



УДК 669.168

DOI 10.17073/0368-0797-2024-4-384-390

Оригинальная статья
Original article

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНЦЕНТРАТОВ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ ДЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ

И. А. Рыбенко[✉], О. И. Нохрина, И. Д. Рожихина, М. А. Голодова

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

✉ rybenkoi@mail.ru

Аннотация. В статье приведены исследования восстановительных процессов в модельных термодинамических системах и процессов восстановления никеля из никелевого концентрата и кобальта и никеля из кобальт-никелевого концентрата. Концентраты получены при гидрометаллургическом обогащении полиметаллических марганецсодержащих руд Кемеровской обл. – Кузбасса. Методом термодинамического моделирования с использованием программного комплекса Терра определено, что никель из оксида можно полностью восстановить в системе NiO–C при расходе углерода 0,08 кг/кг NiO и при расходе углерода 0,15 кг/кг NiO в системе NiO–Fe₂O₃–C. Восстановление кобальта в системе CoO–C начинается при температуре около 513 К при любых расходах углерода. С дальнейшим ростом температуры процесс восстановления зависит только от расхода восстановителя. Из полученных данных термодинамического моделирования следует, что восстановление кобальта из кобальт-никелевого концентрата начинается при температуре примерно 513 К и в дальнейшем от температуры зависит незначительно. Степень извлечения кобальта возрастает с увеличением количества восстановителя при температурах до 553 К, затем остается постоянной до температуры 1473 К. Восстановление никеля протекает при температуре выше 473 К. Степень восстановления никеля слабо зависит от температуры и количества восстановителя при его расходе более 0,02 кг/кг концентрата. Проведенные лабораторные исследования показали, что в период плавления можно восстановить никель из его оксида твердым углеродом практически полностью, так как никель обладает меньшим сродством к кислороду, чем железо. Теоретические и экспериментальные исследования прямого легирования стали показали, что при восстановлении никеля и кобальта целесообразно использовать твердофазный процесс. Концентрат никеля и кобальт-никелевый концентрат при выплавке стали в электропечи желательно вводить в завалку в виде смесей, окомкованных с углеродистым восстановителем.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, модельная система, никелевый концентрат, кобальт-никелевый концентрат

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ (Кемеровская обл. – Кузбасс) в рамках научного проекта № 20-48-420001/22.

Для цитирования: Рыбенко И.А., Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А. Термодинамическое моделирование восстановления кобальта и никеля при использовании концентратов гидрометаллургического обогащения для легирования стали. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(4):384–390. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-384-390>

THERMODYNAMIC MODELING OF COBALT AND NICKEL REDUCTION USING HYDROMETALLURGICAL ENRICHMENT CONCENTRATES FOR STEEL ALLOYING

I. A. Rybenko[✉], O. I. Nokhrina, I. D. Rozhikhina, M. A. Golodova

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

✉ rybenkoi@mail.ru

Abstract. The article provides studies on reduction processes in model thermodynamic systems and processes of nickel reduction from nickel concentrate and cobalt and nickel from cobalt-nickel concentrate. Concentrates are obtained during hydrometallurgical enrichment of polymetallic manganese-containing ores of the Kemerovo region – Kuzbass. By thermodynamic modeling using TERRA software complex, it was determined that nickel can be completely reduced from oxide in the NiO–C system at a carbon consumption of 0.08 kg/kg NiO, and at a carbon consumption of 0.15 kg/kg NiO – in the NiO–Fe₂O₃–C system. It was found that cobalt reduction in the CoO–C system begins at a temperature of about 513 K at any carbon consumption. With a further increase in temperature, the reduction process depends only on consumption of the reducing agent. From the obtained thermo-

dynamic modeling data, it follows that cobalt reduction from the cobalt-nickel concentrate begins at a temperature of about 513 K and subsequently depends slightly on temperature. The extraction of cobalt increases with the amount of reducing agent at temperatures up to 553 K, then remains constant up to 1473 K temperature. Nickel reduction takes place at a temperature above 473 K. The degree of nickel reduction slightly depends on the temperature and amount of reducing agent at consumption of the latter over 0.02 kg/kg of concentrate. Laboratory studies showed that during the melting period, nickel can be reduced from its oxide almost completely with solid carbon, since nickel has less sensitivity to oxygen than iron. Theoretical and experimental studies of steel direct alloying showed that it is advisable to use a solid phase process in reduction of nickel and cobalt. Nickel concentrate and cobalt-nickel concentrate during steel smelting in an electric furnace is advisable to be introduced into charge in the form of mixtures pelletized with a carbonaceous reducing agent.

