



Рудоуглеродное Брикетиrowание в Арсенале Зеленой Металлургии



Айтбер Бижанов, к.т.н., НИТУ МИСИС

Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: современная ситуация

- Несмотря на беспрецедентное ужесточение требований по радикальной декарбонизации современной черной металлургии, выплавка чугуна доменными печами продолжает оставаться стабильно доминирующим экстракционным процессом на фоне растущего разочарования первыми итогами декарбонизации.
- Себестоимость выплавки стали в варианте максимального уровня декарбонизации с использованием водорода, полученного электролизом с использованием возобновляемых источников энергии сделала бы черную металлургию нерентабельной.
- Уровень эмиссии CO₂ при традиционной схеме выплавки чугуна (агломерация/производство окатышей – доменная печь) оценивается в 1613-1760 кг CO₂ на тонну чугуна. При использовании водорода в качестве восстановителя для получения железа и выплавки стали в ДСП – сквозная эмиссия составит 1800-1900 кг CO₂.
- В краткосрочной перспективе наиболее эффективным путем снижения выбросов CO₂ является повышение энергоэффективности и внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) для КАДП. Считается что таким образом можно снизить удельные выбросы от 20 до 40-50%. Потенциал снижения выбросов за счет внедрения НДТ в КАДП, на наш взгляд, недооценен.
- Технология жесткой экструзия для производства брикетов отвечает всем требованиям, предъявляемым к НДТ. В 2017 году эта технология была включена в ИТС 26-2017 в раздел Перспективных технологий.

Сравнение параметров основных технологий окускования с позиций НДТ

	Критерий НДТ	Окускованное железорудное сырье		
		Агломерат	Окатыши	Брэксы
1	Минимальный уровень воздействия на окружающую среду, кг/т:			
	- пыль	≤1,2	≤0,6	0,05*
	- оксиды азота	≤0,55	≤0,535	0
	- диоксид серы	≤4,0	≤0,5	0
	- оксид углерода	≤14,0	~0	0
	Выбросы суммарно, кг/т	≤20	≤2	≤0,05
2	Потребление ресурсов:			
	- твердое топливо, кг/т**	23,6-48,9	0	0
	- газообразное топливо, м3/т	2,45-6,3	9,5-15,0	0
	- эл.энергия, кВт ч/т	23,0-48,7	29,0-48,5	15,0-33,0
3	Инвестиции, руб./т***	~5000	~6000	~2000
4	Период внедрения, годы****	3	3	2
5	Внедрение (на 2-х и более предприятиях в мире)	Да	Да	Да

*Оценка (с учетом источников рудного склада, дозирования и смешивания компонентов шихты, разгрузки готовых брэксов, штабелирования и обработки штабеля, аспирации цехового пространства)

**На обеспечение термической обработки

***Принят осредненный удельный показатель на условиях «под-ключ»

****Взята условная продолжительность инвестиционного цикла для производительности в 1 млн. т продукта; для технологии производства брэксов продолжительность снижена из-за существенно меньшей металлоемкости (объема строительно-монтажных работ).

Сравнение основных параметров промышленных технологий брикетирования

Характеристики процесса и свойства брикетов	Агрегаты для брикетирования и их характеристики		
	Вибростол	Валковый пресс	Экструдер
Максимальная производительность	30 т/час	50 т/ч	130 т/час
Срок службы (стоимость заменяемых деталей, долл. США/тонна)	1 год (н.д.)	1 год (1,5)	1,5 года (1,0)
Давление прессования	0,02-0,10 МПа	40-150 МПа	3,5-4,5 МПа
Содержание цемента в брикетах, %	8-10	15-16	4-6
Тепловая обработка сырых брикетов	80 °С (10-12 часов)	Сушка при 200 °С (брикет VALE)	Не требуется
Оборотный цикл	Отсутствует	30 % от произ-ва	Отсутствует
Форма брикетов	призма, цилиндр	подушечка	стержень любого сечения
Размеры брикетов, мм	80x80,	30x40x50	диаметр 5-35 мм
Влажность шихты, %	меньше 5 %	меньше 10 %	12-18 %
Возможность складирования сырых брикетов в штабель	отсутствует	возможно	возможно
Расходы:			
Электродэнергия	42,6 кВт·ч/т	45,0 кВт·ч/т	33 кВт·ч/т
Природный газ	47 м ³ /т	0	0
Тепло	0,3 Гкал/т	0	0
Сжатый воздух	90 м ³ /т	0	0

