



Оригинальная статья

УДК 622.7:622.348.1

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-471-478

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2340>

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ НИКЕЛЯ ИЗ ЛИМОНИТА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Ф. Бахфи^{1,2}, А. Манаф², В. Астути¹, Ф. Нурджаман¹,
Э. Прасетио^{1,3}, С. Сумарди¹

¹ Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии (Индонезия, 35361, Лампунг, Южный Лампунг)

² Университет Индонезии (Индонезия, 16424, Западная Ява, Депок, Беджи)

³ Норвежский университет науки и технологии (Норвегия, Тронхейм, Глосхауген, N-7491, Кьеми, 4)

Аннотация. Для изучения минералогического состава и параметров лимонитовых руд из Индонезии применялись методы рентгеновской дифракции (XRD), рентгеновской флуоресценции (XRF), энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе (SEM–EDS) и дифференциального термического анализа (DTA). Полученные данные указывают на наличие сложного внутреннего ядра в латеритной руде. Содержание Ni, Fe, Mg, Al и Si в лимоните составляет 1,4; 50,5; 1,81; 4,86 и 16,5 % (вес.) соответственно, оксидов/гидроксидов железа – 94,4 %, силикатов – 5,6 %. Термический анализ показывает, что при низкой температуре (200 – 300 °С) в лимоните происходит фазовый переход, при этом гетит замещается гематитом. Эта фаза является оптимальным вариантом для диффузии никеля в железо. Более того, для данного лимонита в качестве подходящего метода было выбрано термическое обогащение.

Ключевые слова: характеристика, лимонит, фаза, микроструктура, термическая гравиметрия, термическое обогащение

Финансирование: Благодарим за финансовую поддержку Министерство образования, культуры, исследований и технологии – Директорат высшего образования, исследований и технологии в рамках исследовательского проекта PDD 2022 и контракта № NKB-968/UN2.RST/HKP.05.00/2022.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Университету материаловедения Индонезии и Исследовательскому центру по технологии добычи – Национальному исследовательско-инновационному агентству Индонезии за предоставление объектов исследования.

Для цитирования: Бахфи Ф., Манаф А., Астути В., Нурджаман Ф., Прасетио Э., Сумарди С. Термическое обогащение никеля из лимонита методом селективного восстановления // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 471–478.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-471-478>

Original article

THERMAL UPGRADING OF NICKEL FROM LIMONITE BY MEANS OF SELECTIVE REDUCTION

F. Bahfie^{1,2}, A. Manaf², W. Astuti¹, F. Nurjaman¹,
E. Prasetyo^{1,3}, S. Sumardi¹

¹ Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia (Jalan Ir. Sutami Km. 15, South Lampung, Lampung 35361, Indonesia)

² University of Indonesia (Pondok Cina, Beji, Depok City, West Java 16424, Indonesia)

³ Norwegian University of Science and Technology (4 Kjemi Gløshaugen, Trondheim 7491, Norway)

Abstract. X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy energy dispersion spectroscopy (SEM–EDS), and differential thermal analysis (DTA) measurements were used to investigate the mineralogical characteristics and distribution of data set in limonite soil from Indonesia. The findings point to a complicated inner core in laterite ore. Ni, Fe, Mg, Al, and Si levels in limonite are 1.4, 50.5, 1.81, 4.86 and 16.5 wt %, respectively. The iron oxide/oxyhydroxide content of limonite is 94.4 and 5.6 % silicate. DTA shows that limonite has a phase transition in the low temperature (200 – 300 °C) with the goethite transformation to hematite. This phase is good optimization for nickel diffusion in the iron. Moreover, for this limonite, the thermal upgrading was used as a good method.

Keywords: characterization, limonite, phase, microstructure, thermal gravimetry, thermal upgrading

Funding: The work was supported by the Ministry of Education, Culture, Research, and Technology–Directorate of Higher Education, Research, and Technology under research project PDD 2022 and contract No. NKB-968/UN2.RST/HKP.05.00/2022.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the Materials Science University of Indonesia and the Research Center of Mining Technology – National Research and Innovation Agency of Indonesia for support and research facilities.

For citation: Bahfie F., Manaf A., Astuti W., Nurjaman F., Prasetyo E., Sumardi S. Thermal upgrading of nickel from limonite by means of selective reduction. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 471–478. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-471-478>

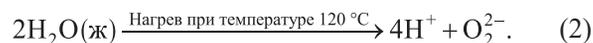
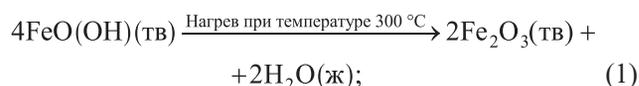
ВВЕДЕНИЕ

