

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный комитет Республики Узбекистан по геологии. <https://www.uzgeolcom.uz>
2. Xiaoli Ding et al. GNSS-based deformation monitoring: A review. Engineering Geology, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.012>
3. В. В. Ржевский [2] Открытые горные работы. – Москва: Недра, 1985. <https://www.elibrary.ru>
4. Zhilin Li, Zhu Q., Gold C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. – CRC Press, 2005. Paul R. Wolf, Bonnie A. Dewitt <https://doi.org/10.1201/9780203493188>

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Ochilov Shuhratilla	– Head of the Department of Geological Exploration Techniques and Technology, DSc, Associate Professor, University of Geological Sciences, 100164, Tashkent, Mirzo Ulugbek district, Olimlar Str., 64, Republic of Uzbekistan. ORCID: 0000-0002-5611-482X E-mail: o.shuhrat@mail.ru
Khushnazarov Ibrohim	– Senior lecturer, Head of the Department of Mining and Technology, University of Geological Sciences, 100164, Tashkent, Mirzo Ulugbek district, Olimlar Str., 64, Republic of Uzbekistan. ORCID: 0009-0008-2651-7645, E-mail: kushnazarov1109@gmail.com
Abboskhanova Orzugulxon	– Department of Mining and Technology, University of Geological Sciences, 100164, Tashkent, Mirzo Ulugbek district, Olimlar Str., 64, Republic of Uzbekistan. ORCID: 0009-0000-1624-5369, E-mail: abbasxonova97@mail.ru
Tukhtayeva Makhfuza Muminovna	– Department of Mining and Technology, University of Geological Sciences, 100164, Tashkent, Mirzo Ulugbek district, Olimlar Str., 64, Republic of Uzbekistan. ORCID: 0009-0005-0834-3643, E-mail: maxfuzatuxtayevaO@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕБРИКЕТИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПРОЦЕССЕ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ

У.М. Халикулов, Ш.А. Мухаметджанова, С.Р. Худояров, М.З. Убайдуллаев, Е.И. Руклинская

Алмалыкский государственный технический институт, Алмалык, Узбекистан
Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», Алмалык, Узбекистан

Doi: 10.5281/zenodo.20280009

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты анализа влияния горячебрикетированного железа (ГБЖ) на формирование химического состава хромомолибденовой стали при выплавке в дуговой сталеплавильной печи. Целью исследования явилось установление закономерностей распределения вредных примесей таких как фосфор, сера и азот при изменении доли ГБЖ в металлической шихте. Экспериментальная база включала массивы данных промышленных плавов с содержанием ГБЖ от 0 до 35%. Проведены термодинамические расчёты равновесного коэффициента распределения фосфора и выполнена статистическая обработка полученных зависимостей. Показано, что увеличение доли ГБЖ способствует снижению концентрации фосфора в металлической фазе вследствие формирования более окислительных и основных шлаков, которые обеспечивают рост коэффициента распределения фосфора между шлаком и металлом. Установлено, что в процессе дефосфорации повышение температуры выпуска снижает эффективность удаления фосфора и требует контроля теплового режима, а также перемешивания. Дополнительно выявлено закономерное уменьшение содержания серы, азота, при увеличении доли ГБЖ, что объясняется низкой концентрацией этих элементов в самом горячебрикетированном железе и разбавляющим эффектом по отношению к лому. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность использования ГБЖ для повышения чистоты и стабильности химического состава стали, оптимизации процессов дефосфорации и снижения риска превышения нормативного содержания вредных примесей в готовом полупродукте.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

горячебрикетированное железо, выплавка стали, дефосфорация, шихтовый материал, чистота металла, вредные примеси, металлошихта.

ВВЕДЕНИЕ

Современное сталеплавильное производство предъявляет всё более жёсткие требования к чистоте металла по вредным и цветным примесям, что связано с их влиянием на механические свойства конечной продукции [1]. Эффективным инструментом для получения стали высокой степенью очистки и стабильным химическим составом, является применение горячебрикетированного железа (ГБЖ) при выплавке стали в качестве шихтового материала [2]. Работы последних десятилетий подтверждают технологические преимущества применения ГБЖ. Так, в исследованиях [3] изучены механизмы перехода фосфора в процессе плавки DRI/HBI в электродуговых печах и показано, что коэффициент распределения фосфора между металлом и шлаком зависит от основности шлака и температуры плавки. Установлено, что оптимальным условием эффективной дефосфоризации является использование шлака с содержанием 25–30% FeO, 4% MgO, основность которого равна 2,5 – 3, а температура плавки 1625–1635 °С. Аналогичные выводы приводятся в исследовании [4], где показано, что эффективность удаления фосфора и серы из металла при плавке с DRI/HBI зависит от их степени восстановления. Оптимальные результаты были получены при средней степени восстановления равной 50%. При этом показателе достигается комплексное удаление фосфора в пределах 33% и серы 50%.