Keywords: thermodynamic modeling, model system, nickel concentrate, cobalt-nickel concentrate

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Subject of the Russian Federation (Kemerovo region – Kuzbass) in the framework of the scientific project No. 20-48-420001/22.

For citation: Rybenko I.A., Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Golodova M.A. Thermodynamic modeling of cobalt and nickel reduction using hydrometallurgical enrichment concentrates for steel alloying. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(4):384–390. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-384-390>

АКТУАЛЬНОСТЬ

Современные технологии должны соответствовать определенным требованиям, основными из которых являются:

- рациональное использование материальных и энергетических ресурсов;
- расширение номенклатуры продукции;
- повышение качества продукции;
- экологическая безопасность.

Все эти проблемы в значительной мере присущи производству черных металлов. Большое значение имеют получение более дешевыми методами и в больших количествах особо чистой стали с низким содержанием нежелательных примесей; изменение структуры и типа потребляемых легирующих и раскислителей в сторону снижения требований к составу и соответствующее их удешевление.

Анализ современной технологии выплавки стали показывает, что наиболее весомыми статьями в себестоимости металла являются затраты на раскисление и легирование стали, а также технологическую энергию. Одним из путей решения задачи повышения эффективности производства стали является изменение технологии получения легирующих с переходом к прямому легированию стали в печи или в ковше с использованием руд и концентратов [1; 2].

В последние два десятилетия как в России [3–5], так и за рубежом [6–8] уделяется большое внимание поискам новых химических и гидрометаллургических методов обогащения бедных руд (в том числе марганцевых) в связи с решением проблемы ресурсосбережения. При комплексном обогащении полиметаллических марганецсодержащих руд Кузбасса по технологии, предложенной в работе [9], наряду с высококачественным марганцевым и железосодержащим концентратами получают концентраты цветных металлов (никелевый концентрат, а также никель-кобальтовый), которые могут быть использованы для прямого легирования.

Технический прогресс в машиностроении, строительстве, химии и других отраслях промышленности

обуславливает повышение спроса на качественные стали и сплавы. Наиболее востребованными являются конструкционные, жаропрочные, кислотоустойчивые и нержавеющие марки сталей, при производстве которых используются цветные металлы (одним из основных является никель).

Запасы богатых никелевых руд с содержанием никеля около 4 % ограничены, поэтому в производство вовлекают бедные силикатные руды с содержанием никеля до 1,5 % [10–12]. В настоящее время уделяется большое внимание поискам новых способов обогащения и использования никельсодержащих руд [13–15]. В связи с этим в качестве альтернативного сырья можно рассматривать полиметаллические марганецсодержащие руды и железомарганцевые конкреции, в которых содержание никеля достигает 0,5 % [16; 17].

Ежегодное мировое производство никеля сохраняется на уровне 1 млн т. В условиях глобальной мировой экономики спрос на никель продолжает расти, несмотря на постоянное повышение его цены. Постоянно растущий спрос на никель обусловлен широкими возможностями его использования. Большая часть произведенного никеля используется для легирования стали.

Возрастающая потребность различных областей науки и техники в кобальте, обусловленная развитием аэрокосмической отрасли, производства спецсталей для оборудования нефтедобывающей промышленности, вызывают необходимость увеличения объема его производства. Основная доля получаемого кобальта расходуется на изготовление различных сплавов. Кобальт чаще всего применяется в сплавах с железом, хромом, вольфрамом и молибденом. Он повышает режущие свойства быстрорежущей стали, поэтому нашел применение в инструментальной промышленности.