Учитывая, что никелевые латериты содержат 60 – 70 % мировых ресурсов никеля, а их добыча ведется уже около 140 лет, до 2000 г. они обеспечивали менее 40 % объема мирового производства никеля, а остальная часть приходилась на сульфидные руды [1, 2]. Со снижением доли разведанных месторождений сульфидных никелевых руд объемы разведки и добычи латеритных никелевых руд возросли [1]. Латеритные никелевые ресурсы обладают рядом преимуществ, включая богатые запасы, низкие инвестиционные расходы, простую транспортировку и широкий ассортимент продукции, включая ферроникель, никелевый штейн и оксид никеля [1]. В зависимости от химических и физических свойств, латеритные месторождения никеля делятся на две категории: сапролитовые и лимонитовые руды [3]. Лимонитовые руды содержат гетит, гиббсит и хромит и подстилаются кристобалитом и протоэнстатитом [4 – 8]. Тем не менее, из-за их слабой кристаллизации и крошечного размера частиц механические процедуры обогащения для таких никелевых латеритов неэффективны. Потому использование физических методов для надлежащего обогащения данных руд обычно затруднено. Для извлечения никеля из латеритных руд используются пирометаллургические методы, которые позволяют достигать значительного извлечения никеля [9 – 22]. Кроме того, сложный минеральный состав латерита оказывает существенное влияние на процесс восстановительного обжига, вследствие чего знание дезинтеграции латерита имеет решающее значение для его предварительного восстановления [13]. Поскольку никель содержится в гетите и силикатах, для растворения силикатных и никелевых соединений требуется использовать реагенты. Обычно для этих целей применяют растворитель [13 – 15, 19 – 21]. В рамках данного исследования будут изучены свойства сапролита, содержащегося в материале, с целью определения оптимального процесса его извлечения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лимонитовая руда добывается в Торобулу, Юго-Восточный Сулавеси, Индонезия. На первом этапе выполнялось ситование лимонита на сотрясательном сите до крупности 100 меш, которая является оптимальной для латерита. Для проведения эксперимента и испытания методом термического анализа отбирались навески по 10 и 1 г. Испытание заключалось в отжиге при температуре 150 и 300 °С в течение 1 ч в печи с

давлением воздуха 1 атм. Термический анализ с использованием Linseis-PT1600 состоял в отжиге при температуре от 200 до 1200 °С с шагом 10 °С/мин и давлением воздуха 1 атм. Анализ данных проводился с использованием Origin 8.1, затем на настольном спектрометре PANalytical Epsilon 3XLE выполнялся анализ методом рентгеновской флуоресценции (на пробе концентрата после магнитной сепарации и сушки крупностью 200 меш сразу после гомогенизации в шаровой мельнице в течение 8 ч). Данные анализировались в Microsoft Excel 2016. Рентгеновская дифракция выполнялась в дифрактометре PANalytical X'Pert3 (на пробе крупностью 200 меш, 2θ в диапазоне 10 – 80° с шагом 0,05), анализ данных проводился в High Score Plus. Для энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе использовался микроскоп Thermo-scientific Quatro 6 с увеличением 5000, для выполнения энергодисперсионного микроанализа применялся анализатор Bruker. Химическая реакция дигидроксилирования гетита представлена в уравнении (1), испарения воды – в (2). После характеристического испытания проба смешивалась с восстановителем и реагентом (ступени 1 и 2). Степень 1 выполняется без выдержки температуры с переходом прямо к восстановлению при температуре 1150 °С. Степень 2 осуществляется с поддержанием температуры на уровне 300 °С с переходом прямо к восстановлению при температуре 1150 °С.



АНАЛИЗ ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА

Как следует из табл. 1, удельный химический состав сапролитовой руды составляет, % (вес.): 1,4 Ni; 50,5 Fe; 1,81 Mg. На рис. 1 видно, что сапролитовая руда содержит гетит (FeHO₂) и кварц (SiO₂). В лимонитовой руде все компоненты являются оксидами и имеют минера-

Таблица 1

Химический состав лимонитовой руды, % (вес)

Table 1. The chemical composition of limonite ore

Ni	Fe	Si	Mg	Al	Ca	Cr	Mn	Co
1,4	50,5	16,5	1,81	4,86	0,177	2,68	0,847	0,0662

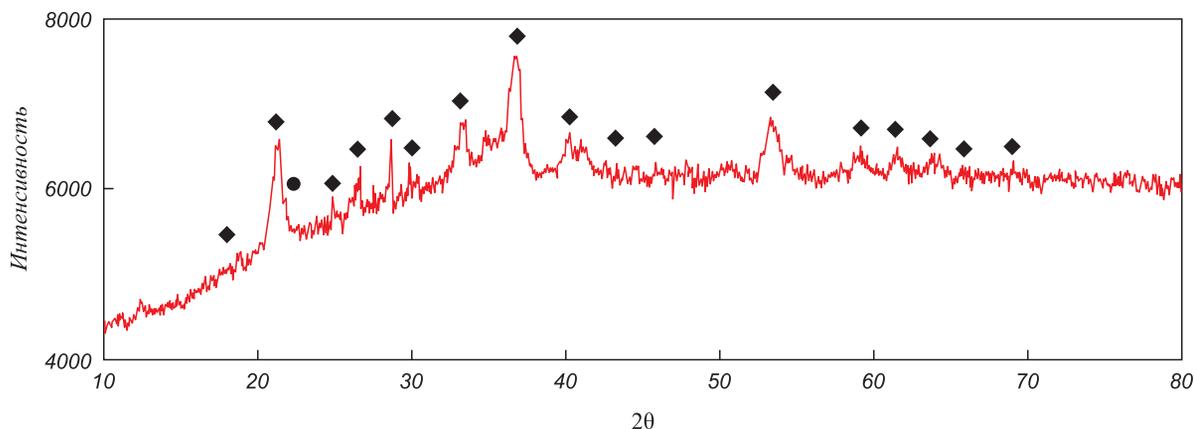


Рис. 1. Анализ лимонита методом рентгеновской дифракции:

