



УДК 622:788

DOI 10.17073/0368-0797-2025-5-461-467



Оригинальная статья

Original article

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ ОКАТЫШЕЙ ДО СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА БОЛЕЕ 4,5 % ПРИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ

Э. Р. Сабиров<sup>1,2</sup>, А. Ю. Поколенко<sup>1</sup>, А. М. Бижанов<sup>3</sup>,  
И. С. Берсенева<sup>1,2</sup>, Н. А. Спирин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НПВП ТОРЭКС» (Россия, 620902, Екатеринбург, ул. Старожилов, 72)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

✉ e.sabirov@torex-npvp.ru

**Аннотация.** Горячебрикетированное железо (ГБЖ, НБИ) или восстановленные окатыши (DRI) являются одним из наиболее востребованных продуктов металлургической отрасли, поскольку их использование позволяет обеспечить экологичное производство высококачественных сталей. Одним из важных параметров качества такой продукции служит содержание углерода. Цель данной работы состоит в исследовании процесса науглероживания окатышей в условиях шахтной печи металлизации в сопоставлении с науглероживанием окатышей за счет формирования рудо-углеродной шихты. Углерод в окатышах распределен между карбидами железа и отдельной фазой – сажей. Горячебрикетированное железо, полученное по технологии Хил-3, отличается по содержанию углерода от брикетов Мидрекс. Разница в количестве углерода объясняется протеканием процессов науглероживания и пиролиза природного газа в рабочем пространстве шахтной печи, а также отличием в составе газовой фазы и давления в рабочем пространстве в печах Хил и Мидрекс. Как известно, процесс Хил-3 использует паровую конверсию (соотношение  $H_2/CO$  выше) при более высоком давлении газа под колошником в сравнении с Мидрекс. Более высокое содержание  $CO$  в газовой фазе процесса Мидрекс (углекислотная конверсия) приводит к интенсификации процесса на восстановленной до металла поверхности окатыша. Результаты исследования показали, что науглероживание окатышей до содержания углерода более 4,5 % при использовании газовой металлизации в шахтных печах действительно возможно. При этом для процесса Мидрекс (восстановитель преимущественно  $CO$ ) это возможно за счет обработки окатышей метаном, а для процесса Хил (восстановитель преимущественно  $H_2$ ) для науглероживания необходимо добавлять в шихту твердый углерод (сажа, коксик и т. д.). Указанное открывает потенциальные возможности использования углеродсодержащих брикетов при металлизации. Углерод, несмотря на его нахождение в виде отдельной фазы (сажи), не может быть отделен от железосодержащих компонентов окатышей магнитной сепарацией или отмывкой и не представляет опасности.

**Ключевые слова:** ГБЖ, восстановленные окатыши, Мидрекс, Хил, шахтная печь, углерод,  $CO$ , сажа, брикеты

**Для цитирования:** Сабиров Э.Р., Поколенко А.Ю., Бижанов А.М., Берсенева И.С., Спирин Н.А. Исследование процесса науглероживания окатышей до содержания углерода более 4,5 % при металлизации в шахтных печах. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(5): 461–467. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-461-467>

# CARBURIZATION OF PELLETS TO A CARBON CONTENT OF MORE THAN 4.5 % DURING METALLIZATION IN SHAFT FURNACES

E. R. Sabirov<sup>1, 2</sup>, A. Yu. Pokolenko<sup>1</sup>, A. M. Bizhanov<sup>3</sup>,  
I. S. Bersenev<sup>1, 2</sup>, N. A. Spirin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LLC “NPVP TOREKS” (72 Starozhilov Str., Yekaterinburg 620902, Russian Federation)