Кобальтовые сплавы обладают хорошими магнитными свойствами, коррозионной стойкостью, износостойкостью и высокой термостойкостью.

Добавление кобальта в сталь позволяет сохранять магнитные свойства при высоких температурах и вибрациях, а также увеличивает сопротивление размагничиванию. Так, например, японская сталь, содержащая до 60 % Co, имеет

большую коэрцитивную силу и всего лишь на 2,0 – 3,5 % теряет магнитные свойства при вибрациях. Магнитные сплавы на основе кобальта применяют при производстве сердечников электродвигателей, трансформаторов и в других электротехнических устройствах [18; 19].

Анализ достоинств и недостатков прямого легирования стали показывает, что перспективность той или иной технологии определяется такими технико-экономическими показателями, как длительность плавки и расход восстановителя. В процессе исследований ставилась задача максимальной замены кремния – основного восстановителя легирующих элементов из концентратов, более дешевым восстановителем углеродом, и получение стабильного извлечения никеля и кобальта из оксидов, входящих в состав концентратов, полученных при гидрометаллургическом обогащении полиметаллических марганецсодержащих руд.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕРИАЛЫ

В условиях выплавки стали в дуговых электропечах на разных этапах плавки в качестве восстановителей могут рассматриваться углерод, оксид углерода и кремний, растворенные в жидкой стали. Для определения условий восстановления легирующих элементов из концентратов использовали методы термодинамического моделирования на основе расчета равновесных состояний в модельных термодинамических системах [20]. При реализации термодинамического моделирования в настоящей работе использовали готовые программные продукты (программный комплекс Терра), разработанные в Московском государственном техническом университете, позволяющие на основе принципа максимума энтропии находить равновесный состав многокомпонентной, гетерогенной термодинамической системы для высокотемпературных условий.

Элементарная система формируется путем задания количества составляющих ее компонентов и температуры. При необходимости формируются составы конденсированных растворов. При выбранных двух термодинамических параметрах реализуются многовариантные расчеты равновесных составов в зависи-

мости от термодинамических параметров или расходов исходных материалов.

Набор веществ, который может образовываться при заданном элементном составе смеси, определялся в результате численного моделирования для выбранного диапазона температур и различных термодинамических состояний. Из полного перечня возможных веществ были выбраны только те вещества, концентрации которых превышали 10^{-4} моль/кг смеси. Расчет проводили в интервале температур от 573 до 1873 К, соответствующим температурам выплавки стали.

Термодинамическое моделирование восстановления никеля, кобальта и совместно никеля и кобальта проводили для чистых систем и концентратов, полученных при обогащении полиметаллического марганцевого сырья: никелевый концентрат (45,0 % Ni; 2,3 % Mn; 1,4 % Fe; 0,5 % Co; 0,1 % Cu; менее 0,015 % P; следы SiO₂ и 2,82 % п.п.п.); кобальт-никелевый концентрат (76,8 % CoO; 11,9 % NiO; 4,9 % Fe₂O₃; 1,2 % Mn₂O₃; 0,2 % SiO₂; 1,2 % CaCl₂; 3,8 % п.п.п.) и кокс ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-сибирский металлургический комбинат» ($A^d = 13,6$ %; $V^{daf} = 2$ %; $W^p = 2$ %; 51,1 % SiO₂; 23,3 % Al₂O₃; 0,16 % MnO₂; 1,58 % MgO; 1,2 % CaO; 17,46 % Fe₂O₃; 0,5 % P₂O₅; 1,2 % K₂O; 0,2 % Na₂O; 74,4 % CO₂).

В ходе лабораторных исследований был экспериментально определен и опробован способ ввода оксида никеля в дуговую электропечь. Сталь выплавляли в дуговой лабораторной печи вместимостью 10 кг. Из никелевого концентрата, полученного при обогащении полиметаллических марганцевых руд фракцией менее 0,5 мм и коксовой мелочи, были изготовлены окатыши диаметром 20 – 30 мм. Окатыши загружали в печь по двум вариантам: I – в завалку; II – в восстановительный период на «зеркало» металла перед наведением шлака.

