

- Переводится на английский язык фирмой SPRINGER/www.springerlink.com
- Входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней
- Представлен в информационных системах: Web of Science, SCOPUS, РИНЦ и "Science Index"

Издатель – ООО «Металлургиздат»

При поддержке:

ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,
Центрального Совета Горно-металлургического
профсоюза России (ЦС ГМПР)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Безымянных А.А. – председатель Горно-металлургического профсоюза России

Гугис Н.Н. – президент ООО «Корпорация производителей черных металлов»

Еремин Г.Н. – заместитель генерального директора ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

Окуньков А.М. – исполнительный директор Ассоциации промышленников горно-металлургического комплекса России

Орлов В.В. – генеральный директор АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Романов А.Г. – президент Российского Союза поставщиков металлопродукции

Семенов В.В. – генеральный директор ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

Сивак Б.А. – первый заместитель генерального директора АО АХК «ВНИИМТМАШ им. академика А.И. Целикова»

Смирнов Л.А. – академик РАН, ИМЕТ УРО РАН, АО «Уральский институт металлов»

Тарасенко М.В. – депутат Госдумы ФС РФ, секретарь ЦС ГМПР по связям с Федеральным Собранием и международными объединениями профсоюзов

НАУЧНЫЕ КОНСУЛЬТАНТЫ:

Кашакашвили Г.В., д-р техн. наук; **Кондратов Л.А.**, канд. техн. наук;

Морозов Ю.Д., канд. техн. наук; **Новоселова О.Н.**

РЕДАКЦИЯ:

Иванова Е.Х. – главный редактор

Гавриченко Е.Л. – ответственный секретарь

Чевская Д.А. – ведущий редактор

Паршина И.Я. – редактор-корректор

Издание зарегистрировано в Комитете РФ по печати 15.04.1997 г.

Регистрационный номер 015957

Перепечатка материалов журнала «Металлург» допускается только с письменного разрешения редакции.

При цитировании ссылка обязательна.

Номер подписан в печать 23.08.2024 г. Формат 60×88 1/8. Отпечатано в типографии ООО «Металлургиздат», Москва.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Амежнов А.В. – канд. техн. наук, зам. директора Научного центра технологий и производства сталей специального назначения ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» (Москва)

Бабенко А.А. – д-р техн. наук, чл.-корр. РИА, руководитель отдела черной металлургии Института металлургии Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург)

Бижанов А.М. – канд. техн. наук, член Международного института по брикетированию и окускованию; ведущий эксперт проекта кафедры Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСИС» (Москва)

Галкин С.П. – д-р техн. наук, проф. кафедры Обработки металлов давлением НИТУ «МИСИС» (Москва)

Горбатов С.М. – д-р техн. наук, проф. кафедры Инжиниринга технологического оборудования НИТУ «МИСИС» (Москва)

Гуревич Л.М. – д-р техн. наук, зав. кафедрой Материаловедение и композиционные материалы, Волгоградский государственный технический университет (г. Волгоград)

Илларионов А.Г. – канд. техн. наук, доцент кафедры Термообработки и физики металлов Института новых материалов и технологий УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Кац Я.Л. – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» (Москва)

Квятковский С.А. – д-р техн. наук, зав. лабораторией пирометаллургии тяжелых цветных металлов АО «Институт Металлургии и Обогащения» (г. Алматы)

Матросов М.Ю. – зам. главного редактора, канд. техн. наук, директор Центра сталей для труб и сварных конструкций ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» (Москва)

Настич С.Ю. – д-р техн. наук, главный научный сотрудник Корпоративного НТЦ развития трубной продукции и технологии сварки ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва)

Пышминцев И.Ю. – д-р техн. наук, генеральный директор ОАО «РусНИТИ» (г. Челябинск)

Самодурова М.Н. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой ИНИТ ЮУрГУ, руководитель Ресурсного центра спецметаллургии и НИЛ «Механика, лазерных процессов и цифровых производственных технологий» (г. Челябинск)

Скопов Г.В. – д-р техн. наук, главный специалист отдела металлургии меди и драгметаллов Управления стратегического планирования ОАО «УГМК» (г. Верхняя Пышма, Свердловская обл.)

Скрипаленко М.М. – канд. техн. наук, доцент кафедры Обработки металлов давлением НИТУ «МИСИС» (Москва)

Тиняков В.В. – канд. техн. наук, Научный центр металлургических технологий доменного, ферросплавного и сталеплавильного производства им. Н.П. Лекишева ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» (Москва)

Травянов А.Я. – канд. техн. наук, директор Института Экотехнологий и инжиниринга НИТУ «МИСИС» (Москва)

Тютюник С.В. – канд. техн. наук, начальник отдела Анализа металлургических процессов ПАО ТМК (Москва)

Филиппов Г.А. – д-р техн. наук, проф., директор Научного центра качественных сталей ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» (Москва)

Шаталов Р.Л. – д-р техн. наук, проф., Московский политехнический университет

Шумилова Л.В. – д-р техн. наук, проф., Забайкальский государственный университет, председатель Забайкальского регионального отделения РАЕН (г. Чита)

Эфрон Л.И. – д-р техн. наук, научный руководитель, Дирекция по развитию технологии и продуктов, АО «ВМЗ» (г. Выкса, Нижегородская обл.)