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

<sup>3</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

e.sabirov@torex-npvp.ru

**Abstract.** Hot Briquetted Iron (HBI) or Direct Reduced Iron (Pellets) (DRI) is one of the most sought-after products in the steel industry because its use enables the environmentally friendly production of high grade steels. The purpose of this paper is to study the process of pellets carburization under the conditions of a shaft direct reduction (metallization) furnace in comparison with the carburization of pellets due to the preparation of an ore-carbon burden. Hot briquetted iron produced in the HYL-III process is different from Midrex briquettes in terms of carbon content. Difference in the amount of carbon is attributed to the processes of carburization and pyrolysis of natural gas in the shaft furnace workspace, as well as difference in composition of the gas phase and pressure in the workspace of the HYL and Midrex furnaces. As is known, the HYL-III process utilizes vapor conversion (higher H<sub>2</sub>/CO ratio) at elevated gas pressures beneath the furnace top, in contrast to the Midrex process. An increase in the carbon monoxide (CO) content in the gas phase of the Midrex process (carbon dioxide conversion) results in intensification on the pellet surface that was reduced to metal. The findings of the study demonstrated that carburization of pellets to a greater than 4.5 % carbon content through the process of gas metallization (direct reduction) in shaft furnaces is indeed feasible. The Midrex process, which relies on the reducing agent, mostly carbon monoxide (CO), allows for the treatment of pellets with methane. In contrast, the HYL process, which utilizes hydrogen (H<sub>2</sub>) mostly as the reducing agent, necessitates the addition of solid carbon, such as soot or coke breeze etc., to the burden for carburization. This finding suggests the potential for utilization of carbon-containing briquettes in metallization processes. Carbon, despite its presence in the form of a separate phase (soot), cannot be separated from the iron-containing components of pellets by magnetic separation or washing and does not pose any danger.

**Keywords:** HBI, direct reduced pellets, Midrex, HYL, shaft furnace, carbon, CO, soot, briquettes

**For citation:** Sabirov E.R., Pokolenko A.Yu., Bizhanov A.M., Bersenev I.S., Spirin N.A. Carburization of pellets to a carbon content of more than 4.5 % during metallization in shaft furnaces. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(5):461–467.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-461-467>

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Горячебрикетированное железо (ГБЖ, HBI) или восстановленные окатыши (DRI) являются одним из наиболее востребованных продуктов металлургической отрасли, поскольку их использование позволяет обеспечить экологичное производство высококачественных сталей [1 – 4]. Этим, в частности, обусловлена тенденция роста производства железа прямого восстановления<sup>1</sup>. Одним из важных параметров качества данной продукции служит содержание углерода, что способствовало появлению технологии АСТ Midrex<sup>2</sup>. Согласно заявлениям разработчика, данная технология позволяет обеспечить массовую долю углерода в металлизированных окатышах до 4,5 абс. %. Оценка условий достижения этого значения и сопоставление

их с альтернативами является актуальной задачей, поскольку расширяет арсенал средств для повышения металлургических характеристик ГБЖ. Одним из факторов, определяющих качество металлизированного продукта (в том числе содержание С), является вещественный состав окатышей [5]. В данной работе этот аспект не анализируется (сырье во всех пробах идентичное), и исследование проведено только в отношении кинетики науглероживания. В качестве основы были использованы первичные данные работ [5; 6], а также дополнительные эксперименты. В табл. 1 показано распределение углерода в ГБЖ АО «Лебединский горно-обогатительный комбинат» по трем технологическим линиям.

Согласно этим данным, ГБЖ, полученное по технологии Хил-3, отличается по содержанию углерода от брикетов Мидрекс. Разница в количестве углерода

Таблица 1. Усредненное содержание углерода в ГБЖ [6]

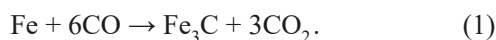
Table 1. Average carbon content in HBI [6]

| Содержание углерода, % |             |             |
|------------------------|-------------|-------------|
| Хил-3 № 1              | Мидрекс № 2 | Мидрекс № 3 |
| 0,96                   | 1,43        | 1,27        |

<sup>1</sup> World Steel Association. World steel in figures 2024. Available at URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/#direct-reduced-iron-production-2019-to-2023> (Accessed 13.05.2025).

<sup>2</sup> MIDREX Technologies Inc. Increasing carbon flexibility in MIDREX DRI products adjustable to 4–5 %: excellent temperature retention with MIDREX ACT. Available at URL: <https://www.midrex.com/tech-article/increasing-carbon-flexibility-in-midrex-dri-products-adjustable-to-4-5-excellent-temperature-retention-with-midrex-act> (Accessed 13.05.2025).