Расчет количества окатышей вели на содержание никеля в стали 1 %. Экспериментальные плавки вели по классической двухшлаковой технологии. При выплавке стали использовали металлический лом состава, мас. %: 0,275 C; 0,267 Si; 0,423 Mn; 0,175 Cr; 0,1 Ni; 0,027 S; 0,028 P; остальное Fe. Масса шихтовых материалов для опытных плавков приведена в таблице.

Исходные шихтовые материалы для опытных плавков

Initial charge materials for experimental heats

| Показатель | Значение показателя для плавки | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Масса брикетов, кг | 0,757 | 0,756 | 0,758 | 0,677 | 0,678 | 0,676 |
| Состав брикетов, мас. %: | | | | | | |
| Никелевый концентрат | 85 | 85 | 85 | 95 | 95 | 95 |
| Кокс | 10 | 10 | 10 | – | – | – |
| Связующее | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Масса металлического лома, кг | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |

По окончании плавки отбирали пробы металла и шлака на химический анализ. Выпуск металла и шлака осуществляли в ковш. Полученный слиток разрезали по высоте на три равные части и анализировали металл.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Восстановление никеля из оксидов никелевого концентрата

Расчет возможных составов, получающихся в результате протекания процессов восстановления никеля в термодинамической системе, состоящей из элементов NiO–C, осуществляли изменением содержания углерода в системе, что позволило оценить границы концентрационных областей восстановительных процессов. Модельную систему NiO–C формировали путем задания исходного состава смеси 1 кг оксида NiO и углерода в количестве от 0,01 до 0,1 кг/кг оксида. Исследования проводили в интервале температур от 1073 до 1873 К. Зависимости коэффициентов извлечения никеля из оксида от количества углерода при температурах 1073, 1473 и 1873 К представлены на рис. 1. Термодинамические расчеты показали, что максимальное восстановление никеля достигается при расходе углерода 0,08 кг/кг NiO. Следовательно, полного вос-

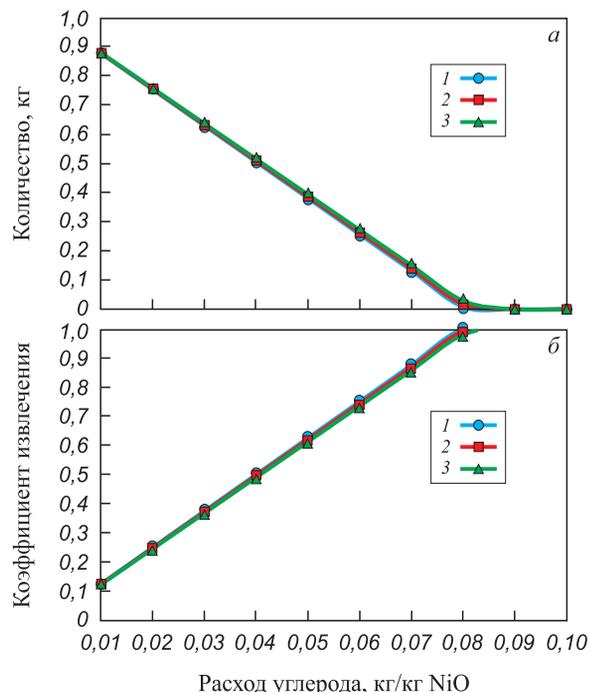


Рис. 1. Зависимости параметров восстановления никеля от количества углерода в системе NiO–C при температурах 1073, 1473, 1873 К (1–3): а – количество NiO; б – извлечение никеля

Fig. 1. Dependences of nickel reduction parameters on the amount of carbon in the NiO–C system at a temperature of 1073, 1473, 1873 K (1–3): а – amount of NiO; б – nickel extraction