YUBILEES

- Academician L.A. Smirnov is 90 years old
Boris Alexandrovich Sivak is 75 years old
Double anniversary (To the 40th anniversary of the scientific work of I.G. Rodionova at the I.P. Bardin Central Research Institute)

PROCESSES AND TECHNOLOGIES

Ferrous Metallurgy

- Nastich S.Yu., Lopatkin V.A., Egorov V.A., Arabey A.B., Mikhalev A.Yu.** Influence of microstructure of pipeline steel and welded joints on fracture resistance at hydrogen testing
- Goli-Oglu E.A., Filatov A.N.** Specific features of separations in fracture after ctod tests of low-carbon microalloyed offshore steel S460MLO
- Arutyunyan N.A., Koldaev A.V., Stepanov A.B., Dunaev S.F.** Effect of non-metallic inclusions and phase precipitates on the resistance of low-carbon microalloyed steels to fatigue failure
- Romanenko V.P., Fomin A.V., Sevastyanov A.A., Filippov G.A., Livanova O.V., Radzhabov D.R.** Comparison of mechanical properties of very thick-walled wheel steel shells, grade T, anufactured by skew piercing method
- Aldunin A.V.** Opportunities for improving technology and equipment for continuous hot rolling of steel strips

Composite materials • Coatings

- Demakov S.L., Illarionov A.G., Stepanov S.I., Karabanalov M.S., Shabanov M.A., Popov A.A.** The influence of thermal effects on the structure, phase composition, properties of an alloy based on orthorhombic titanium aluminide obtained by selective laser alloying

Powder Metallurgy

- Smolentsev A.S., Trushnikov D.N., Permyakov G.L., Veselova V.E., Votina E.B.** Layered synthesis of workpieces by the method of MIG-PULSE surface with the use of austenitic metal-core wire with nitrogen
- Tkacheva A.V., Abashkin E.E.** Application of flux-cored wire with aluminothermic filler for electric arc welding of E40 steel at low temperature

ЮБИЛЕИ

- 4 Академику Л.А. Смирнову – 90 лет
6 Борису Александровичу Сиваку – 75 лет
7 Двойной юбилей (К 40-летию научной работы И.Г. Родионовой в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина)

ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Черная металлургия

- 9 **Настич С.Ю., Лопаткин В.А., Егоров В.А., Арабей А.Б., Михалев А.Ю.** Влияние структуры металла труб и их сварных соединений на сопротивляемость разрушению при испытаниях в водороде
- 19 **Голи-Оглу Е.А., Филатов А.Н.** Особенности разрушения с расщеплениями низкоуглеродистой микролегированной морской стали S460MLO при испытаниях на раскрытие трещины
- 26 **Арутюнян Н.А., Колдаев А.В., Степанов А.Б., Дунаев С.Ф.** Влияние неметаллических включений и фазовых выделений на стойкость низкоуглеродистых микролегированных сталей к усталостному разрушению
- 37 **Романенко В.П., Фомин А.В., Севастьянов А.А., Филиппов Г.А., Ливанова О.В., Раджабов Д.Р.** Сопоставление механических свойств особотолстолистовых гильз из колесной стали марки Т, полученных способом винтовой прошивки
- 43 **Алдунин А.В.** Возможности совершенствования технологии и оборудования для непрерывной горячей прокатки стальных полос

Композиционные материалы • Покрытия

- 47 **Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Степанов С.И., Карабаналов М.С., Шабанов М.А., Попов А.А.** Влияние термического воздействия на структуру, фазовый состав, свойства сплава на основе орторомбического алюминиды титана, полученного селективным лазерным сплавлением

Порошковая металлургия

- 55 **Смоленцев А.С., Трушников Д.Н., Пермяков Г.Л., Веселова В.Е., Вотинова Е.Б.** Влияние межслойной проковки на структуру и свойства заготовки, выращенной методом MIG-PULSE наплавки с использованием аустенитной порошковой проволоки с азотом
- 60 **Ткачева А.В., Абашкин Е.Е.** Применение порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем для электродуговой сварки стали E40 при низкой температуре

**MATERIALS SCIENCE • TECHNOLOGIES
OF STRUCTURAL MATERIALS**

Gurevich L.M., Danenko V.F. Optimization of structural and geometric parameters of lightning protection cable with an optical communication module

Albul S.V., Kobelev O.A., Levitskii I.A. Effect of supplying natural gas through flange holes on operation of BF tuyere with heat-insulating insert in blast channel

Brover G.I., Shcherbakova E.E. Metallophysical research stress relaxation effects in zones of extreme thermal effects by laser radiation on alloys

Latypov R.A., Starovoytov D.K., Nedashkovsky K.I., Voronkova E.V., Semenov D.S. Electric arc welding of parts made of powder alloy EK-61 using direct laser growing

PROCESS SIMULATION • AUTOMATION

Bizhanov A.M. Models of optimal packaging in the tasks of determining the porosity of agglomerated products

RARE EARTHS AND RARE ELEMENTS IN METALLURGY

Konstantinov I.L., Baykovskiy Yu.V., Yuriev P.O., Bezrukikh A.I., Sidelnikov S.B., Saparova A.S., Mansurov Yu.N., Partyko E.G., Bozhko D.N. Study of deformability during rolling of aluminum alloy 1580 doped with small additives of erbium and ytterbium

Idiev I.Sh., Norova M.T., Ganiev I.N. The effect of scandium, yttrium and lanthanum on corrosion and electrochemical properties zinc alloy TSAMG4.5-2

PROCESSING OF TECHNOGENIC MATERIALS

Zharov M.V. New technologies for processing picks waste titanium alloys without metal remelting with receipt of finished products

Demin B.L., Shcherbakov E.N., Shcherbakov A.E. Testing of the technology for processing slag of the precious metals shop in a rotary-type unit

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ • ТЕХНОЛОГИИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

66 Гуревич Л.М., Даненко В.Ф. Оптимизация конструктивно-геометрических параметров грозозащитного троса с оптическим модулем связи

72 Албул С.В., Кобелев О.А., Левицкий И.А. Влияние подачи природного газа через отверстия во фланце на работу воздушной фурмы доменной печи с теплоизолирующей вставкой в дутьевом канале