в пробах обусловлена протеканием процессов науглероживания и пиролиза природного газа в рабочем пространстве шахтной печи, а также отличием в составе газовой фазы и давления в рабочем пространстве в печах Хил и Мидрекс [7 – 9]. Как известно, процесс Хил-3 использует паровую конверсию (соотношение  $H_2/CO$  выше) при более высоком давлении газа под колошником в сравнении с Мидрекс. Более высокое содержание  $CO$  в газовой фазе процесса Мидрекс (углекислотная конверсия) приводит к интенсификации на поверхности восстановленной до металла поверхности окатыша реакции [10]:



Углерод в окатышах распределен между карбидами железа и отдельной фазой – сажей. Цель данной работы состоит в исследовании процесса науглероживания окатышей (до уровня  $C > 4,5\%$ ) в условиях шахтной печи металлзации в сопоставлении с науглероживанием окатышей за счет формирования рудо-углеродной шихты.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ

##### ВОССТАНОВЛЕННЫХ ОКАТЫШЕЙ ГАЗОВОЙ ФАЗОЙ

Для определения условий, влияющих на науглероживание окатышей, был подготовлен стенд (рис. 1), состоящий из баллонов с газами (1), вертикальной электрической печи с размещенным в ней реакционным стаканом (2), камеры дожигания (3), систем подачи (4) и удаления газа (5) с фильтрами, а также газоанализатора (6).

Метан поступает в реакционный стакан, нагревается, проходя между стенками наружной и внутренней труб стакана сверху вниз, и далее, двигаясь через перфорированное дно (керамические бусы) во внутренней трубе снизу-вверх, удаляется из стакана. Затем поступает в герметичную емкость с водой, которая служит как фильтром, так и холодильником для обеспечения низкой температуры газа перед его подачей в газоанализатор. После газоанализатора газ сбрасыва-

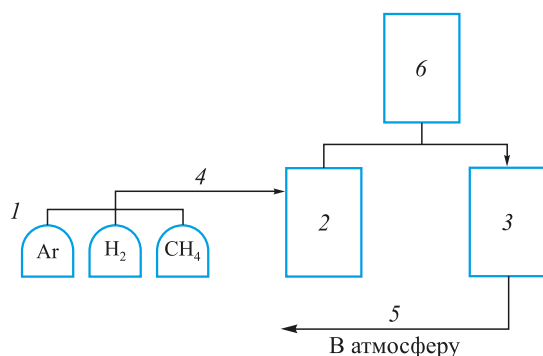


Рис. 1. Блок-схема исследовательского стенда

Fig. 1. Diagram of the research stand

Таблица 2. Условия опытов и скорость образования сажи с окатышами

Table 2. Experimental conditions and formation rate of soot with pellets

| Опыт | Температура, °C | Расход метана, л/мин | Скорость роста массы, г/ч |
|------|-----------------|----------------------|---------------------------|
| 1    | 1000            | 0,781                | 14,55                     |
| 2    | 1100            | 0,781                | 16,39                     |
| 3    | 1100            | 1,757                | 50,09                     |

ется в камеру дожигания. Эта камера предназначена для нейтрализации взрывоопасных компонентов газа, образуемых при крекинге метана, с целью исключения их накопления и возгорания в помещении лаборатории. Температура и расход газа поддерживаются постоянными в период изотермической выдержки. Во время опыта регистрируются и архивируются время, вес, температура, расход исходного газа и химический состав газа на выходе. Разложение метана фиксируется по массе, во время опыта ведется наблюдение за скоростью изменения веса реторты, а также по химическому составу газа на выходе из нее. В исследовании был использован метан в баллоне ( $CH_4 - 99,99\%$ , остальное  $CO, CO_2, N_2, H_2O, O_2, C_mH_n$ ), в качестве нейтрального газа применялся аргон ( $Ar - 99,993\%$ ).