◆ – гетит; ● – кварц

Fig. 1. XRD analysis of limonite:

◆ – goethite and ● – quartz

лоидную структуру. Никель в структуре гетита представлен в основном в виде оксида никеля и ассоциирует с железом. В результате расчетов методом Ритвельда получены данные, аналогичные полученным методом рентгеновской дифракции (табл. 2). Испытания пока-

Таблица 2

Расчеты лимонитовой руды методом Ритвельда

Table 2. Rietveld refinement calculations of limonite ore

Соединение	Всего, %
Гетит	94,4
Кварц	5,6

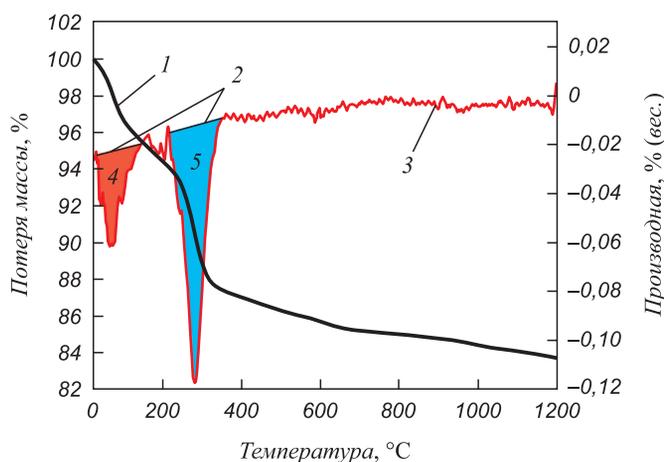


Рис. 2. Анализ методом производной термогравиметрии лимонита:

1 – лимонит; 2 – термогравиметрия; 3 – производная термогравиметрии; 4 – испарение воды; 5 – дегидроксилирование гетита

Fig. 2. DTG analysis of limonite:

1 – limonite; 2 – TG; 3 – DTG; 4 – water evaporation; 5 – dihydroxylation of goethite

зали, что исходный материал представляет собой лимонитовую руду. На рис. 2 и область 4 описывает испарение воды, область 5 – дегидроксилирование гетита.

Термогравиметрия и фазовый анализ лимонита с крутопадающими кривыми при каждой температуре (120 и 300 °С), представленными на рис. 2 и 4, показывают изменение в фазах гетита и испарение воды. Результат эксперимента объясняет переход фаз в лимоните. Морфология лимонита показана на рис. 3. Результат убедительно показывает, что основными элементами в лимоните являются оксиды железа, магния и кремния, а также никель, тесно ассоциирующий с железом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Влияние изменения температуры на фазовый переход

Изучение исходного материала показало, что фазовый переход происходит при температуре 120 и 300 °С, при этом при температуре 120 °С сохраняются те же фазы, что и в исходном материале, что свидетельствует о надлежащем испарении воды. При такой температуре данный процесс должен происходить и для лимонита. С другой стороны, при температуре 300 °С происходит

Таблица 3

Расчет изменения температуры в зависимости от процентного содержания фаз методом Ритвельда
Table 3. Rietveld refinement of calculation of the temperature variation

Общее содержание, %			Температура, °С
гетит	гематит	кварц	
94,4	0	5,6	120
0	94,4	5,6	300

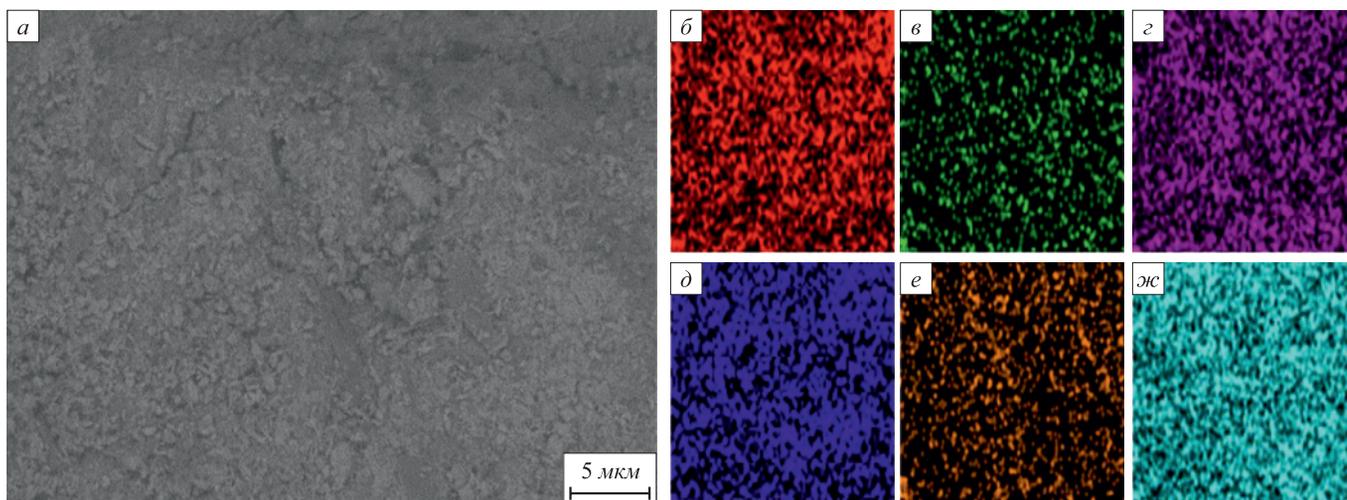


Рис. 3. Снимок энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе лимонита с увеличением 5000 (а): б – магний; в – алюминий; з – железо; д – кремний; е – никель; ж – оксид