79 Бровер Г.И., Щербакова Е.Е. Металлофизические исследования эффектов релаксации напряжений в зонах экстремального теплового воздействия лазерного излучения на сплавы

87 Латыпов Р.А., Старовойтов Д.К., Недашковский К.И., Воронкова Е.В., Семенов Д.С. Электродуговая сварка деталей, изготовленных из порошкового сплава ЭК-61 методом прямого лазерного выращивания

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ • АВТОМАТИЗАЦИЯ

91 Бижанов А.М. Модели оптимальной упаковки в задачах определения пористости окускованных продуктов

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ И РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МЕТАЛЛУРГИИ

97 Константинов И.Л., Байковский Ю.В., Юрьев П.О., Безрукых А.И., Сидельников С.Б., Сапарова А.С., Мансуров Ю.Н., Партыко Е.Г., Божко Д.Н. Исследование деформируемости при прокатке алюминиевого сплава 1580, легированного малыми добавками эрбия и иттербия

102 Идиев И.Ш., Норова М.Т., Ганиев И.Н. Влияние скандия, иттрия и лантана на коррозионно-электрохимические свойства цинкового сплава ЦАМг4.5-2

ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

109 Жаров М.В. Новые технологии переработки стружечных отходов титановых сплавов без переплава металла с получением готовых изделий

117 Демин Б.Л., Щербаков Е.Н., Щербаков А.Е. Испытание технологии переработки шлаков цеха драгметаллов в установке роторного типа

Адрес редакции

105005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 9/23, стр. 1, оф. 474.

Тел.: +7 (495) 777-9561, (495) 926-3881, (495) 777-9524

E-mail: metallurgizdat@yandex.ru, info@metallurgizdat.com

www.metallurgizdat.com

МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОЙ УПАКОВКИ В ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ ОКУСКОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

Айтбер Махачевич Бижанов, канд. техн. наук, bizhanov@briquet-brex.ru

Университет науки и технологий «МИСИС», Москва, Россия

Аннотация. В статье с позиций теории упаковки сфер изучено влияние гранулометрического состава материала на пористость брикетов и окатышей, а также фракционного состава окучкованных продуктов на порозность слоев из таких шихтовых компонентов. Знание закономерностей изменения пористости окучкованного продукта при варьировании гранулометрии исходного материала позволяет оптимизировать металлургические свойства брикета и окатышей. Порозность слоя таких продуктов во многом определяет их поведение как в процессах восстановления (в доменных и руднотермических печах, в реакторах прямого восстановления), так и при обжиге окатышей. Полученные результаты позволили впервые выявить локальные экстремумы пористости окучкованных продуктов и порозности слоя окатышей (брикетов). Разработанный эвристический подход может быть использован в задачах выбора оптимального состава смесей для окучкования и повышения эффективности обжига окатышей и достижения высоких степеней металлизации при восстановлении окучкованной шихты. Методология предложенного подхода позволяет учитывать сжимаемость и неоднородность формы как частиц исходной смеси, так и самих окучкованных продуктов.

Ключевые слова: брикеты, окатыши, восстановимость, сферическая упаковка, эвристика, нелинейная оптимизация, пористость

MODELS OF OPTIMAL PACKAGING IN THE TASKS OF DETERMINING THE POROSITY OF AGGLOMERATED PRODUCTS

Aitber M. Bizhanov

National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

Abstract. In the article, from the standpoint of the theory of sphere packing, the influence of the granulometric composition of the material on the porosity of briquettes and pellets, and the fractional composition of agglomerated products on the porosity of layers of such charge components is studied. Knowledge of the patterns of changes in the porosity of the agglomerated product when varying the granulometry of the starting material makes it possible to optimize the metallurgical properties of the briquette and pellets. The porosity of the layer of such products largely determines their behavior both in reduction processes (in blast furnaces and ore furnaces, in direct reduction reactors) and during pellet roasting. The results obtained made it possible for the first time to identify local extrema in the porosity of agglomerated products and the porosity of the layer of pellets (briquettes). The developed heuristic approach can be used in the problems of selecting the optimal composition of mixtures for agglomeration and increasing the efficiency of pellet firing and achieving high degrees of metallization when restoring the agglomerated charge. The methodology of the proposed approach makes it possible to take into account the compressibility and heterogeneity of the shape of both the particles of the initial mixture and the agglomerated products themselves.

Keywords: briquettes, pellets, reducibility, porosity, spherical packaging, heuristics, nonlinear optimization

Введение. В большинстве современных металлургических процессов с использованием окучкованной шихты восстановимость является ключевым фактором получения продукта с требуемыми металлургическими свойствами. В свою очередь, восстановимость в значительной степени определяется пористостью окучкованного продукта. Одним из важнейших факторов, характеризующих пористость окучкованных продуктов, является гранулометрический состав материала. Не менее важным фактором достижения требуемого уровня качества окучкованных продуктов при обжиге (окатыши) и дальнейшей металлизации шихты в металлургических печах и реакторах является порозность слоя окучкованных продуктов.

Известно, что смешиванием железорудных концентратов различной дисперсности можно добиться увеличения прочности на сжатие окатышей, получаемых из таких смесей. Так, при смешивании «тонкого» (90,3% частиц размерами менее 0,044 мм) и «грубого» (80,8% частиц размерами менее 0,044 мм и 15,7% частиц в диапазоне 0,044–0,074 мм концентратов наилучшие показатели по прочности окатышей дает соотношение «тонкого» и «грубого» концентратов как 70:30 при минимальном значении прочности окатышей в случае соотношения концентратов 50:50 [1]. Прочность окатышей возрастает (с 2,3 до 2,8 кН/окатыш) при снижении общей пористости (с 48,76 до 37,09%).