Были проведены эксперименты по моделированию зоны науглероживания шахтной печи с использованием восстановленных окатышей (степень восстановления  $95\%$ ). Опыты проводили при температуре  $1000$  и  $1100\text{ }^{\circ}C$  (табл. 2). Расход подаваемого в установку метана определен, исходя из объема реакционной зоны, пропускной способности газового тракта установки и обеспечения интервала устойчивого регулирования расхода. Из данных табл. 2 следует, что в присутствии восстановленных окатышей наблюдается рост массы окатышей за счет осаждения на них сажи.

При расходе метана  $1,757$  л/мин максимальный прирост массы окатышей за счет углерода составил  $56,48$  г/ч и большая часть углерода осаждалась на поверхности металлizadosанных окатышей и в их порах. Вследствие этого образцы по завершении опытов увеличились в размерах (с  $12$  до  $20 - 22$  мм), а их геометрическая форма изменилась из шарообразной в угловатую (рис. 2). Фазовый анализ окатышей выявил до  $5\%$  общего углерода и более  $2\%$  углерода в виде сажи.

Для определения возможности разделения сажистого углерода и металла выполнен помол окатышей до фракции  $-100$  мкм. При разделении магнитом сухого мелкого материала на магнитную и немагнитную части обнаружено, что весь материал магнитный. Отмывка измельченного материала в воде также не обеспечивала разделения фаз. Выделение углерода в отдельный продукт указанными методами невозможно.

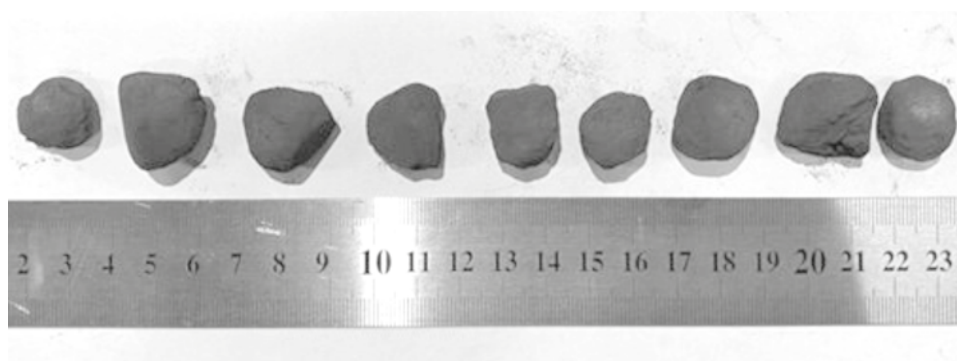


Рис. 2. Вид окатышей после восстановления

Fig. 2. View of pellets after reduction

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ

### ВОССТАНОВЛЕННЫХ ОКАТЫШЕЙ ТВЕРДЫМ УГЛЕРОДОМ

Для проведения исследования в лабораторных условиях были подготовлены окатыши и брикеты на органическом связующем. Связующие органические добавки не уменьшают содержание ценных компонентов в металлизированном продукте, формируют высоко-развитую микропористую структуру в исследуемых образцах при восстановительно-тепловой обработке и обеспечивают высокие прочностные характеристики продуктов на промежуточных стадиях производства (сырой тракт, сушка). В качестве флюсующей добавки использован известняк АО «Лебединский ГОК». Химический состав компонентов приведен в табл. 3. Сажа представлена на 99,59 % углеродом. Гранулометрический состав компонентов удовлетворяет требованиям по производству окатышей. Состав шихты для приготовления брикетов и окатышей: концентрат – 89,62 %; сажа – 5,35 %; известняк – 2,03 %; органическое связующее – 3 % (на сухую массу).

Для выполнения восстановительно-тепловой обработки рудо-углеродных образцов применена лабораторная установка (рис. 1). Режим термообработки был следующим: исследуемые образцы нагреваются одновременно с печью до температуры 1000 °С в нейтральной атмосфере (аргон остался в реторте после проверки на герметичность). При нагреве образцов восстановление оксидов железа осуществляется за счет твердого восстановителя (сажи) в них, так как подача воздуха в реторту отсутствует. В процессе восстановле-

ния сажей происходит выделение дыма, который сбрасывается в атмосферу. При достижении постоянного значения массы образцов и прекращении выхода дыма из реторты принимается, что углерод в образцах полностью выгорел. В реакционный стакан подается водород и продолжается процесс восстановления окатышей до степени восстановления >90 %. При достижении постоянной массы в реторту прекращается подача водорода и подается нейтральный газ. Реторта вынимается из печи, при этом подача нейтрального газа продолжается до достижения температуры 60 °С. Реторта разбирается, проба вынимается.