Экспериментально доказано [5], что увеличение доли ГБЖ в металлошихте способствует снижению содержания фосфора и серы в готовом металле за счёт более эффективного шлакообразования. Отечественные специалисты [6] по результатам плавки стали в АО «Узметкомбинат» описали тенденцию уменьшения содержания фосфора и серы при доле ГБЖ свыше 30%. В работе [7] проанализировано влияние добавки горячебрикетированного железа в металлошихту электродуговой печи на качество стали и технико-экономические показатели плавки. Исследования показали, что увеличение доли ГБЖ способствует повышению чистоты получаемого металла по примесям, однако сопровождается ухудшением отдельных технологических показателей, включая рост удельного расхода энергоресурсов и вспомогательных материалов, что требует оптимизации режима плавки. Исследованиям влияния различных металлических шихтовых материалов, включая лом, DRI и HBI на показатели электросталеплавильного процесса, посвящены работы [8–10]. Установлено, что кроме снижения содержания вредных примесей, применение DRI/HBI способствует изменению шлакового режима. Так, процессы фильтрации и коалесценции в парогазовом пространстве оказывают влияние на условия массо- и

теплообмена. Особенно, такое влияние необходимо учитывать при плавке стали с повышенной долей ГБЖ.

Имеются результаты и по исследованиям влияния повторного окисления DRI/HBI на распределение цветных металлов. В работе [11] показано, что повторное окисление приводит к формированию оксидных фаз на поверхности частиц DRI/HBI. Это влияет на кинетику перехода элементов между металлической фазой, шлаком и оксидами. В связи с этим, распределение цветных металлов и примесей в процессе плавки может изменяться, что подчёркивает необходимость контроля степени окисления DRI/HBI при загрузке в электропечи для обеспечения стабильного химического состава стали и минимизации нежелательных примесей.

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что в отличие от металлического лома, ГБЖ имеет стабильные и контролируемые параметры по содержанию фосфора, меди, олова, никеля и других примесей [12,13]. Такие преимущества, позволяют использовать его как инструмент для получения более «чистого» по составу металла.

Настоящая работа является продолжением экспериментальных исследований [6] и посвящена влиянию добавки ГБЖ на формирование химического состава выплавляемого полупродукта и распределение вредных примесей, в том числе и цветных металлов, между металлической и шлаковой фазами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследований явились вредные примеси в хромомолибденовой стали при ее выплавке в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) с различной долей ГБЖ в металлошихте. Предметами исследований были термодинамические и кинетические закономерности дефосфорации, сопутствующие процессы удаления примесей, зависящие от состава шлака, его основности, содержания FeO и температуры при выплавке стали с добавкой ГБЖ.

Выплавка стали проводилась в печи ДСП-100УМК. В анализ были включены массивы от 55 до 209 плавов хромомолибденовой стали. Состав шихты варьировался от 0 до 40% ГБЖ, в зависимости от условий конкретного эксперимента. Для каждого параметра проведён количественный анализ, построены диаграммы и графики, отражающие зависимости между долей ГБЖ и концентрацией соответствующих примесей, а также выполнены термодинамические и статистические расчёты [14]. В ряде случаев оценивалась степень приближения к равновесному состоянию, что позволило судить о полноте протекания процессов, таких как дефосфорация.

Особое внимание уделено влиянию ГБЖ на распределение фосфора между металлом и

шлаком. Для этого проведён расчёт равновесного коэффициента распределения фосфора с использованием фундаментальных термодинамических соотношений [15], включая реакцию: $[P]1\% + 5/2FeO(ж) = PO_{2,5(ж)} + 5/2Fe(ж)$, и соответствующее выражение для константы равновесия (1), а также зависимость между массовой долей фосфора в шлаке и концентрацией в металле (2). Полученные расчёты были сопоставлены с фактическими данными, что позволило оценить степень достижения равновесия и выявить условия, при которых дефосфорация осуществляется наиболее эффективно.

$$K_p = \left(a_{PO_{2,5}} a_{FeO_{\frac{5}{2}}} \right) / \left(a_{[P]} a_{FeO_{\frac{5}{2}}} \right) = (x_{P^{5+}} \gamma_{P^{5+}} a_{Fe_2^{\frac{5}{2}}}) / ([P] f_P a_{FeO_{\frac{5}{2}}}), \quad (1)$$

где $a_{Fe_2^{\frac{5}{2}}} \approx 1$.