В работе [2] было описано, что при автоклавном производстве железорудных окатышей рост их прочности при переходе от тонкого гематитового концентрата (удельная площадь поверхности 2700 г/см^2) к смеси грубого (удельная площадь поверхности 109 г/см^2) и тонкого концентратов, взятых в пропорции 2:1, составил 100%.

Применительно к брикетированию обеспечение высокой прочности брикета само по себе не является достаточным условием получения окускованных продуктов с высокими металлургическими свойствами. Минимизация пористости брикета отрицательно влияет на его восстановимость из-за уменьшения доли объема, не занятого твердой фазой, и уменьшения площади поверхности, доступной для воздействия газов-восстановителей.

Выбор технологии жесткой экструзии обусловлен именно возможностью достижения механической прочности, достаточной для немедленной транспортировки сырых экструдированных брикетов в сочетании с пористостью, сравнимой с пористостью обожженных окатышей.

Практика экструзионного окускования показывает, что наибольшие трудности вызывает брикетирование отдельного мелкофракционного материала, состоящего из частиц размерами в узком диапазоне от десятков до 100 мкм. Плотность упаковки таких частиц снижает суммарную поверхность, доступную для действия пластифицирующих добавок. Возможность достижения пластичности является критической для производства брикетов экструзии (брэксков). Добавление 10–15% более крупных частиц позволяет упростить процесс экструзии и приводит, в том числе, к росту прочности брэксков. Крупные частицы создают своеобразный каркас, облегчающий продавливание пластифицированной смеси и поддерживающий пористую структуру брэкса.

При замене цемента (5 масс. %) с частицами размером менее 32 мкм в брикетах, предназначенных для реакторов прямого восстановления, известью (5 масс. %) с частицами более крупных размеров (52,6 мкм) пористость увеличилась и составила 21,25% против 20,88% до такой замены. Для других брикетов, практически из тех же материалов, замена извести (52,6 мкм, 5 масс. %) связующим на основе сульфата магния (0,1–1,0 мм, 55 масс. %) привела к снижению пористости с 29,7 до 25,4% [3, 4].

Выявление закономерностей взаимосвязи гранулометрического состава окусковываемого материала и пористости продукта приобретает важное значение.

Постановка задачи. Влияние фракционного состава окускованных продуктов на поведение в окислительных и восстановительных атмосферах изучалось и в связи с задачами определения порозности слоя многокомпонентных металлургических шихт. Изучались главным образом закономерности формирования структуры в процессе окускования мелкофракционных материалов в контексте решения экстремальных задач на максимизацию и минимизацию порозности шихты. Первая задача связана с необходимостью

достижения высокой газопроницаемости слоя кусковых материалов в доменной печи или на ленте конвейерной агломерационной машины, вторая направлена на увеличение прочности окускованного сырья.

В процессе обжига достижение оптимальной порозности слоя без ущерба для производительности имеет решающее значение для обеспечения эффективной теплопередачи, распределения газового потока и, в конечном итоге, для достижения требуемого качества окатышей. Порозность, на которую влияют такие факторы, как распределение окатышей по размерам, прочность на сжатие в сыром виде, прочность на сжатие в сухом состоянии и т.д., существенно влияет на эффективность обжига.

Эффективность обжига в современной научной литературе изучается с использованием различных математических моделей, учитывающих совокупность важнейших параметров процесса, которые, тем не менее, не позволяют адекватно выделить роль порозности слоя при изменении фракционного состава окускованных продуктов [5–7]. К примеру, взаимосвязь между размером окатышей и порозностью слоя остается недостаточно изученной, что может приводить к нестабильному качеству обожженных окатышей. Исследование связи между распределением окатышей по размерам и порозностью слоя окатышей, важной для оптимизации процесса обжига, не утрачивает актуальности. Не менее важна и оптимизация порозности доменной шихты.

Отсутствие четкого алгоритма оптимизации гранулометрического состава компонентов брикета (окатышей) и фракционного состава окатышей (брикетов) в слое делает отмеченную процедуру эмпирической.

Цель данной работы – попытка разработать новый подход к выбору алгоритма такой оптимизации с использованием теории упаковки сфер на основе эвристического подхода.

Изучено влияние количества и размера добавляемых (более крупных) частиц сферической формы на пористость брикета или окатыша. В задачах упаковки сфер предполагается, что такие объекты должны быть полностью размещены внутри контейнера при оптимизации размеров или объема контейнера. Различные методы решения проблемы упаковки сфер основаны на представлении геометрического размещения, вероятностных подходах, эвристике и метаэвристике, математическом программировании и гибридных подходах. Методы геометрического размещения основаны на геометрических принципах и моделировании для определения оптимального размещения сфер, обеспечивающего их равномерное распределение [8]. Важные результаты были получены также при использовании подхода на основе искусственных нейронных сетей, для исследования прочности окатышей [9] и порозности слоя окатышей на обжиговой машине [10]. Вероятностные методы, такие как метод Монте-Карло [11, 12] и алгоритмы стохастической оптимизации [13], основаны на вероятностных моделях и статистическом анализе. Эвристический подход основан на знаниях и интуиции,

специфичных для предметной области, для поиска решений с использованием разумных предположений и с применением эмпирических правил. Эвристика для упаковки сфер включает в себя такие стратегии, как «жадные алгоритмы», последовательное сложение, метод спуска блочных координат и другие методы [14–16].