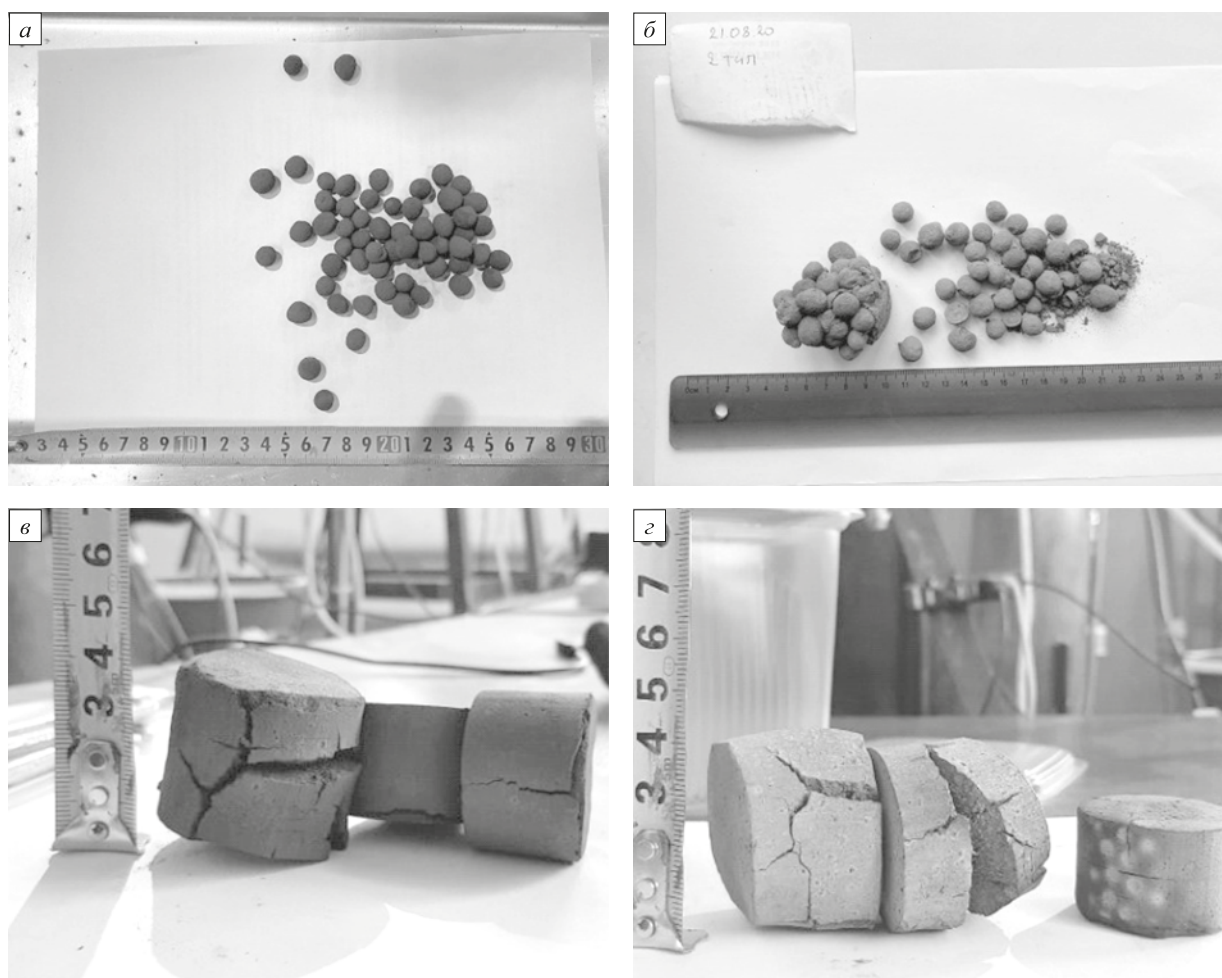
Эксперименты показали, что поверхность полученных сухих окатышей при загрузке/перегрузке крошится. При этом окатыши не покрывались меловой или цементной суспензиями, снижающими спексообразование, вследствие чего наблюдались спеки при восстановлении окатышей. У восстановленных образцов (рис. 3) определены прочность на сжатие (требуемое значение – не менее 30 кг/ок) и химический состав целевых компонентов (табл. 4). Опыты выполнены при восстановлении образцов только сажей, т. е. без подачи водорода в реторту, для определения влияния углерода на процесс удаления кислорода из железорудных частиц.