Примем, что начальное содержание фосфора в шлаке равно нулю, тогда:

$$[P]_K = ([P]_H + \lambda(P)_H) / (1 + \lambda L_p) \quad (2)$$

Согласно фундаментальным положениям термодинамики гетерогенных систем, эффективность протекания процесса дефосфорации в системе металл–шлаковая фаза определяется совокупным воздействием температурного фактора, уровня окислительно-восстановительного потенциала шлака и его кислотно-основного состояния [16]. Каждый из указанных параметров оказывает прямое влияние на положение равновесия реакций типа (2) и величину соответствующей равновесной константы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ влияния указанных параметров на остаточную концентрацию фосфора в жидком металлическом расплаве показал, что с увеличением доли окислов железа в шлаковой фазе от 20 до 40 % наблюдается закономерное снижение как экспериментально фиксируемой концентрации фосфора в жидком металлическом расплаве с 0,010 до 0,008%, так и его равновесного содержания с 0,005 до 0,002%. Эти данные указывают на существенное усиление окислительно-модифицирующей способности шлакового расплава по отношению к фосфору. Такая динамика отражает возрастание потенциала кислородосодержателя в (2), способствующего смещению равновесия в сторону образования устойчивых фосфорсодержащих оксидных форм. Степень термодинамической реализуемости процесса дефосфорации, оценённая по критерию приближения к равновесию α , составляет $\alpha(20\%) = 2$ и $\alpha(40\%) = 4$, что демонстрирует выраженное усиление шлакофильной

направленности распределения фосфора с ростом окисленности.

Исследования по влиянию термодинамического потенциала системы на структурно уравновешенное и фактическое содержание фосфора в расплаве на стадии выпуска плавки показали, что с повышением температуры металлической ванны наблюдается увеличение как достигнутого уровня растворённого фосфора в жидкой фазе, так и его предсказанной равновесной концентрации. Это свидетельствует о температурной чувствительности окислительно-восстановительного процесса удаления фосфора сопровождающийся смещением равновесия (2) в сторону возвратного растворения фосфора. Расчётные значения степени приближения к термодинамическому равновесию α при температурах 1570°C и 1680°C составляют, соответственно, $\alpha(1570^\circ C) = 0,0070/0,0030 = 2,3$ и $\alpha(1680^\circ C) = 0,01/0,005 = 2,0$, демонстрируя снижение интенсивности дефосфорации с ростом теплового состояния расплава.

Изучая зависимость содержания фосфора в металлическом полупродукте от величины основности шлаковой фазы было установлено, что с увеличением базового модуля шлаковой фазы (основности) наблюдается закономерное снижение как фактической, так и термодинамически обоснованной (равновесной) концентрации фосфора в металлической фазе. Это указывает на интенсификацию массопереносных процессов, сопровождающих дефосфорацию. Интерпретация зависимости коэффициента распределения фосфора между фазами металл–шлаковый расплав от величины основности, показала увеличение основности шлака, что способствует удалению фосфора. Однако, реальный процесс в дуговой печи ограничен кинетикой и требует комплексного регулирования состава и перемешивания, чтобы приблизиться к равновесным значениям.

С увеличением содержания оксидов железа (FeO) в шлаковой фазе отмечается рост как фактического, так и равновесного коэффициента распределения фосфора между металлом и шлаком, что указывает на интенсификацию процесса дефосфорации. Анализ полученных данных показал, что характер изменения коэффициента распределения фосфора при варьировании концентрации FeO в шлаке согласуется с термодинамическими закономерностями равновесного фазового взаимодействия в системе «металл–шлаковая фаза».

Таким образом, результаты проведённых исследований показывают, что увеличение доли горячехвостоватого железа в шихтовом составе существенно влияет на ход и эффективность электросталеплавления процесса при выплавке стали. Наблюдается выраженное усиление дефосфорации за счёт роста окислительного потенциала шлаковой фазы и

увеличения её основности, т.е. при повышении содержания оксидов железа коэффициент распределения фосфора возрастает, а равновесная и фактическая концентрации фосфора в металле снижаются. Однако фактические значения остаются ниже термодинамически прогнозируемых вследствие диффузионно-кинетических ограничений и неустойчивости шлаковой матрицы на заключительных стадиях плавки. Повышение температуры металлической ванны, напротив, снижает эффективность дефосфорации, что отражает температурную чувствительность реакции и смещение равновесия в сторону возвратного растворения фосфора.

