M. A. Dry technologies of ore preparation as a tool for increasing extraction of valuable components // *Proceedings of 29th International Mineral Processing Congress (IMPC 2018)*, Moscow, 17–21 September 2018. Moscow: International Agency of Congress Management (МАКО), 2019. P. 708–715.

22. Ryabchikov M., Burnashev R. Selection of the technological line structure for the building aggregates production using centrifugal impact crushers // *Architecture and Engineering*. 2019. Vol. 4. Iss. 1. P. 32–37. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-1-32-37

23. Хопунов Э. А. Рудоподготовка и развитие процессов переработки минерального сырья // *Современные научные исследования и инновации*. 2019. № 9. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2019/09/90291> (дата обращения: 17.09.2020).

24. Gazaleeva G. I., Bulatov K. V. Choosing special methods of selective disintegration and schemes for complex refractory ore // *Minerals and Mining Engineering*. 2022. No. 1. P. 45–57. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-45-57

25. Андреев С. Е., Товаров В. В., Перов В. А. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. М.: Металлургиздат, 1959. 437 с.

Поступила в редакцию 11 августа 2023 года

Сведения об авторах:

Гаркави Михаил Саулович – доктор технических наук, заместитель главного инженера ЗАО «Урал Омега». E-mail: gms@uralomega.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1912-5415>

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова; ведущий научный сотрудник отдела горной экологии Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН. E-mail: o.gorlova@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1142-0652>

Колодежная Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН; инженер-исследователь ЗАО «Урал Омега». E-mail: kev@uralomega.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0252-4479>

Колкова Мария Сергеевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: kolkova_ms@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5667-1629>

Кутлубаев Илдар Мухаметович – доктор технических наук, профессор кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: ptmr74@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1761-4259>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-79-90

Analyzing the characteristics of smelter slag crush granulometric composition with regard to different crushability of size fraction

Mikhail S. Garkavi¹, Olga E. Gorlova^{2,3}, Ekaterina V. Kolodezhnaia^{3,1}, Mariia S. Kolkova², Ildar M. Kutlubaev²

¹ ZAO Ural-Omega, Magnitogorsk, Russia.

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

³ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON), Moscow, Russia.

Abstract

Research objective is to carry out mathematical modeling of the smelter slag crushing process in its processing flow schemes to increase the efficiency of valuable component extraction and optimize energy costs. The metal extraction efficiency in the process of slag magnetic separation will depend on the amount of size classes formed during crushing, corresponding to the grain size of the valuable component. To implement such crushing by technical means without re-grinding, it is necessary to adapt the crusher operation parameters.

Methods of research included the determination of the chemical and phase composition of the 0–70 mm converter slag sample of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, fractionation into size classes of 0–5 mm, 5–10, 10–20 mm, determination of the magnetic fraction content in them. Non-magnetic particles of three size fractions were crushed in a ДЦ-0.36 centrifugal impact crusher when the linear speed of accelerator rotation is varied from 30 to 90 m/s and crush granulometric composition is determined.

Results and analysis. The grain composition of the slag crush was approximated by the classical Rozin–Rammler equation. For this purpose, the parameter characterizing the size of the crushed material, and the parameter characterizing the uniformity of the grain composition, were determined. The equations are determined describing these parameters as the value of the converter slag size function entering the crushing at a given speed of accelerator rotation.

Conclusions. The developed electronic form for calculating the parameters of the ДЦ-0.36 crush grain composition makes it possible to predict the transformation of the slag crush grain composition when the parameters of the stock material and the operating parameters of the crusher change, and thereby indirectly predict the effectiveness of subsequent magnetic separation of slag.

Keywords: mathematical modeling; crushing; smelter slag; distribution functions; granulometric composition; particle size; size fractions.

REFERENCES

1. Chanturiia V. A., Shadrinova I. V. (eds.) *Green processing of mining waste: monograph*. Moscow: Sputnik+ Publishing; 2018. (In Russ.)
2. Shen H., Forssberg E. An overview of recovery of metals from slag. *Waste Management*. 2003; 23: 933–949. Available from: doi: 10.1016/s0956-053x(02)00164-2
3. Niladri Shekhar Samanta, Pranjali P. Das, Simons Dhara, Mihir K. Purkait. An overview of precious metal recovery from steel industry slag: recovery strategy and utilization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023; 62(23): 9006–9031. Available from: doi: 10.1021/acs.iecr.3c00604
4. Sultamurat G. I., Boranbaeva B. M., Maksyutin L. A., Aktaeva N. A. Evaluation of possibility of converter slag utilization in the conditions of «ArcelorMittal Temirtau» JSC. *Chernye Metally*. 2015; 11: 26–31.

5. Reuter M., Xiao Y., Boin U. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes. In: *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004. P. 349–356.

6. Naidu T. S., Sheridan C. M., van Dyk L. D. Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses. *Minerals Engineering*. 2020; 149: Art. 106234. Available from: doi: 10.1016/j.mineng.2020.106234

7. Bulatov K. V., Gazaleeva G. I. (eds.) *Advanced technologies of technogenic raw material processing: monograph*. Ekaterinburg: Uralskii Rabochii Publishing; 2019. (In Russ.)

8. Gazaleeva G. I., Mamonov S. V., Bratygin E. V., Kliushnikov A. M. Problems and innovation solution in technogenic raw material beneficiation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 1: 257–272. (In Russ.)