Анализ полученных данных показывает следующее: прочность на сжатие окатышей, восстановленных только углеродом сажи, отличается незначительно (до 3 отн. %). Это значит, что без ущерба для прочности восстановленных продуктов возможно использование углеродсодержащих брикетов при металлизации, как это предложено, например, в работах [11; 12].

Таблица 3. Химический состав компонентов шихты

Table 3. Chemical composition of burden components

| Компонент  | Химический состав на сухую массу, % |       |       |                  |      |                                |       |       |       |
|------------|-------------------------------------|-------|-------|------------------|------|--------------------------------|-------|-------|-------|
|            | Fe <sub>общ</sub>                   | FeO   | CaO   | SiO <sub>2</sub> | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S     | P     | ППП   |
| Концентрат | 70,13                               | 30,37 | 0,12  | 2,56             | 0,23 | 0,11                           | 0,147 | 0,015 | 0     |
| Известняк  | 0                                   | 0     | 52,21 | 2,18             | 0    | 1,70                           | 0     | 0     | 44,81 |



**Рис. 3.** Типичный вид восстановленных образцов окатышей (а, б) и брикетов (в, з), восстановленных без водорода (а, в) и с водородом (б, з)

**Fig. 3.** Typical appearance of the reduced samples of pellets (а, б) and briquettes (в, з), reduced without hydrogen (а, в) and with hydrogen (б, з)

**Таблица 4.** Физико-химические показатели восстановленных образцов

**Table 4.** Physico-chemical properties of the reduced samples

| Тип образца |             |                    | Прочность на сжатие, кг/ок (кг/бр) | Fe <sub>общ</sub> , % | Fe <sub>мет</sub> , % | C, % | S, %  | SiO <sub>2</sub> , % | Степень металлизации, % |
|-------------|-------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------|-------|----------------------|-------------------------|
| Окатыши     | Связующее 1 | без H <sub>2</sub> | 43,48                              | 83,40                 | 37,32                 | 0,19 | 0,200 | 2,98                 | 44,70                   |
|             |             | с H <sub>2</sub>   | 63,40                              | 96,92                 | 91,64                 | 0,20 | 0,016 | 3,25                 | 94,50                   |
|             | Связующее 2 | без H <sub>2</sub> | 42,60                              | 79,52                 | 34,31                 | 0,41 | 0,200 | 2,87                 | 43,15                   |
|             |             | с H <sub>2</sub>   | 88,31                              | 98,48                 | 92,19                 | 0,19 | 0,024 | 3,24                 | 93,61                   |
| Брикеты     | Связующее 1 | без H <sub>2</sub> | 148,84                             | 77,26                 | 28,70                 | 0,54 | 0,230 | 2,77                 | 37,15                   |
|             |             | с H <sub>2</sub>   | 261,21                             | 91,82                 | 87,48                 | 0,34 | 0,072 | 3,21                 | 95,27                   |
|             | Связующее 2 | без H <sub>2</sub> | 142,41                             | 75,66                 | 23,05                 | 1,27 | 0,220 | 3,35                 | 30,47                   |
|             |             | с H <sub>2</sub>   | 187,72                             | 91,69                 | 89,47                 | 0,24 | 0,053 | 2,86                 | 97,58                   |