Fig. 3. SEM EDS raw limonite with area mode magnification 5000× (а): б – magnesium; в – aluminum; з – iron; д – silica; е – nickel; ж – oxide

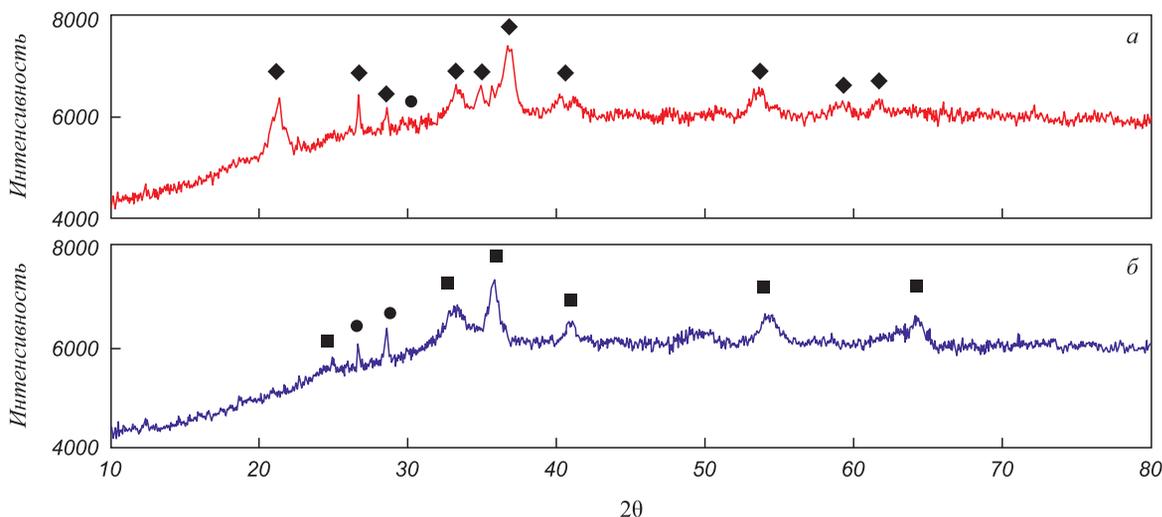


Рис. 4. График данных рентгеновской дифракции при температуре 120 °С (а) и 300 °С (б): ■ – гематит; ◆ – гетит; ● – кварц

Fig. 4. XRD pattern of 120 °C (а) and 300 °C (б): ■ – hematite; ◆ – goethite; ● – quartz

фазовый переход прямо из гетита в гематит, а кварц остается в таком же состоянии, как и в исходной руде. Из табл. 3 видно, что процентное содержание гетита резко падает до нуля. Как показывает рис. 2, при температуре 300 °С структура ОН меняется на окисленную, а результаты производной термогравиметрии также убедительно свидетельствуют о переходе гетита в гематит с существенной потерей массы.

Влияние изменения температуры на морфологию

Нагревание при температуре 120 °С приводит к разделению железа и никеля по сравнению с состоянием,

которое показано на рис. 3, и сопоставимо с показанным на рис. 5. Это происходит, когда испарение воды оказывает первоначальный эффект на фазовый переход. С другой стороны, магний, алюминий и кремний тесно связаны друг с другом. Структура может меняться на исходном этапе даже несмотря на то, что результат рентгеновской дифракции не показывает фазовый переход.

Нагревание при температуре 300 °С приводит к более тесной связи железа и никеля, о чем свидетельствует распределение элементов на рис. 6. Таким образом, 300 °С – это оптимальная температура для изменения фазы гетита на гематит. Объединение и переход магния, алюминия и кремния приводят к долж-

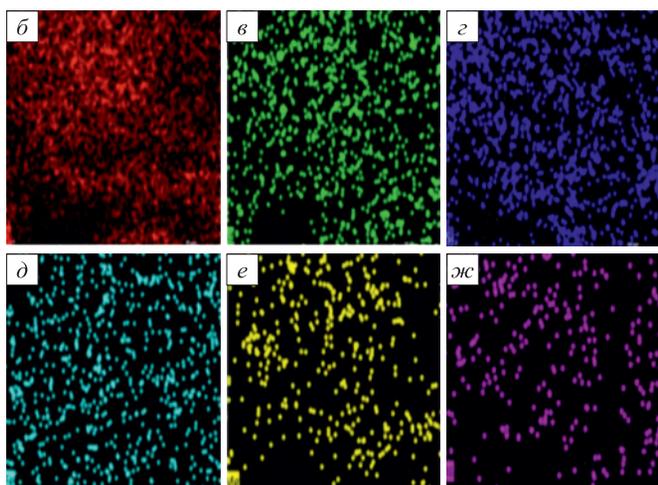
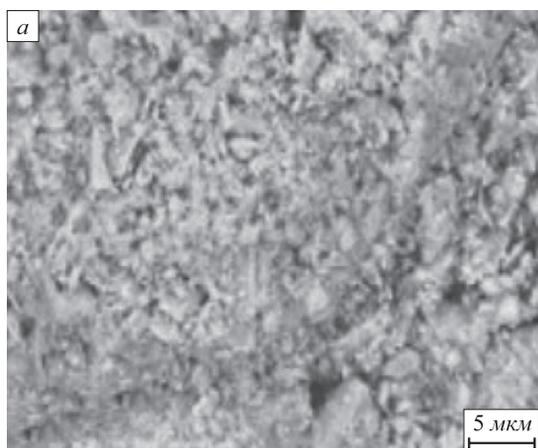