Метаэвристика – это стратегия более высокого уровня, которая направляет процесс поиска путем итеративного исследования пространства решений, рассмотрения множества возможных решений и постепенного их уточнения. В отличие от специфической эвристики, метаэвристика применима к широкому кругу задач. Популярны метаэвристические алгоритмы, используемые при упаковке сфер, включают моделирование обжига [17], генетические алгоритмы [18], оптимизацию роя частиц [19], оптимизацию колоний муравьев [20] и табу-поиск [21]. Эти алгоритмы часто включают в себя случайность и механизмы, позволяющие сбалансировать поиск новых решений и использование перспективных.

Алгоритмы, основанные на математическом программировании, используются для решения проблем упаковки сфер, формулируя их как задачи математической оптимизации [22].

В настоящей работе рассмотрена задача упаковки сфер, моделирующая либо частицы окучковываемой смеси, либо сами окучкованные продукты в слое. Задача состоит в выборе способа упаковки набора непересекающихся сфер в куб

минимального объема. Постановка задачи сводится к многоэкстремальной задаче нелинейного программирования.

Смесь для окучкования или слоя окучкованных продуктов рассматривается как набор шаров переменных радиусов. Задачу минимизации объема куба можно свести к задаче минимизации его ребра, т.е. рассматривать линейную функцию цели. Согласно классификации задач упаковки, такая модель относится к ODP моделям (Open Dimension Problem) с переменной метрической характеристикой. Важным фактором успешного решения таких задач является выбор допустимой стартовой точки. Предложен подход, основанный на поиске локальных экстремумов величины суммы радиусов взаимно непересекающихся шаров.

Методика проведения исследований. Для выбора стартовой точки в работе использован алгоритм, изображенный на рис. 1. Важно, чтобы при выборе такой точки учитывалась особенность взаимного расположения шаров, что, как правило, приводит к упаковке шаров с небольшим коэффициентом заполнения. В этой связи предлагается эвристический алгоритм, учитывающий метрические характеристики размещаемых шаров и кубического контейнера. Алгоритм формирования допустимых стартовых точек (Generating Feasible Starting Points – GFSP) описан в работе [22]. Адаптированный к условиям рассматриваемой задачи способ построения допустимой стартовой точки задачи позволил эффективно использовать свободное место в кубе.

Найденная точка локального максимума выбирается в качестве стартовой точки для исходной задачи упаковки шаров.

Для решения задачи используется метод мультистарта, т.е. выбираются несколько стартовых точек, полученных при решении задачи оптимизации целевой функции. В вычислительных экспериментах выбирались 100 стартовых точек.

Вычислительные эксперименты проведены для одно- и двухкомпонентных смесей сфер. Первая группа (фракция) сфер состоит из 100 сфер единичного радиуса. Во вторую группу (фракцию) входят 5, 10, ..., 25 равных сфер большего радиуса – 3, 4, ..., 15. Для различных взаимных количеств сфер, отличающихся величинами радиусов, минимизируется длина ребра куба и рассчитывается полученный коэффициент пористости. Строго говоря, коэффициент пористости в рассматриваемой формулировке отличается от пористости в ее классическом определении (доли объема материала, не занятой твердой массой), поскольку при такой идеализации предполагается, что внутри находятся только целые сферы, куб. Фрагменты сфер из участков брикета, прилегающих к кубу, не учитываются.

Сначала рассматривается случай сфер одинакового размера. Полученное значение пористости



Рис. 1. Структурная схема алгоритма выбора куба минимального объема, вмещающего непересекающиеся сферы

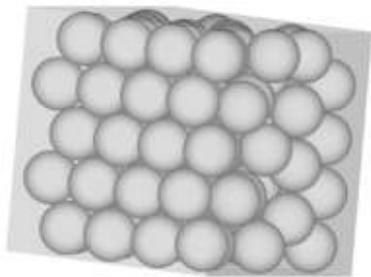


Рис. 2. Упаковка 100 сфер радиусом единица

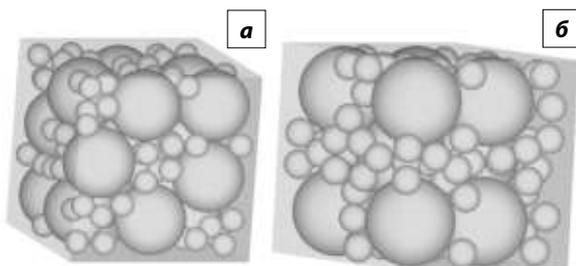


Рис. 3. Оптимизированные упаковки двухкомпонентной смеси сфер: а – 100 сфер радиусом 1 и 10 сфер радиусом 3; б – 100 сфер радиуса 1 и 15 сфер радиуса 3

составляет 0,4383 при минимальной длине ребра куба 9,0701 (рис. 2).

Результаты эксперимента с двухкомпонентными смесями сфер приведены в табл. 1. В первом столбце таблицы указаны радиусы сфер, составляющих вторую группу. В последующих столбцах – значения полученной минимальной длины ребра куба/коэффициента пористости для смеси, состоящей из 1 и 5, 10, ..., 25 сфер соответствующих радиусов, указанных в первом столбце. Например, для смеси, содержащей сферы единичного радиуса и 20 сфер радиуса 7, минимальная длина ребра куба равна 39,2361, а коэффициент пористости – 0,5173. Все значения длины ребра куба и коэффициента пористости приведены с округлением до третьего десятичного знака.

На рис. 3 показаны варианты упаковки двухкомпонентной смеси из 100 сфер. Первая смесь состоит из 100 сфер радиуса 1 и 10 сфер радиуса 3. Вторая – 100 сфер радиуса 1 и 15 сфер радиуса 3.