Прочность на сжатие восстановленных сажей окатышей в 1,5 – 2 раза ниже прочности окатышей, восстановленных водородом, что обусловлено наличием различных фаз в образцах, характерных для степени металлизации ~45 %: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeO, Fe<sub>мет</sub>, тогда как при однородной структуре окатышей, т. е. представленной

металлическим железом, прочность повышается. Это согласуется с результатами работ [13; 14]. Прочность на сжатие брикетов с увеличением степени их металлизации увеличивается, т. е. тенденция аналогична окатышам. Восстановление рудо-углеродных образцов только за счет углерода сажи обеспечивает степень

восстановления ~45 – 50 %. На данной стадии в исследуемых образцах образуются развитые реакционные поверхности ввиду выгорания органического связующего и углерода, а также за счет фазовых переходов магнетита в вюстит.

## Выводы

На основании экспериментальных исследований определено, что науглероживание окатышей до содержания углерода более 4,5 % при использовании газовой металлзации в шахтных печах возможно. При этом для процесса Мидрекса (восстановитель преимущественно СО) это возможно за счет обработки окатышей метаном, а для процесса Хил (восстановитель преимущественно  $H_2$ ) для науглероживания необходимо добавлять в шихту твердый углерод (сажа, коксик и т. д.). Углерод, несмотря на его нахождение в виде отдельной фазы (сажи), не может быть отделен от железосодержащих компонентов окатышей магнитной сепарацией или отмывкой и не представляет опасности. При восстановлении и науглероживании окатышей и брикетов происходит их деформация с увеличением объема и формированием трещин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Петров С.П. Черная металлургия азиатской России во втором и третьем десятилетиях XXI века. Новосибирск: Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения РАН; 2023:240.
2. Буданов И.А. Макроэкономические перспективы производства металла. *Сталь*. 2024;(6):47–53.  
Budanov I.A. Macroeconomic prospects of steel metal production. *Stal'*. 2024;(6):47–53. (In Russ.).
3. Bilici S., Holtz G., Jülich A., etc. Global trade of green iron as a game changer for a near-zero global steel industry? A scenario-based assessment of regionalized impacts. *Energy and Climate Change*. 2024;5:100161.  
<https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100161>
4. Anderson S.H. HBI improves eat energy efficiency and yield and downstream operating results: Educated use of DRI. Charlotte, NC, USA: MIDREX Technologies Inc.; 2001:1–11.
5. Bersenev I.S., Vokhmyakova I.S., Borodin A.V., etc. Prediction of the quality of hot briquetted iron (HBI) based on data on the material composition of pellets. *Steel in Translation*. 2022;52(7):673–676.  
<https://doi.org/10.3103/S0967091222070038>
6. Vokhmyakov I.S., Bersenev I.S., Borodin A.V., Sivkov O.G., Stepanova A.A., Kirienkov A.N. Mechanism of oxidation for hot briquetting iron (HBI). *Steel in Translation*. 2022;52(3):331–336.  
<https://doi.org/10.3103/S0967091222030160>
7. Kumar T.K.S., Alatalo J., Ahmed H., etc. Effect of temperature and gas mixtures on cementite formation during the carburization of hydrogen-reduced DRI. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022;8:1450–1464.  
<https://doi.org/10.1007/s40831-022-00601-0>
8. Perrone A., Cavaliere P., Sadeghi B., Dijon L., Laska A., Koszelow D. Carburization behavior of high-grade pellets after direct reduction in pure hydrogen. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024;10:1991–2008.  
<https://doi.org/10.1007/s40831-024-00906-2>
9. Dishwar R.K., Mandal A.K., Sinha O.P. Studies on reduction behaviour of highly fluxed iron ore pellets for application in steelmaking. *Materials Today: Proceedings*. 2021;46(3): 1471–1475. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.886>
10. Богданди Л.А., Энгель Г.Ю. Восстановление железных руд. Москва: Металлургия; 1971;520.
11. Lohmeier L., Thaler C., Harris C., Wollenberg R., Schröder H.-W., Braeuer A.S. Use of bentonite and organic binders in the briquetting of particulate residues from the Midrex process for improving the thermal stability and reducibility of the briquettes. *Steel Research International*. 2021;92(12):2100210.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202100210>
12. Mizutani M., Nishimura T., Orimoto T., Higuchi K., Nomura S., Saito K., Kasai E. Influence of reducing gas composition on disintegration behavior of iron ore agglomerates. *ISIJ International*. 2017;57(9):1499–1508.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-074>
13. Dwarapudi S., Sekhar C., Paul I., Modi K., Pal A.R., Chakraborty U., Das B.K. Effect of fluxing agents on the quality and microstructure of hematite pellets. *International Journal of Metallurgical Engineering*. 2017;6(1):18–30.
14. Kurunov I.F., Bizhanov A.M., Wakeel A.K., Mishra B. Behavior of extrusion briquettes in Midrex reactors. Part 2. *Metallurgist*. 2016;60(3-4):243–247.  
<https://doi.org/10.1007/s11015-016-0281-z>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Эмиль Рифатович Сабиров**, старший инженер, ООО «НПВП ТОРЭКС»; аспирант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
**E-mail:** [e.sabirov@torex-npvp.ru](mailto:e.sabirov@torex-npvp.ru)