9. Kuznetsov A. V., Petrov V. V. On exercising the power of industrial waste management by the Ministry of natural resources of the Sverdlovsk region in 2017. In: *The fundamental research and application development of man-made mineral formations processing and utilization: Proceedings of the 5th Forum Uralian market of scrap metal, industrial and household waste*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2017. p. 18–21. (In Russ.)

10. Shadrunova I. V., Gorlova O. E., Orekhova N. N., Kolodezhnaia E. V. Resource saving and liquidation of accumulated environmental damage in the old industrial regions during the processing of slags of metallurgical production. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; S1: 300–320. (In Russ.)

11. Garabrina L. A., Kurgan T. A., Ignatieva N. S. *Steelmaking slag processing in PJSC MMK*. Moscow: Metallurg Publishing; 2000. (In Russ.)

12. Chizhevskii V. B., Grishin I. A., Shvakuleva O. P. Development of high-efficient technologies of deep processing and comprehensive utilization of steel slags. *Chernye Metally*. 2016; 9(1017): 18–23. (In Russ.)

13. Demin B. L., Sorokin Yu. V., Smirnov L. A., Shcherbakov Ye. N. Secondary recycling of smelter slags. In: *IV Congress Fundamental Research and Applied Developing of Recycling and Utilization Processes of Technogenic Formations*. 2020. P. 593–600.

14. Foniok K., Matejka V., Maierová P., Vlček J. Separation of the magnetic fraction from the slags originated during steel production. *Proceedings 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Brno, Czech Republic, EU, May 26–28, 2021. P. 153–158. Available from: doi: 10.37904/metal.2021.4092

15. D. Satish Kumar, Rameshwar Sah, Sarbendu Sanyal, Ganapathi Prasad. Measurement of metallic iron in steel making slags. *Measurement*. 2018; 131: 156–161. Available from: doi: 10.1016/j.measurement.2018.08.066

16. Shadrunova I. V., Ozhogina E. G., Kolodezhnaya E. V., Gorlova O. E. Slag disintegration selectivity. *Journal of Mining Science*. 2013; 49(5): 831–838.

17. Shadrunova I. V., Gorlova O. E., Kolodezhnaia E. V. Technology for producing high-grade concentrates from waste metallurgical slags. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2019; 4: 54–60. (In Russ.)

18. Nicolov S. Modelling and simulation of particle breakage in impact crusher. In: *International Journal of Mineral Processing*. 2004; 74S: 219–S225. Available from: doi: 10.1016/j.minpro.2004.07.031

19. Shishkin A. S. Granulometric composition approximation by finite distributions. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*. 2009; 4: 78–81. (In Russ.)

20. Chupshev V. B. Mathematical method of determination of granular materials' grain characteristics. *Izvestia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Journal of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2006; 8(4): 1153–1155. (In Russ.)

21. Vorobiev V. A., Ivanov E. N., Larionov A. N., Ryazanov M. A. Dry technologies of ore preparation as a tool for increasing extraction of valuable components. In: *Proceedings of 29th International Mineral Proceedings Congress (IMPC 2018), Moscow, 17–21 September 2018*. Moscow: International Agency of Congress Management (MAKO); 2019. P. 708–715.

22. Ryabchikov M., Burnashev R. Selection of the technological line structure for the building aggregates production using centrifugal impact crushers. *Architecture and Engineering*. 2019; 4(1): 32–37. Available from: doi: 10.23968/2500-0055-2019-4-1-32-37

23. Khopunov E. A. Ore dressing and the development of mineral raw material processing procedures. *Sovremennye nauchnye issledovaniia i innovatsii = Modern Scientific Researches and Innovations*. 2019; 9. (In Russ.) Available from: <http://web.snauka.ru/issues/2019/09/90291> [Accessed 17 September 2020].

24. Gazaleeva G. I., Bulatov K. V. Choosing special methods of selective disintegration and schemes for complex refractory ore. *Minerals and Mining Engineering*. 2022; 1: 45–57. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-1-45-57

25. Andreev S. E., Tovarov V. V., Perov V. A. *The crushing laws and granulometric composition characteristics calculation*. Moscow: Metallurgizdat Publishing; 1959. (In Russ.)

Information about the authors:

Mikhail S. Garkavi – DSc (Engineering), deputy chief engineer, ZAO Ural-Omega. E-mail: gms@uralomega.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1912-5415>

Olga E. Gorlova – DSc (Engineering), Professor of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University; leading researcher, Mining Ecology Department, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON). E-mail: o.gorlova@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1142-0652>

Ekaterina V. Kolodezhnaia – PhD (Engineering), leading researcher, Mining Ecology Department, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON); research engineer, ZAO Ural-Omega. E-mail: kev@uralomega.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0252-4479>

Mariia S. Kolkova – PhD (Geology and Mineralogy), senior lecturer, Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: kolkova_ms@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5667-1629>

Ildar M. Kutlubaev – DSc (Engineering), Professor of the Department of Mining Machinery and Transportation Technological Complexes, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: ptmr74@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1761-4259>

Для цитирования: Гаркави М. С., Горлова О. Е., Колодежная Е. В., Колкова М. С., Кутлубаев И. М. Расчет характеристики гранулометрического состава продуктов дробления металлургического шлака с учетом различной дробимости фракций крупности // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 6. С. 79–90. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-79-90

For citation: Garkavi M. S., Gorlova O. E., Kolodezhnaia E. V., Kolkova M. S., Kutlubaev I. M. Analyzing the characteristics of smelter slag crush granulometric composition with regard to different crushability of size fraction. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023. № 6. С. 79–90 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-79-90