Реализованные проекты с использованием жесткой экструзии

Предприятие	Страна	Производительность, тыс. тонн в год	Назначение брикетов
Bethlehem Steel	США	80	Доменная печь
Suraj PL (2011)	Индия	100	Доменная печь
Сталелитейная компания*(2010)	Япония	1000	Доменная печь
ОАО НЛМК (2019)	Россия	700	Доменная печь
CAP Steel (2018)	Чили	100	Доменная печь
Jindal (2023)	Индия	100	Доменная печь
TRZ (2024)	Чехия	500 (ЖРК)	Доменная печь
BHP Billiton (1997)	Колумбия	700	ферроникель
Vale (2014)	Бразилия	700	ферроникель
Ферросплавная компания* (2017)	Малайзия	200	ферромарганец
ОАО ЧЭМК (2018)	Россия	200	силикомарганец
ОАО Казхром (2017)	Казахстан	80	феррохром
ОАО Казцинк (2021)	Казахстан	100	Свинцовый концентрат

* *Соглашение о неразглашении*

Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: математическая модель

Результаты численного моделирования работы доменной печи производительностью 6250 тонн в сутки с 10% рудоугольных брикетов в рудной части шихты (1680 кг на тонну чугуна) показали, что:

- Восстановление брикетов происходит в диапазоне температур 400-850 °С. Заметим, что в этом случае практически полностью сохранялась бы связующая функция цемента.
- Углерод брикетов взаимодействует с оксидами железа при температуре 650 °С.
- Газификация углерода на 85% завершается выше зоны когезии.
- Температура колошникового газа снижается на 8 °С в сравнении с базовым режимом.
- Использование 10% брикетов в рудной части доменной шихты позволяет сэкономить 101 кг агломерата и 52,2 кг кокса на тонну чугуна.

Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: результаты промышленного использования брэкссов в доменной шихте