Рис. 5. Снимок энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе лимонита при температуре 120 °С с увеличением 5000 (а): б – оксид; в – алюминий; з – кремний; д – железо; е – магний; жс – никель

Fig. 5. SEM EDS limonite at 120 °C with area mode magnification 5000× (а): б – oxide; в – aluminium; з – silica; д – iron; е – magnesium; жс – nickel

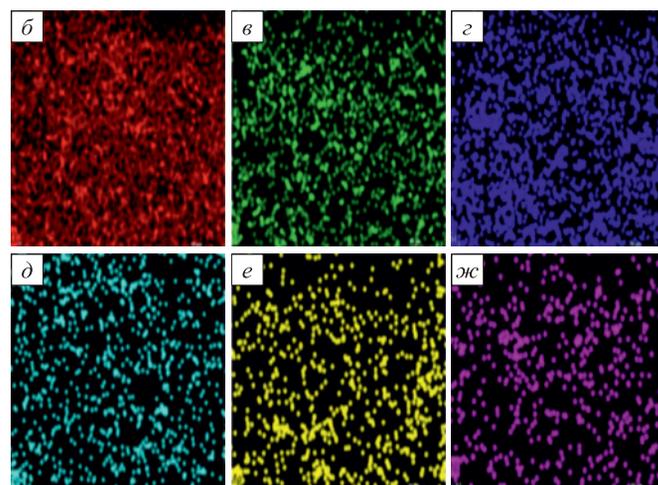
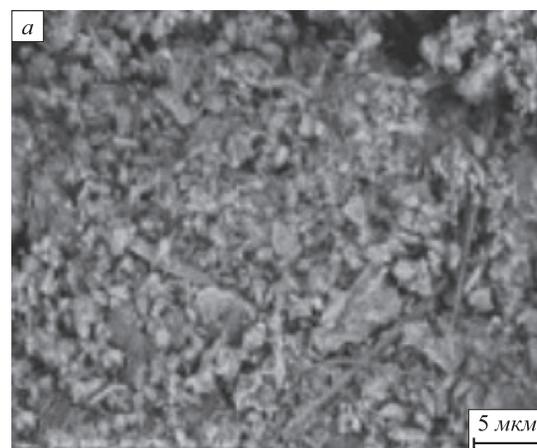


Рис. 6. Снимок энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе лимонита при температуре 300 °С с увеличением 5000 (а): б – оксид; в – алюминий; з – кремний; д – железо; е – магний; жс – никель

Fig. 6. SEM EDS limonite at 300 °C with area mode magnification 5000× (а): б – oxide; в – aluminium; з – silica; д – iron; е – magnesium; жс – nickel

ному фазовому переходу гетита в гематит. На этом этапе может меняться структура, а результат рентгеновской дифракции убедительно свидетельствует о фазовом переходе.

Влияние термического обогащения на фазовый переход, содержание никеля и микроструктуру

Термическое обогащение сильно влияет на фазовый переход. Ступень 2 на рис. 7 представляет оптимальное условие с высоким процентным содержанием никеля, при котором содержание никеля и железа равняется 6,079 и 67,893 % (вес.) соответственно. При увеличении температуры и с течением времени насыщение никелем увеличивается. На рис. 8 показано образование вюститита в зависимости от содержания железа при

температуре 250 – 350 °С. Железоникелевая фаза в ступени 2 более явная, чем в другой ступени. Средний гранулометрический состав составляет 10 – 15 мкм.

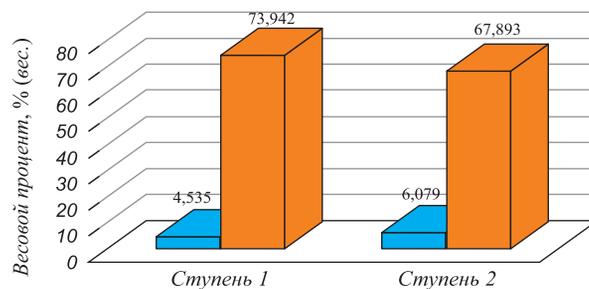


Рис. 7. Процентное содержание никеля и железа после термического обогащения лимонита