При таком подходе к исходной фракции добавляется фракция более крупных частиц. В действительности обычно происходит замещение части мелкой фракции более крупными частицами. Приведенные выше результаты можно просто привести в соответствие с реальностью путем простого пересчета. Так, при добавлении 20 сфер большего радиуса к исходным 100 доля крупных сфер составляет около 17% от общего количества, а при замене 20 сфер более крупными их общее количество остается неизменным, а крупные сферы составляют 20% от общего числа сфер.

На рис. 4 представлены графики зависимости пористости от количества сфер второй группы с радиусами от 3 до 15, согласно табл. 1.

На рис. 5 представлена зависимость пористости от радиуса добавляемых частиц для различных объемов добавле-

Таблица 1. Результаты вычислительных экспериментов

Радиус сфер	Число сфер				
	$n = 5$	$n = 10$	$n = 15$	$n = 20$	$n = 25$
$r = 3$	11,810/0,402	14/0,435	15,6/0,443	16,816/0,436	17,88/0,432
$r = 4$	15,155/0,495	18,667/0,523	20,8/0,507	22,421/0,487	23,837/0,474
$r = 5$	18,944/0,553	23,333/0,555	26/0,529	28,026/0,505	29,797/0,489
$r = 6$	22,733/0,579	28/0,5687	31,2/0,539	33,631/0,513	35,756/0,496
$r = 7$	26,522/0,593	32,667/0,576	36,4/0,544	39,236/0,517	41,715/0,499
$r = 8$	30,311/0,600	37,333/0,580	41,6/0,547	44,841/0,520	47,675/0,5013
$r = 9$	34,01/0,604	42/0,582	46,8/0,549	50,446/0,521	53,634/0,503
$r = 10$	37,889/0,607	46,667/0,584	52/0,550	56,052/0,522	59,593/0,503
$r = 11$	41,677/0,609	51,333/0,585	57,2/0,551	61,657/0,523	65,553/0,504
$r = 12$	45,466/0,610	56/0,585	62,4/0,551	67,262/0,522	71,512/0,504
$r = 13$	49,255/0,611	60,667/0,586	67,6/0,552	72,867/0,523	77,471/0,504
$r = 14$	53,044/0,612	65,333/0,586	72,8/0,552	78,472/0,523	83,431/0,505
$r = 15$	56,833/0,613	70/0,587	78/0,552	84,077/0,524	89,39/0,505

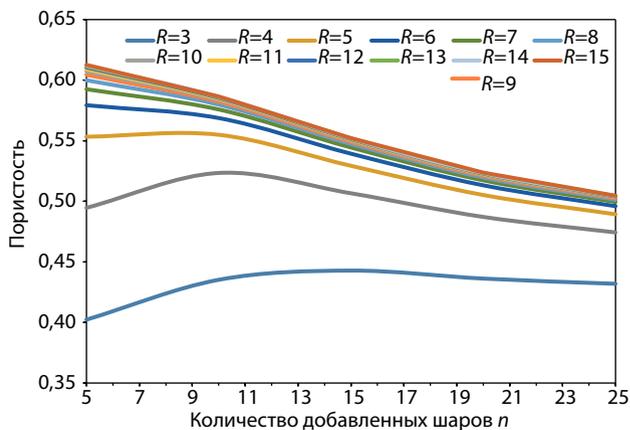


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента пористости от количества добавленных сфер радиусами от 3 до 15

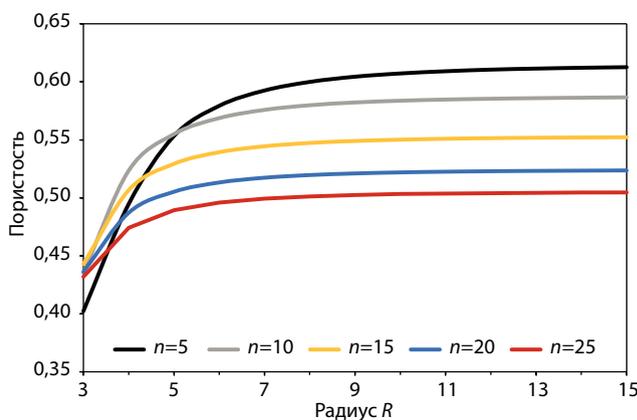


Рис. 5. Графики зависимости пористости от радиуса сферы при добавлении 5, 10, 15, 20 и 25 сфер

ния крупной фракции (5, 10, 15, 25%). Такое представление полученных результатов соответствует ситуации с фиксированным количеством крупной фракции, определяемым объемом ее образования в металлургических процессах.

Таблица 2. Фрагмент куба: $500 \times 500 \times 500$ (3–6 прогонов для каждого соотношения) 5000 сфер (t_i – фракция i ; r_i – радиус сфер фракции i ; n_i – число частиц фракции i)

Фракционный состав смеси t_1, t_2, t_3 при $r_1 = 11, r_2 = 13, r_3 = 15$	Пористость
$t_1 = 0,3333, t_2 = 0,3333, t_3 = 0,3333,$ $n_1 = 1791, n_2 = 1791, n_3 = 1791$	0,471
$t_1 = 0,5204, t_2 = 0,2860, t_3 = 0,1936,$ $n_1 = 3227, n_2 = 1773, n_3 = 1201$	0,478
$t_1 = 0,7793, t_2 = 0,2207, t_3 = 0,0000,$ $n_1 = 579, n_2 = 164, n_3 = 0$	0,459
$t_1 = 0,4349, t_2 = 0,3084, t_3 = 0,2567,$ $n_1 = 2488, n_2 = 1781, n_3 = 1474$	0,482
$t_1 = 0,2005, t_2 = 0,3333, t_3 = 0,4662,$ $n_1 = 965, n_2 = 1609, n_3 = 2249$	0,472
$t_1 = 0,0000, t_2 = 0,0000, t_3 = 1,0000,$ $n_1 = 0, n_2 = 0, n_3 = 3656$	0,454

Полученные результаты позволили впервые установить экстремальный характер зависимости пористости от количества добавляемых сфер при относительных значениях радиусов добавленных сфер в диапазоне от 3 до 5. С увеличением числа добавляемых сфер пористость сначала увеличивается, а затем монотонно уменьшается. При этом максимальные значения пористости ниже, чем при добавлении 5% сфер большего размера (радиусами от 6 до 15). Как видно из рис. 4, максимальные значения пористости (более 0,6) могут быть достигнуты добавлением 5% частиц радиусами от 12 до 15 радиусов исходных частиц. С увеличением числа добавляемых сфер таких радиусов пористость снижается до 0,5.