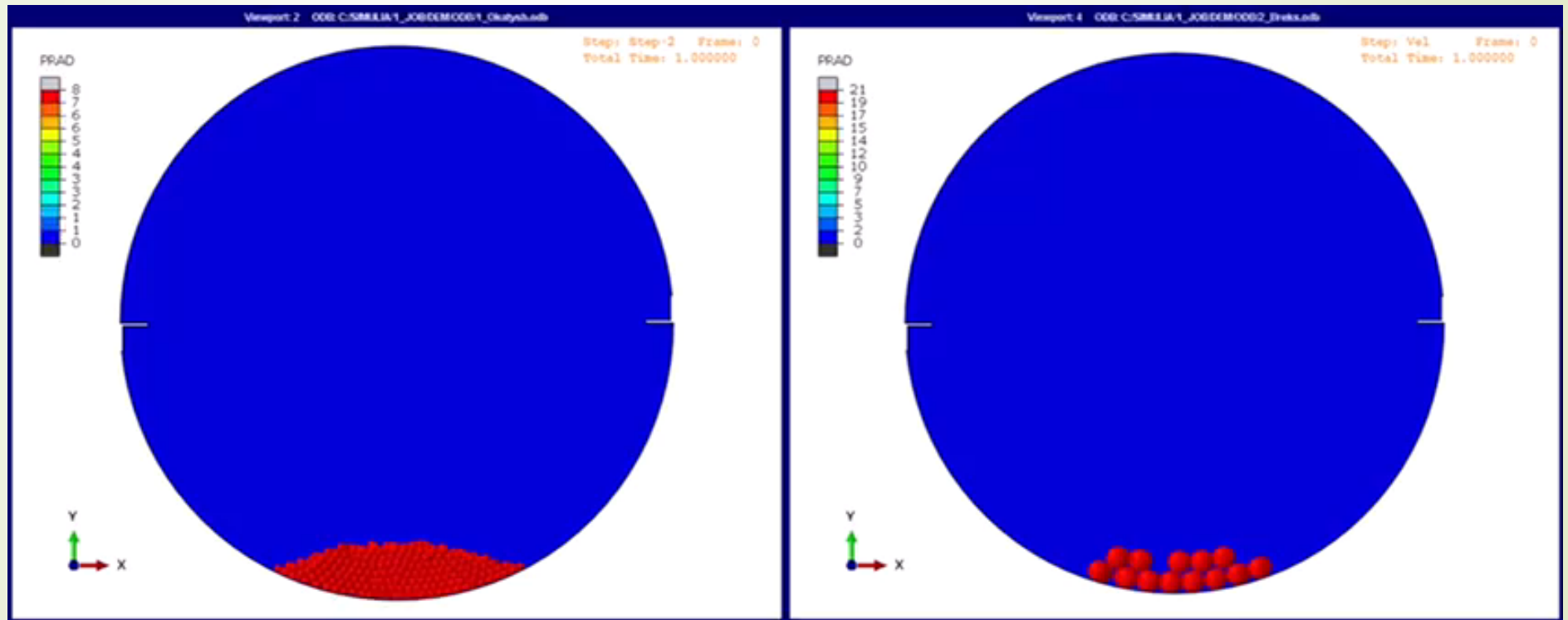
Результаты промышленного использования брэкссов в шихте доменных показали, что:

- ▶ Технология экструзионного брикетирования позволяет вывести из состава аглошихты и эффективно утилизировать мелкофракционные техногенные материалы.
- ▶ Твердофазное восстановление железа способствует снижению расхода суммарного углерода топлива и, следовательно, удельного расхода кокса. Восстановление оксидов ускоряется в присутствии углерода, расположенного в непосредственной близости от оксидов.
- ▶ Исследования показали что рудоуглеродные брэксы на основе рудных концентратов и углеродсодержащих материалов могут служить эффективным шихтовым компонентом доменных, руднотермических и сталеплавильных печей и реакторов прямого восстановления, обеспечивая снижение удельного расхода углерода топлива и эмиссию CO_2 .
- ▶ Работа фабрики по производству брэкссов на НЛМК позволила переработать более миллиона тонн отходов, что в свою очередь высвободило более 20 тысяч квадратных метров территории, ранее занятой отвалами (телеграм-канал НЛМК, 04.02.2024)

Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: о доле брикетов в рудной части шихты

- ▶ Фактором ограничивающим долю брикетов в рудной части доменной шихты, является их механическая прочность. Достижение требуемого уровня прочности брикета без тепловой обработки требует применения значительных количеств дорогостоящего связующего материала, что снижает металлургическую ценность этого шихтового компонента.
- ▶ Приемка брикетов по прочности осуществляется по критериям и методикам, принятым для окатышей.
- ▶ Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния окучкованных продуктов показало, что предельное усилие сжатие, которому подвергается брикет в доменной шихте, не превышает 7-8 МПа. Для окатыша – 20 МПа.
- ▶ Тем не менее металлурги требуют достижения уровня не менее 200-250 кг на брикет.

Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: К вопросу о барабанной пробе брикетов и окатышей.



Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: альтернатива?