Fig. 7. The nickel and iron percentage after thermal upgrading of limonite

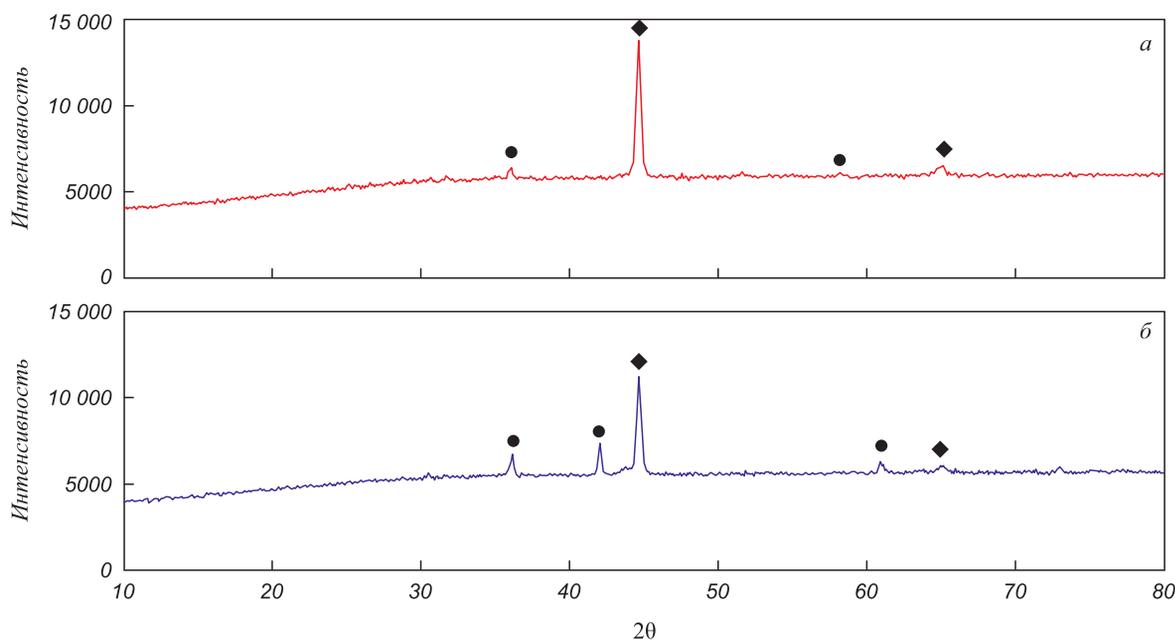


Рис. 8. Селективное восстановление лимонита, фазы ступени 1 (а) и ступени 2 (б):

● – вюстит; ◆ – железо/никель

Fig. 8. The phases of step 1 (a) and step 2 (b) selective reduction of limonite:

● – wustite; ◆ – iron/nickel

При этом при мелкой крупности процентное содержание железа и никеля оптимально. Термическое обогащение при низкой температуре имеет существенное влияние, увеличивая процентное содержание никеля до 6 % (вес.), что приводит к дигидроксилированию гетита.

Выводы

Результаты показывают, что оптимальный переход гетита в гематит происходит при температуре 300 °С. Изменение фаз приводит к насыщению гетитовой фазы

и замещению гематитом. Эксперимент по термическому обогащению (ступень 2 при температуре 300 °С) перед процессом восстановления показал оптимальное процентное содержание и извлечение никеля. Термическое обогащение при низкой температуре имеет существенное влияние, увеличивая процентное содержание никеля до 6 % (вес.), что приводит к дигидроксилированию гетита. В последующих исследованиях такая характеристика может послужить основой для дальнейшего селективного восстановления. Применение данного процесса перед восстановлением обеспечит оптимальное процентное содержание и извлечение никеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Butt C.R.M., Cluzel D. Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites // *Elements*. 2013. Vol. 9. No. 2. P. 123–128. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123>
- Pickles C. A. Microwave heating behaviour of nickeliferous limonitic laterite ores // *Mineral Engineering*. 2004. Vol. 17. No. 6. P. 775–784. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.007>
- Kyle J. Nickel laterite processing technologies – where to next? In: *ALTA 2010 Nickel/Cobalt/Copper Conference*, 24–27 May, Perth, Western Australia. P. 1–36.
- Rao M., Li G., Jiang T., Luo J., Zhang Y., Fan X. Carbothermic reduction of nickeliferous laterite ores for nickel pig iron production in China: A review // *JOM*. 2013. Vol. 65. No. 11. P. 1573–1583. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0760-7>
- Rodrigues F., Pickles C., Peacey J., Elliott R., Forster J. Factors affecting the upgrading of a nickeliferous limonitic laterite ore by reduction roasting, thermal growth and magnetic separation // *Minerals*. 2017. Vol. 7. No. 12. Article 176. <https://doi.org/10.3390/min7090176>
- Soler J.M., Cama J., Gali S., Melendez W., Ramirez A., Estanga J. Composition and dissolution kinetics of garnierite from the Loma