Немонотонный характер изменения пористости в зависимости от соотношения радиусов частиц описан также в работе [23], в которой процесс осаждения материала моделировали методом частиц. При исследовании влияния соотношения размеров частиц на пористость материала с соотношением радиусов частиц в диапазоне от 1:1 до 1:5 установлено, что пористость уменьшается с увеличением соотношения размеров в диапазоне от 1:1 до 1:1,5. При этом минимальная пористость составляет 31,92% при соотношении 1:1,5. Затем при увеличении соотношения от 1:1,5 до 1:5 пористость также увеличивается [23].

Из рис. 5 видно, что при добавлении более 10 сфер второй фракции значения пористости приближаются к асимптотическим (0,5–0,6) при относительных радиусах в диапазоне от 7 до 11 и остаются практически постоянными при больших радиусах. Установление таких зависимостей позволит также исключить излишние затраты на проведение исследований по оптимизации оптимальных размеров частиц добавляемой фракции.

Приведенные результаты вычислительных экспериментов относятся к случаю двухкомпонентных смесей, образованных добавлением более крупных частиц. Разработанная модель и эвристический алгоритм остаются справедливыми и для случая, когда в рассмотрение включается несколько

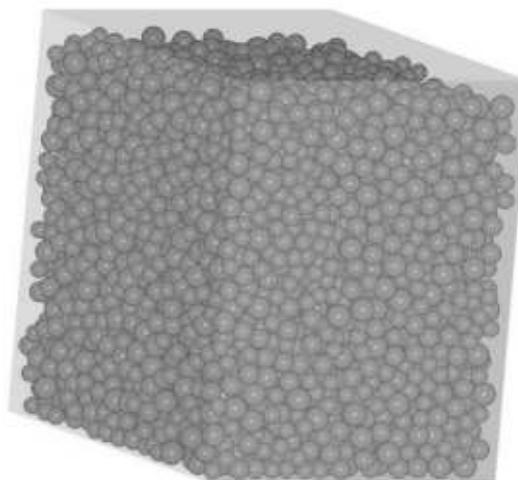


Рис. 6. Оптимизированная упаковка трехкомпонентной смеси сфер с радиусами 11, 13 и 15 (общее число сфер 6226; $n_1 = 3241, n_2 = 1804, n_3 = 1181$; доли фракций $t_1 = 0,52, t_2 = 0,29, t_3 = 0,19$; пористость 0,483)

компонентов, отличающихся радиусами сфер, что позволяет адекватно моделировать как реальный гранулометрический состав материала для окускования, так и слой из окускованных продуктов. В качестве иллюстрации в табл. 2 приведены результаты расчета пористости для смеси из трех фракций, отличающихся размерами частиц (сфер – 11, 12, 15) при различных взаимных количествах таких сфер. Общее число сфер – 5000. На рис. 6 приведена визуализация размещения трех фракций сфер (52% – размером 11, 29% – размером 13 и 19% сфер – радиусом 15), обеспечивающая пористость 0,4827.

В этой работе рассматривалась упаковка сферических частиц, что вполне приемлемо при изучении пористости окатышей. В приложении к изучению пористости индивидуального окатыша и брикета возможно рассмотрение формы частиц материала, отличной от сферической [24]. Аналогичным образом в рамках предложенной модели могут быть рассмотрены и сами окускованные продукты нерегулярной формы.

В исследовании предполагалось, что частицы являются жесткими, т.е. не меняют свою форму под давлением. Учет сжимаемости частиц, также реализуемый в рамках рассматриваемого подхода, позволяет более реалистично моделировать качественные изменения физических и механических свойств окускованного продукта.

Заключение. Таким образом, получен эффективный алгоритм прогнозирования качественных изменений физико-механических свойств брикетов при изменении гранулометрического состава брикетируемой смеси. Алгоритм позволяет определить оптимальный уровень добавок и крупность добавляемой крупной фракции для достижения необходимого уровня металлургических свойств брикетов (механическая прочность, пористость, восстановимость). Оптимизация гранулометрического состава брикетируемого материала позволит снизить затраты на подготовку брикетной шихты, дорогостоящие связующие и термическую обработку сырых брикетов.

Полученные результаты открывают новые возможности для оптимизации способов размещения мелкозернистых материалов в шихте металлургических печей и агрегатов, что приводит к снижению энергозатрат и, соответственно, выбросов при обжиге агломерата, шихты и окатышей при выплавке чугуна и стали и производстве железа прямого восстановления. Подробному рассмотрению вопросов оптимизации слоя шихты в доменных, сталеплавильных и ферросплавных печах и реакторах прямого восстановления будут посвящены следующие публикации.