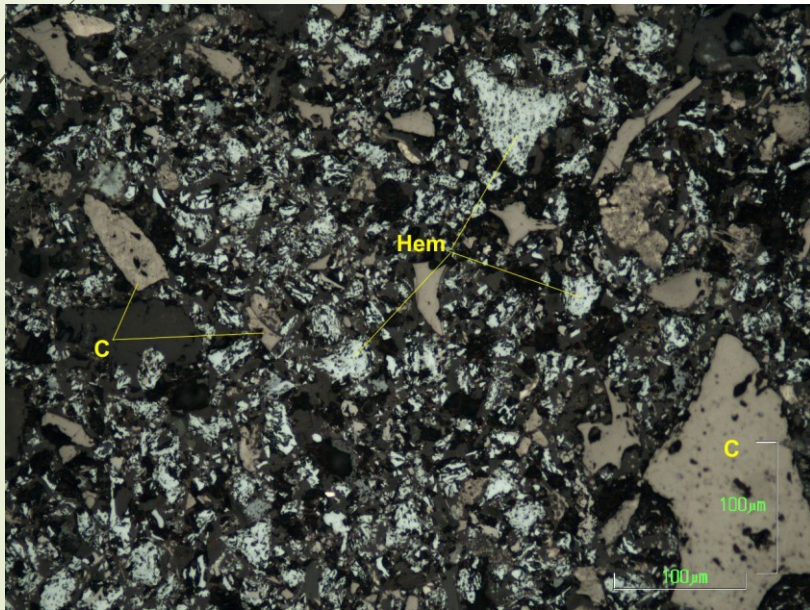
- ▶ В качестве альтернативы, обеспечивающей достижение требуемого уровня прочности, предлагается использовать предварительную металлизацию рудоуглеродных брикетов на конвейерных обжиговых машинах (вариант – трубчатые, кольцевые печи (типа ITmk3), модификации печей для обжига кирпича).
- ▶ С учетом тепла, необходимого для протекания реакций в обжиговой машине конвейерного типа потребуется до 50 м³ природного газа или 22 кг углерода на тонну брикетов. Суммарный расход углерода по технологии твердофазного восстановления (при использовании рудоуглеродных брикетов) составит 340-350 кг на тонну железа.
- ▶ Эмиссия CO₂ составит 1246-1280 кг CO₂ на тонну железа. С учетом эмиссии CO₂ при получении стали в ДСП эмиссия не превысит 1380 килограммов CO₂ на тонну стали, что на более чем 20% ниже уровня эмиссии CO₂ в классическом варианте доменного процесса.

Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: Предыстория

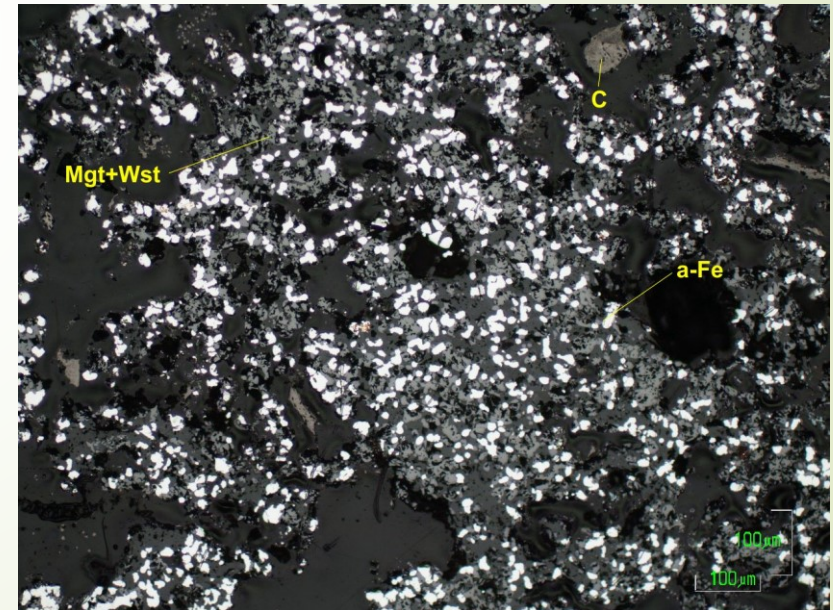
- **Процесс Грёндаля.** В Питкяранте (Финляндия) брикеты на извести (3-5% масс) обжигали при 800 °С. В 1913 г. в мире работало 38 подобных линий брикетирования (16 в Швеции, 12 в Англии, 6 в США).
- **Горячее брикетирование** (Великобритания, США, середина 60-х). Нагрев ЖРК или окалины с колошниковой пылью во вращающейся печи или в реакторе кипящего слоя печи при 1000 °С и брикетирование в валковом прессе специальной высокотемпературной модификации. Брикеты использовали в доменных печах (25% рудной части).
- **Обжиг рудоугольных окатышей** в токе дымовых газов и на Ом (США, СССР 60-70 гг.)
- **Окалино-углеродные брикеты** на полиоксидном связующем из отходов эмалевого шликера обжигают при 800 °С (АО «ВМЗ «Красный Октябрь», ОАО «ПО «Баррикады», ОАО «Тракторная компания «ВГТЗ»)
- **Процесс RKEF** (rotary kiln-electric furnace) с использованием брэксов для выплавки ферроникеля (без связующего). Обжиг при 1000 °С.

Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: Опыт металлизации

- Исследования показали что при обжиге до 1000-1200 °С прочность лабораторных брикетов на основе железорудного концентрата и коксовой мелочи может превысить 400 кг на брикет (усилие раздавливания).
- Непосредственная близость углерода коксовой мелочи и оксидов способствует ускорению восстановления оксидов за счет развития при температуре 900 °С реакции газификации углерода брикета (Будуар), поставляющей СО для металлизации внутри брикета.



сырой

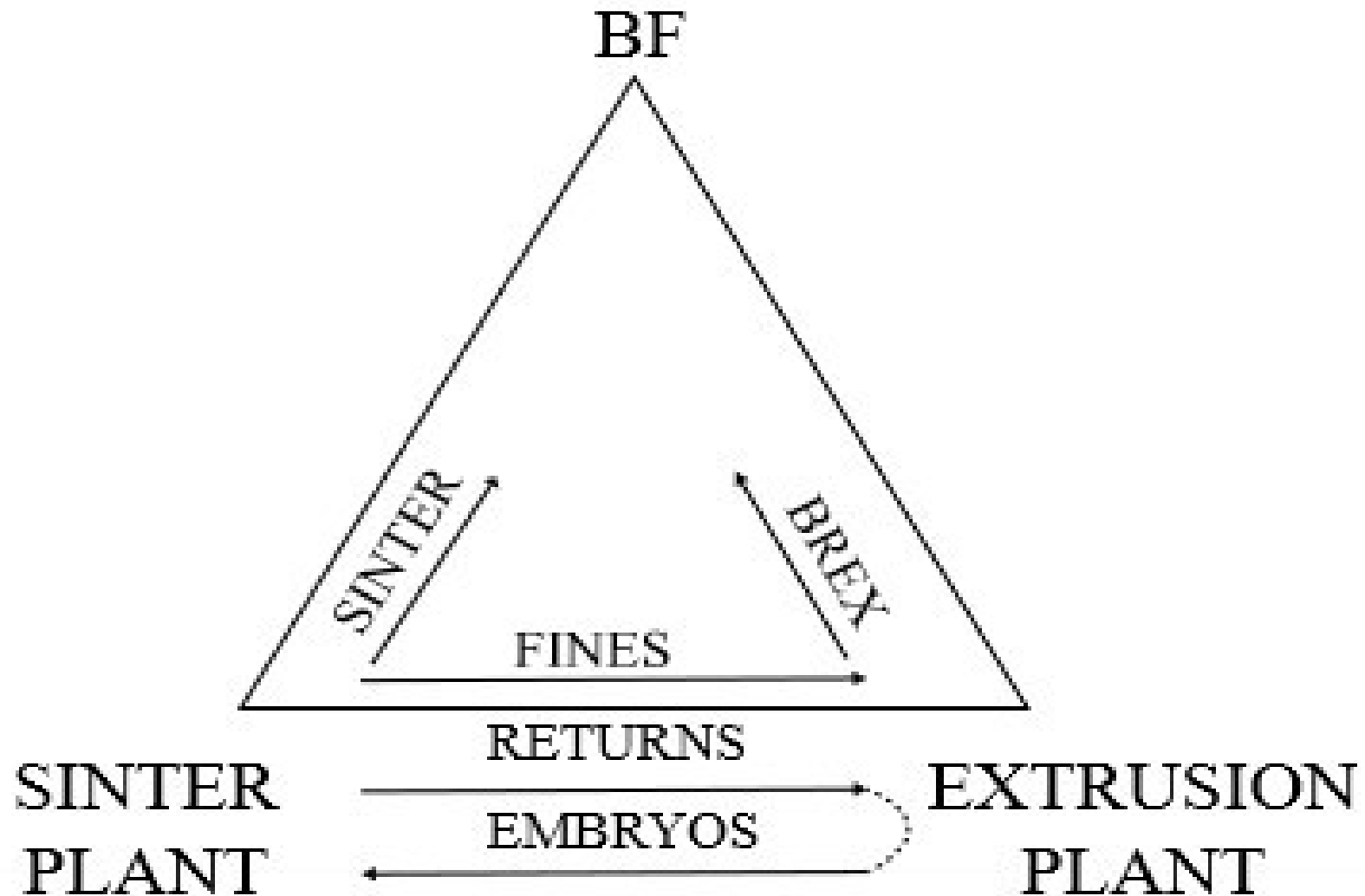


1000 °С, выдержка 60 минут

Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии

- Использование предварительно металлизированных брикетов в доменной шихте позволит существенно повысить степень замещения агломерата