- de Hierro Ni-laterite deposit, Venezuela // *Chemical Geology*. 2008. Vol. 249. No. 1–2. P. 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.12.012>
7. Xiong Y. Research on process mineralogy for the reverberatory furnace slag in Yunnan // *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*. 2015. Vol. 1. No. 2. P. 51–57. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2015.01.012>
 8. Yongue-Fouateu R., Ghogomu R.T., Penaye J., Ekodeck G.E., Stendal H., Colin F. Nickel and cobalt distribution in the laterites of the Lomie region, south-east Cameroon // *Journal of African Earth Sciences*. 2006. Vol. 45. No. 1. P. 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.01.003>
 9. Li G., Jia H., Luo J., Peng Z., Zhang Y., Jiang T. Ferronickel preparation from nickeliferous laterite by rotary kiln-electric furnace process // *Characterization of Minerals, Metals, and Materials* 2016. P. 143–150. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48210-1_17
 10. Zhou S., Wei Y., Li B., Wang H., Ma B., Wang C., Luo X. Mineralogical characterization and design of a treatment process for Yunnan nickel laterite ore, China // *International Journal of Minerals Processing*. 2017. Vol. 159. P. 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.01.002>
 11. Zhou Y., Zhang C., Xie T., Hong T., Zhu H. A microwave thermostatic reactor for processing liquid materials based on a heat-exchanger // *Materials*. 2017. Vol. 10. No. 10. Article 1160. <https://doi.org/10.3390/ma10101160>
 12. Udy M.J., Udy M.C. Selective smelting of lateritic ores // *JOM*. 1959. Vol. 11. P. 311–314. <https://doi.org/10.1007/BF03397826>
 13. Yang S., Du W., Shi P., Shangguan J., Liu S., Zhou C., Chen P., Zhan Q., Fan H. Mechanistic and kinetic analysis of Na₂SO₄-modified laterite decomposition by thermogravimetry coupled with mass spectrometry // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11. No. 6. Article e0157369. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157369>
 14. Zhou S., Li B., Wei Y., Wang H., Wang C., Ma B. Effect of Additives on phase transformation of nickel laterite ore during low-temperature reduction roasting process using carbon monoxide. In: *Drying, Roasting, and Calcining of Minerals*. Thomas P.B., etc. eds. 2015. P. 177–184.
 15. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F. Tinjauan teknologi proses ekstraksi bijih nikel laterit // *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 2020. Vol. 17. No. 3. P. 135–152.
 16. Nurjaman F., Saekhan K., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Effect of binary basicity (CaO/SiO₂) on selective reduction of lateritic nickel ore // *Periodico di Mineralogia*. 2021. Vol. 90. No. 2. P. 239–245.
 17. Nurjaman F., Sari Y., Manurung P., Handoko A.S., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Study of binary, ternary, and quaternary basicity in reduction of saprolitic nickel ore // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021. Vol. 74. No. 12. P. 3249–3263. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02391-7>
 18. Nurjaman F., Handoko A.S., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Effect of modified basicity in selective reduction process of limonitic nickel ore // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 6476–6490. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.052>
 19. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F. Studies on reduction characteristics of limonite and effect of sodium sulphate on the selective reduction to nickel // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2020. Vol. 102. No. 1. P. 149–157. <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00240-3>
 20. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Prasetyo E, Sumardi S. Study effect of Na₂SO₄ dosage and graphite on the selective reduction of saprolite from nickel grade, recovery, and iron-nickel grain size // *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2382. No. 1. Article 050007. <https://doi.org/10.1063/5.0060016>
 21. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Prasetyo E. Studies of carbon percentage variation and mixing Saprolite-Limonite in selective reduction // *Materials Today: Proceedings*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.679>
 22. Bahfie F, Shofi A., Herlina U., Handoko A.S., Septiana N.A., Syafridi S., Suharto S., Sudibyo S., Suhartono S., Nurjaman F. The effect of sulfur, temperature, the duration of the process and reductant de Hierro Ni-laterite deposit, Venezuela. *Chemical Geology*. 2008, vol. 249, no. 1–2, pp. 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.12.012>
 7. Xiong Y. Research on process mineralogy for the reverberatory furnace slag in Yunnan. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*. 2015, vol. 1, no. 2, pp. 51–57. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2015.01.012>
 8. Yongue-Fouateu R., Ghogomu R.T., Penaye J., Ekodeck G.E., Stendal H., Colin F. Nickel and cobalt distribution in the laterites of the Lomie region, south-east Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 2006, vol. 45, no. 1, pp. 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.01.003>
 9. Li G., Jia H., Luo J., Peng Z., Zhang Y., Jiang T. Ferronickel preparation from nickeliferous laterite by rotary kiln-electric furnace process. In: *Characterization of Minerals, Metals, and Materials* 2016, pp. 143–150. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48210-1_17
 10. Zhou S., Wei Y., Li B., Wang H., Ma B., Wang C., Luo X. Mineralogical characterization and design of a treatment process for Yunnan nickel laterite ore, China. *International Journal of Minerals Processing*. 2017, vol. 159, pp. 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.01.002>
 11. Zhou Y., Zhang C., Xie T., Hong T., Zhu H. A microwave thermostatic reactor for processing liquid materials based on a heat-exchanger. *Materials*. 2017, vol. 10, no. 10, article 1160. <https://doi.org/10.3390/ma10101160>
 12. Udy M.J., Udy M.C. Selective smelting of lateritic ores. *JOM*. 1959, vol. 11, pp. 311–314. <https://doi.org/10.1007/BF03397826>
 13. Yang S., Du W., Shi P., Shangguan J., Liu S., Zhou C., Chen P., Zhan Q., Fan H. Mechanistic and kinetic analysis of Na₂SO₄-modified laterite decomposition by thermogravimetry coupled with mass spectrometry. *PLoS ONE*. 2016, vol. 11, no. 6, article e0157369. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157369>
 14. Zhou S., Li B., Wei Y., Wang H., Wang C., Ma B. Effect of Additives on phase transformation of nickel laterite ore during low-temperature reduction roasting process using carbon monoxide. In: *Drying, Roasting, and Calcining of Minerals*. Thomas P.B., etc. eds. 2015, pp. 177–184.
 15. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F. Tinjauan teknologi proses ekstraksi bijih nikel laterit. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 2020, vol. 17, no. 3, pp. 135–152. (In Indonesian).
 16. Nurjaman F., Saekhan K., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Effect of binary basicity (CaO/SiO₂) on selective reduction of lateritic nickel ore. *Periodico di Mineralogia*. 2021, vol. 90, no. 2, pp. 239–245.
 17. Nurjaman F., Sari Y., Manurung P., Handoko A.S., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Study of binary, ternary, and quaternary basicity in reduction of saprolitic nickel ore. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021, vol. 74, no. 12, pp. 3249–3263. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02391-7>
 18. Nurjaman F., Handoko A.S., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Effect of modified basicity in selective reduction process of limonitic nickel ore. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, vol. 15, pp. 6476–6490. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.052>
 19. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F. Studies on reduction characteristics of limonite and effect of sodium sulphate on the selective reduction to nickel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2020, vol. 102, no. 1, pp. 149–157. <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00240-3>
 20. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Prasetyo E, Sumardi S. Study effect of Na₂SO₄ dosage and graphite on the selective reduction of saprolite from nickel grade, recovery, and iron-nickel grain size. *AIP Conference Proceedings*. 2021, vol. 2382, no. 1, article 050007. <https://doi.org/10.1063/5.0060016>
 21. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Prasetyo E. Studies of carbon percentage variation and mixing Saprolite-Limonite in selective reduction. *Materials Today: Proceedings*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.679>
 22. Bahfie F, Shofi A., Herlina U., Handoko A.S., Septiana N.A., Syafridi S., Suharto S., Sudibyo S., Suhartono S., Nurjaman F. The effect of sulfur, temperature, the duration of the process and reductant