Список источников

1. **Чижикова В.М., Бижанов А.М.** Зеленые технологии современного окискования: монография. М.: Инфра-Инжиниринг, 2023. 464 с.
2. **Лотош В.Е.** Безобжиговое окискование тонкодисперсных материалов и мелочи полезных ископаемых. Екатеринбург: ИД «Филантроп», 2009. 525 с.
3. **Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Уакиль Э.Х.** Поведение брикетов экструзии (БРЭКСОВ) в реакторе Midrex. Часть 1 // *Металлург*. 2015. № 4. С. 16–20.
4. **Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Уакиль Э.Х., Мишра Б.** Поведение брикетов экструзии (БРЭКСОВ) в реакторе Midrex. Часть 2 // *Металлург*. 2016. № 3. С. 112–115.
5. **Кривоносов В.А., Пирматов Д.С.** Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима // *Вестн. Воронежского гос. техн. ун-та*. 2010. Т. 6, № 5. С. 128–132. EDN MJCSIF.
6. **Dave S., Patra S., Vapat Y. et al.** A Mathematical Model for Straight-Grate Iron Oxide Pellet Induration Furnace: Formulation, Plant Scale Validation, Implementation and Control // *JOM*. 2023. Vol. 75. P. 2406–2420. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05819-1>
7. **Bobkov V.I., Morgunova E.V.** Analysis of the Granulometric Composition of the Feedstock Influence on Mechanical Properties of Iron Ore Pellets // *Materi. Sci. Forum*. 2022. Vol. 1052. P. 272–283. <https://doi.org/10.4028/p-2r8x9q>
8. **Conway J.H., Sloane N.J.A.** *Sphere Packings, Lattices and Groups* / 3rd ed. Springer Science & Business Media, 1998. 706 p.
9. **Chagas M., Machado M., Conti J.B., Frigini E.** Use of artificial neural network in determination of bed permeability during drying stage of iron ore pellets. 2015. AISTech // *Iron Steel Techn. Conf. Proc.* Vol. 1. P. 1029–1036.
10. **Dwarapudi S., Gupta P.K., Rao S.M.** Prediction of Iron Ore Pellet Strength Using Artificial Neural Network Model // *ISIJ Intern.* 2007. Vol. 47. P. 67–72.
11. **Cheng Y.F., Guo S.J., Lai H.Y.** Dynamic simulation of random packing of spherical particles // *Powder Technology*. 2000. Vol. 107 (1–2). P. 123–130. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00178-3](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00178-3)
12. **Abreu C.R.A., Macias-Salinas R., Tavare S.F.W., Castier M.** A Monte Carlo simulation of the packing and segregation of spheres in cylinders // *Brazilian J. Chem. Eng.* 1999. Vol. 16 (4). P. 395–405. <https://doi.org/10.1590/S0104-66321999000400008/>
13. **Wu Y., Zhou W., Wang B., Yang F.** Modeling and characterization of two-phase composites by Voronoi diagram in the Laguerre geometry based on random close packing of spheres // *Computational Mater. Sci.* 2010. Vol. 47, No. 4. P. 951–961. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.11.028>
14. **Kubach T., Bortfeldt A., Tilli T., Gehring H.** Greedy Algorithms for Packing Unequal Spheres into a Cuboidal Strip or a Cuboid // *Asia Pac. J. Oper. Res.* 2011. Vol. 28. P. 739–753. <https://doi.org/10.1142/S0217595911003326>
15. **Mueller G.E.** Numerically packing spheres in cylinders // *Powder Technol.* 2005. Vol. 159. P. 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.06.002>
16. **Blondel M., Seki K., Uehara K.** Block coordinate descent algorithms for large-scale sparse multiclass classification // *Mach Learn.* 2013. Vol. 93. P. 31–52. <https://doi.org/10.1007/s10994-013-5367-2>
17. **Mughal A., Chan H. K., Weaire D., Hutzler S.** Dense packings of spheres in cylinders: Simulations // *Phys. Rev.* 2012. E 85. Art. 051305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.051305>
18. **Sulaiman H.F., Sartana B.T., Budiyo U.** Genetic Algorithm With Random Crossover and Dynamic Mutation on Bin Packing Problem. In: *Proc. of the 6th Intern. Conf. on Electrical Eng., Computer Sci. and Inform. (EECSI)* (Bandung, Indonesia, 2019). P. 229–234. <https://doi.org/10.23919/EECSI48112.2019.8976943>
19. **Hifi M., Lazure D., Yousef L.** Solving packing identical spheres into a smallest sphere with a particle swarm optimization: 4th Intern. Conf. Control // *Decision and Information Technologies (CoDIT)* (Spain, 2017). P. 0892–0897. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2017.8102709>
20. **Li Z., Song B., Wang X., Li R.** A heuristic ant colony approach for the circle and rectangle packing problems with rotary inertia constraints // *Ninth Intern. Conf. on Natural Computation (ICNC)* (Shenyang, China, 2013). P. 460–465. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2013.6818020>
21. **Zhanghua Fu, Wenqi Huang, Zhipeng Lü.** Iterated tabu search for the circular open dimension problem // *European J. of Operational Research*. 2013. Vol. 225, Is. 2. P. 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.10.022>
22. **Litvinchev I., Ozuna L.** Integer programming formulations for approximate packing circles in a rectangular container // *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Vol. 2014. Art. ID 317697, 6 p. <https://doi.org/10.1155/2014>
23. **Septiawan R.R., Viridi S., Suprijadi.** The Effect of Particle Size Ratio on Porosity of a Particles Deposition Process // *KEM*. 2016. Vol. 675–676. P. 647–650. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.675-676.647>
24. **Romanova T., Pankratov A., Litvinchev I., Dubinskyi V., Infante L.** Sparse layout of irregular 3D clusters // *J. Operational Research Society*. 2023. Vol. 74, No. 1. P. 351–361. <https://doi.org/10.1080/01605682.2022.2039568>

Статья поступила в редакцию 25.06.2024; одобрена после рецензирования 01.07.2024; принята к публикации 25.07.2024