Анализ содержания вредных примесей в зависимости от доли ГБЖ, например, в случае с азотом, выявил тенденцию к снижению его концентрации в полупродукте, что объясняется повышением степени газообмена за счёт интенсификации обезуглероживания и образования оксида углерода. Что касается серы, то в отдельных сериях наблюдается её увеличение, обусловленное необходимостью повышения доз углеродсодержащих материалов при добавке ГБЖ. Однако в других массивах с увеличением доли ГБЖ содержание серы, напротив, уменьшалось, что подтверждает влияние состава дополнительных шихтовых компонентов. Рост доли ГБЖ в шихте прямо способствует уменьшению концентрации растворённого азота в

стали. Это подтверждает технологическую целесообразность использования ГБЖ как более «чистого» по азоту сырья при выплавке конструкционных и качественных сталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Включение ГБЖ в состав шихтового материала оказывает комплексное положительное влияние на металлургические характеристики процесса выплавки стали и позволяет получать стальной полупродукт с более стабильным и прогнозируемым химическим составом, снижая риски превышения допустимого содержания вредных примесей и повышая общую технологическую управляемость процесса. Полученные результаты показывают снижение содержания растворённого азота, объясняемое более низким его уровнем в ГБЖ и интенсификацией газообмена, тогда как поведение серы определяется балансом между дозировкой углеродсодержащих добавок и составом шлакообразующих материалов. Увеличение доли ГБЖ приводит к устойчивому снижению концентрации фосфора в металлической фазе за счёт формирования более окислительной и основной шлаковой среды, что интенсифицирует процессы дефосфорации и обеспечивает более высокие коэффициенты распределения фосфора между металлом и шлаком.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li Z., Ahman M., Algers J., Nilsson L.J. Decarbonizing the Asian steel industries through green Hot Briquetted Iron trade // *Resources, Conservation & Recycling*. 2025. Vol.219. P.11. DOI:10.1016/j.resconrec.2025.108275.
2. Никитченко Т.В., Поляков А.С., Тимофеева А.С. Увеличение прочности горячебрикетированного железа за счет изменения его формы // *Черная металлургия*. № 11. 2017. С. 52-56.
3. Hassan A.I., Kotelnikov G.I., Semin A.E., Megahed G.M. Phosphorous behavior in electric arc furnace steelmaking with the melting of high phosphorous content direct reduced iron // *Сборник трудов 24 -й Международной конференции по металлургии и материалам*. Брно, Чешская Республика. 12 января 2015. С. 73-79.
4. Dishwar R.K., Sinha O.P. Effect of partially reduced highly fluxed DRI pellets on impurities removal during steelmaking using a laboratory scale EAF // *Journal of Min. Metall. Sect. B-Metall.* 2022. 58 (1). P. 63 – 73. DOI:10.2298/jmmb210319050d.
5. Elkader M., Fathy A., Eissa M., Shama S. Effect of Direct Reduced Iron Proportion in Metallic Charge on Technological Parameters of EAF Steelmaking Process // *ISI International*. 2016. Vol.5. No.2. P. 2016-2024.
6. Khalikulov U.M., Khasanov A.S. Improvement of the mechanical properties of chromium-molybdenum steels using a modifier // *Композиционные материалы*. №1. 2025. С. 51-56.
7. Babenko A.A. Magnesia slags formation by the periods of smelting in EAF and their part in slag sponging efficiency // *Proceedings of the XII Congress of steel-makers*. - Moscow: Metallurgizdat. 2013. P. 106–109.
8. Luckhoff J., Apfel J., Buttler J. Application of different kinds of metal charge materials in EAF operation // *Chernye metally*. 2017. No.10. P. 28–33.
9. Khalikulov U.M., Saidova K A. Study of Filtration Processes with Coalescence in the Steam Space // *Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference "Mining and Metallurgical Complex: Achievements, Problems, and Prospects for Innovative Development"*. - Navoi. 2016. P. 115-116.
10. Korostelev A.A., Kotelnikov G.I., Semin A.E., Bozheskov A.N. Analysis of HBI effect in charge on technological parameters of EAF melting // *Chernye Metally*. 2017. №10. <https://www.rudmet.ru/journal/1711/article/29372/?language=en>.
11. Kieush L., Lesiak S., Rieger J., Leitner M., Schmidt L., Daghighaleh O. Reoxidation Behavior of the Direct Reduced Iron and Hot Briquetted Iron during Handling and Their Integration into Electric Arc Furnace Steelmaking: A Review // *Metals*. 2024. 14, 873. P. 27. DOI:10.3390/met14080873.