при пропорционально значительном снижении выбросов аглофабрики и позволит реализовать практически синергию агломерации и экструзионного брикетирования
- Сокращение доли агломерата в доменной шихте наполовину приведет, в дополнение к снижению вредных выбросов на 50%, к росту прочности производимого агломерата, что, в свою очередь, приведет к значительному, до минимума, снижению отсева в доменном цехе.
- Эффективность рециклинга техногенных компонентов аглошихты в виде экструзионных брикетов (брэксов) в доменной печи подтверждена многолетней практикой.
- Брэксы могут эффективно применяться для получения зародышеобразующих гранул для агломерации.

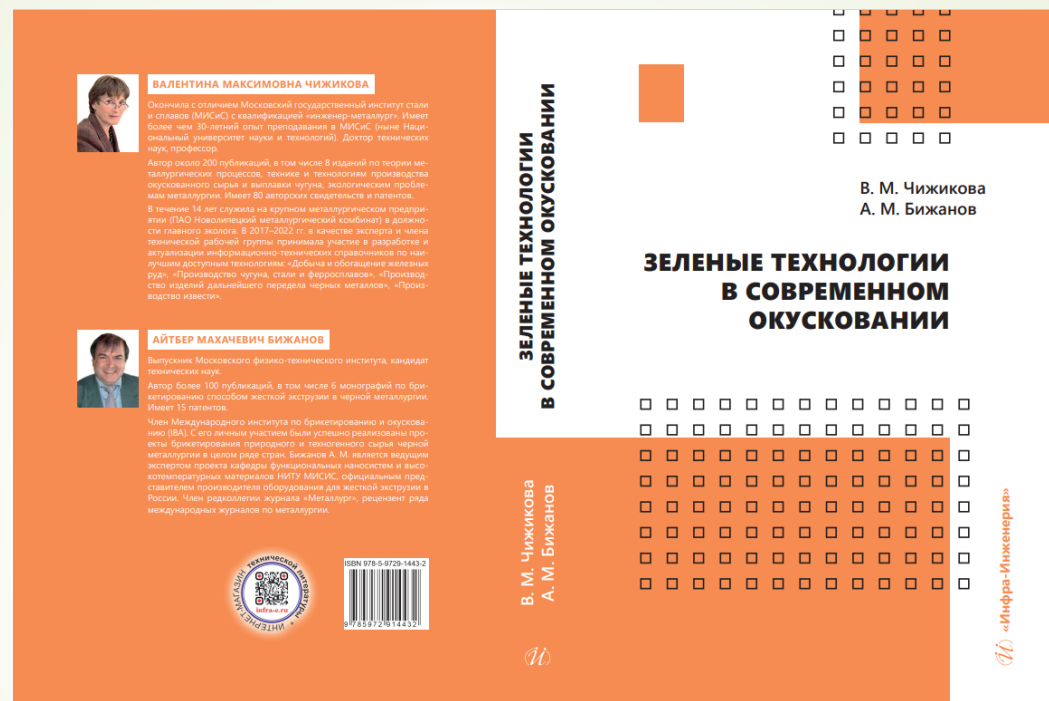
Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: синергия экструзии и агломерации