on the selective reduction of limonite ore // *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. 2022. Vol. 38. No. 1. P. 123–136. <https://doi.org/10.24425/gsm.2022.140606>

tant on the selective reduction of limonite ore. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. 2022, vol. 38, no. 1, pp. 123–136. <https://doi.org/10.24425/gsm.2022.140606>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фатхан Бахфи, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии; аспирант, Университет Индонезии
ORCID: 0000-0003-3460-469X
E-mail: fathanbahfie@gmail.com

Fathan Bahfie, Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia; Postgraduate, University of Indonesia
ORCID: 0000-0003-3460-469X
E-mail: fathanbahfie@gmail.com

Азвар Манаф, д.н., профессор кафедры физики, факультет математики и естественных наук, Университет Индонезии
ORCID: 0000-0002-6142-3918
E-mail: azwar@ui.ac.id

Azwar Manaf, Dr., Prof. of the Chair of Physics, Faculty of Mathematics and Science, University of Indonesia
ORCID: 0000-0002-6142-3918
E-mail: azwar@ui.ac.id

Види Астуту, д.т.н., научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии
ORCID: 0000-0001-9364-4291
E-mail: widi.mineral@gmail.com

Widi Astuti, Dr. Eng, Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia
ORCID: 0000-0001-9364-4291
E-mail: widi.mineral@gmail.com

Фаджар Нурджаман, д.н., научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии
ORCID: 0000-0002-1329-5296
E-mail: nurjaman_80@yahoo.com

Fajar Nurjaman, Dr., Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia
ORCID: 0000-0002-1329-5296
E-mail: nurjaman_80@yahoo.com

Эрик Прасетио, к.т.н., научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии; постдокторант кафедры химической технологии, Норвежский университет науки и технологии
ORCID: 0000-0002-8254-839X
E-mail: erik_exploreur@yahoo.com

Erik Prasetyo, PhD, Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia, Postdoctorate of the Chair of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-8254-839X
E-mail: erik_exploreur@yahoo.com

Сламет Сумарди, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии
ORCID: 0000-0001-6023-5619
E-mail: slametsumardi99@gmail.com

Slamet Sumardi, Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia
ORCID: 0000-0001-6023-5619
E-mail: slametsumardi99@gmail.com

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Фатхан Бахфи – разработка концепции, методология, курирование данных, написание первоначальной версии статьи.
Азвар Манаф – проведение исследования, визуализация и контроль.
Види Астуту – проведение исследования, визуализация и контроль.
Фаджар Нурджаман – проведение исследования, подтверждение результатов исследования.
Эрик Прасетио – проведение исследования, подтверждение результатов исследования.
Сламет Сумарди – анализ, подтверждение результатов исследования.

Fathan Bahfie – conceptualization, methodology, data duration, writing – original draft.
Azwar Manaf – visualization, investigation, supervision.
Widi Astuti – visualization, investigation, supervision.
Fajar Nurjaman – investigation, validation.
Erik Prasetyo – investigation, validation.
Slamet Sumardi – analysis, validation.

Поступила в редакцию 16.04.2022
 После доработки 13.05.2022
 Принята к публикации 26.05.2022

Received 16.04.2022
 Revised 13.05.2022
 Accepted 26.05.2022