**Алексей Юрьевич Поколенко**, руководитель группы перспективных технологий, ООО «НПВП ТОРЭКС»  
**E-mail:** [a.pokolenko@torex-npvp.ru](mailto:a.pokolenko@torex-npvp.ru)

**Айтбер Махачевич Бижанов**, к.т.н., ведущий эксперт кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»  
**ORCID:** 0000-0002-0583-1984  
**E-mail:** [bizhanov@briket-brex.ru](mailto:bizhanov@briket-brex.ru)

**Emil' R. Sabirov**, Senior Engineer, LLC "NPVP TOREKS"; Postgraduate, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
**E-mail:** [e.sabirov@torex-npvp.ru](mailto:e.sabirov@torex-npvp.ru)

**Aleksei Yu. Pokolenko**, Head of Advanced Technologies Group, LLC "NPVP TOREKS"  
**E-mail:** [a.pokolenko@torex-npvp.ru](mailto:a.pokolenko@torex-npvp.ru)

**Aitber M. Bizhanov**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Expert of the Chair of Functional Nanosystems and High-Temperature Materials, National University of Science and Technology "MISIS"  
**ORCID:** 0000-0002-0583-1984  
**E-mail:** [bizhanov@briket-brex.ru](mailto:bizhanov@briket-brex.ru)

**Иван Сергеевич Берсенеv**, к.т.н., руководитель научно-аналитического отдела, ООО «НПВП ТОРЭКС»; доцент кафедры металлургии железа и сплавов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0009-0000-4270-6042

E-mail: i.bersenev@torex-npvp.ru

**Николай Александрович Спирин**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0001-9078-589X

E-mail: n.a.spirin@urfu.ru

**Ivan S. Bersenev**, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific and Analytical Department, LLC “NPVP TOREKS”; Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Iron and Alloys, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0009-0000-4270-6042

E-mail: i.bersenev@torex-npvp.ru

**Nikolai A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0001-9078-589X

E-mail: n.a.spirin@urfu.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**Э. Р. Сабиров** – постановка задачи, обзор литературных источников, экспериментальные исследования, анализ результатов и формулировка выводов.

**А. Ю. Поколенко** – экспериментальные исследования.

**А. М. Бижанов** – экспериментальные исследования.

**И. С. Берсенеv** – постановка задачи, обзор литературных источников, анализ результатов и формулировка выводов.

**Н. А. Спирин** – постановка задачи, анализ результатов и формулировка выводов.

**E. R. Sabirov** – problem statement, literary review, experimental studies, analysis of results, drawing conclusions.

**A. Yu. Pokolenko** – experimental studies.

**A. M. Bizhanov** – experimental studies.

**I. S. Bersenev** – problem statement, literary review, analysis of results, drawing conclusions.

**N. A. Spirin** – problem statement, analysis of results, drawing conclusions.

Поступила в редакцию 12.05.2025

После доработки 28.05.2025

Принята к публикации 28.08.2025

Received 12.05.2025

Revised 28.05.2025

Accepted 28.08.2025