Рудоуглеродное Брикетирование в Арсенале Зеленой Металлургии: *Выводы*

- Брикетирование способом жесткой экструзии является промышленно подтвержденной и коммерчески успешной технологией рециклинга техногенных материалов черной металлургии;
- Использование рудоуглеродных брикетов в доменной шихте позволяет сократить суммарный расход топлива.
- Прочность холодных брикетов ограничивает степень их использования в рудной части доменной шихты.
- Предварительный обжиг рудоуглеродных брикетов на конвейерных обжиговых машинах для обжига окатышей позволит придать брикетам необходимую для замещения существенной доли агломерата в доменной шихте механическую прочность и повысит их металлургическую ценность за счет роста содержания железа и снижения расхода связующего.
- Суммарная эмиссия CO₂ при получении и проплавке предварительно металлизированных брикетов более чем на 20% ниже, чем в традиционном варианте.
- Предварительно металлизированные брикеты могут эффективно применяться в качестве шихтовых компонентов доменных, ферросплавных, сталеплавильных печей и реакторов прямого получения железа.

Более подробно про зеленые технологии окускования в книге Чижикова В.М. и Бижанова А.М. (Инфра-Инженерия, 2023)



Приведены научно-технические аспекты технологии окускования в целом, включающей и широко применяемые в практике техники агломерации и производства окатышей, а также современные технологии брикетирования.

Отражены наиболее значимые для технологий окускования вехи, в том числе, в отношении отчасти забытых или невостробованных идей, гипотез, технических решений, сохранивших актуальность до настоящего времени, с акцентом на опыт повышения качества агломерата и окатышей, ресурсоэффективности, обеспечения экологической безопасности производства окускованного сырья.

Адресовано студентам, обучающимся по направлению «Металлургия». Может быть полезно магистрантам, аспирантам, преподавателям высших учебных заведений металлургического или политехнического профиля, а также инженерно-техническим работникам и персоналу металлургических предприятий, научным сотрудникам.

Более подробно про технологию экструзионного окускования в книге Бижанова А.М. (Инфра-Инженерия, 2024)



Подробно рассмотрена технология холодного или безобжигового брикетирования как в ее историческом развитии, так и с точки зрения свойств продуктов такого окускования. Приведено описание технических характеристик и принципа действия оборудования, которое позволяет создать из мелкодисперсного материала твердотельную структуру, представлена совокупность способов подготовки и обработки шихтовых материалов (со связующим или без такового), которые обеспечивают соответствие свойств брикетов требованиям того или иного металлургического процесса.

Приведен анализ результатов зарубежных исследований, посвященных технологии жесткой экструзии. Обобщается отечественный и мировой опыт разработки и освоения новых технологий брикетирования, отвечающих задачам черной металлургии на этапе транзита к декарбонизации.

Для инженерно-технических работников и персонала металлургических предприятий, научных сотрудников, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений металлургического или политехнического профиля.