12. Sung J.B., Joo H.P. Sustainable hot metal production by solid and liquid carbon from H₂ direct reduced iron (H₂ DRI) in electric smelting furnace conditions // Journal of Cleaner Production. 2025. Vol.524:146490. DOI:10.1016/j.jclepro.
13. Bersenev I.S., Vokhmyakova I.S., Borodin A.V., Sivkov O.G., Stepanova A.A. & Kirienkov A.N. Prediction of the Quality of Hot Briquetted Iron (HBI) Based on Data on the Material Composition of Pellets // Steel in Translation 2022.Vol.52. P. 673–676.
14. Хасанов А.С., Халикулов У.М. Термомеханическая обработка изделий из хромомолибденовой стали // Композиционные материалы. №1. 2025. С. 59-66.
15. Соболев В.Ф., Чичко А.А., Андрианов Н.В., Муриков М.А. Термодинамика химических процессов распределения фосфора в процессе плавки в сталеплавильных печах // Литье и металлургия. №2. 2006.
16. Chen C., Zhang L. and Lehmann J. Thermodynamic Modelling of Phosphorus in Steelmaking Slags High Temp // Mater. Proc. 2013. 32(3): P. 237–246 DOI: 10.1515/htmp-2012-0129.
17. Andre N., Mohammed A., Seetharaman S., Richard J. Phosphorus Equilibrium Between liquid iron and CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-FeO-P₂O₅ slags: EAF slags, the effect of alumina and new correlation // Metals. 2019. 9(2), 116 <https://doi.org/10.3390/met9020116>.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Khudoyarov Suleyman Rashidovich	– Deputy Director, Almalyk Branch of NUST MISIS (National University of Science and Technology “MISIS”), 56 Amir Temur Avenue, Almalyk, Uzbekistan. ORCID: 0000-0002-1022-9947 e-mail: suleyman0677@yandex.ru
Khalikulov Utkir Mirzakamalovich	– Acting Rector of Almalyk State Technical Institute, 45 Mirzo Ulugbek Street, Almalyk, Uzbekistan. e-mail: utkirhm@mail.ru
Muxametjanova Shoira Abdusamatovna	– PhD, Associate professor of the department of Metallurgy; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan ORCID: 0000-0002-6184-6443 e-mail: shoira.muhamet@gmail.com
Ubaydullaev Muzaffar Zaynullaevich	– Assistant, Department of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals Metallurgy, Almalyk Branch of NUST MISIS (National University of Science and Technology “MISIS”), 56 Amir Temur Avenue, Almalyk, Uzbekistan. ORCID: 0009-0005-5575-5130 e-mail: muzaubaydullaev@gmail.com
Ruklinskaya Elena Igorevna	– Assistant, Department of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals Metallurgy, Almalyk Branch of NUST MISIS (National University of Science and Technology “MISIS”), 56 Amir Temur Avenue, Almalyk, Uzbekistan. ORCID: 0009-0009-3309-975X e-mail: ruklinskayaelena97@yandex.ru

KONCHILIK ISHLARINI STRATEGIK REJALASHTIRISHNING MARKSHEYDERLIK TA'MINOTI

S.S. Sayyidqosimov, M.R. Xakberdiyev, R.O. Abduvxabov, Z.R. Ermanov, B.Z. Baxromov

Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O'zbekiston

Doi: 10.5281/zenodo.20280037

ANNOTATSIYA Maqolada konchilik ishlarini strategik rejalashtirishda marksheyderlik ta'minotining o'rni va innovatsion usullarni qo'llash masalalari yoritilgan. Mualliflar 3D EXPERIENCE platformasi yordamida konchilik ishlarini loyihalashning 8 bosqichli algoritmini taklif etadilar. Tadqiqotda mineral resurslar modelini yaratish, blok-modellarni optimallashtirish va karyerning yakuniy konturlarini loyihalashda raqamli texnologiyalarning samaradorligi asoslab berilgan.

KALIT SO'ZLAR Konchilik ishlari strategik rejalashtirish, marksheyderlik ta'minoti, 3D EXPERIENCE platformasi, mineral resurslar modeli, optimallashtirish, karyer loyihasi, raqamli texnologiyalar, blok-model, rentabellik va risklar.

KIRISH

Konchilik ishlarini loyihalash va rivojini rejalashtirish uchun birlamchi ma'lumotlar sifatida qazib olinadigan foydali qazilmaning strukturaviy,

sifat ko'rsatkichlari va texnologik parametrlari tasvirlangan planlar qabul qilingan.

Mazkur kon-geometrik hujjatlarda konning geologik sharoitlari raqamli tarzda tasvirlangan bo'lib,