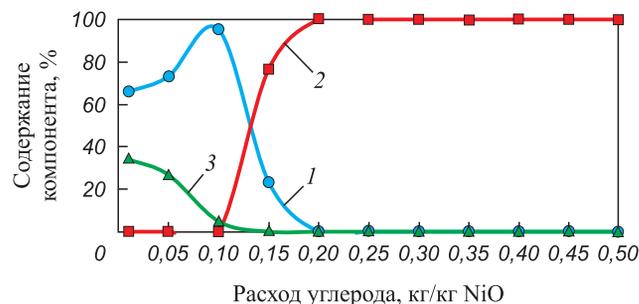


Рис. 2. Зависимость состава шлаковой фазы от расхода углерода при постоянной температуре 1873 К в системе NiO–Fe₂O₃–C: 1 – 3 – Fe₃O₄, FeO, NiO

Fig. 2. Dependence of slag phase composition on carbon flow rate at constant temperature 1873 K in the NiO–Fe₂O₃–C system: 1 – 3 – Fe₃O₄, FeO, NiO

становления никеля можно достичь при твердофазном восстановлении до появления жидкой фазы.

Результаты расчетов равновесных состояний системы NiO–Fe₂O₃–C в пределах изменения углерода 0,01 – 0,5 кг/кг NiO и исходном количестве оксидов NiO (1 кг), Fe₂O₃ (2 кг) представлены на рис. 2. В качестве значимых оказалась конденсированная фаза, состоящая из Ni, NiO, C, FeO и Fe₂O₃. Газовая фаза представлена оксидами CO и CO₂.

Шлаковая фаза рассматриваемой системы представлена оксидами FeO, Fe₂O₃ и NiO. При введении восстановителя в количестве более 0,2 кг/кг NiO шлаковая фаза системы состоит только из оксида железа FeO. Полное восстановление никеля из оксида происходит при содержании углерода 0,15 кг/кг NiO в системе NiO–Fe₂O₃–C.

Результаты термодинамического моделирования показали, что никель из оксида можно полностью восстановить как в системе NiO–C, так и в системе NiO–Fe₂O₃–C при температурах металлургических процессов.

В ходе лабораторных исследований был экспериментально определен оптимальный способ ввода оксида никеля в дуговую электропечь. В плавках 1–3 использовали окатыши, изготовленные из никелевого концентрата, в 4–6 – смеси никелевого концентрата и кокса (см. таблицу).

Результаты опытных плавок легирования стали с использованием никельсодержащих окатышей показали, что извлечение никеля из концентрата составило 92 – 95 % (вариант I), 75 – 78 % (вариант II).

Снижение извлечения никеля при присадке его в начале восстановительного периода, по-видимому, связано с его частичным испарением: при попадании в зону дуг никель восстанавливается и может частично испаряться, так как имеет относительно низкую температуру кипения.

В условиях выплавки стали в дуговой электропечи в интервале температур 1173 – 1873 К в период плав-

ления практически полностью можно восстановить никель из его оксида твердым углеродом, так как никель обладает меньшим сродством к кислороду, чем железо.

Восстановление кобальта в элементарных системах

Исследование процесса диссоциации оксидов кобальта показало, что высший оксид кобальта Co_2O_3 отсутствует в системе при температурах выше 473 К. Устойчивый при комнатной температуре оксид кобальта представляет собой сложный оксид Co_3O_4 , имеющий структуру шпинели. В его кристаллической структуре одна часть узлов занята ионами Co^{2+} , а другая – ионами Co^{3+} ; он разлагается с образованием CoO при температуре выше 1173 К. Результаты термодинамических расчетов приведены на рис. 3. Из представленных зависимостей следует, что оксид Co_3O_4 остается устойчивым до температуры 1173 К. В интервале температур от 1173 до 1223 К количество оксида Co_3O_4 снижается до нуля, при температуре 1173 К появляется оксид CoO и при температуре 1223 К его количество становится максимальным, устойчивым к изменению температуры.

При моделировании восстановления кобальта рассматривали систему $\text{CoO}-\text{C}$. Расчеты проведены в интервале температур от 273 до 1273 К и при расходе восстановителя (углерода) от 0,02 до 0,1 кг/кг CoO . Термодинамическое моделирование показало, что восстановление кобальта начинается при температуре около 513 К при любых расходах углерода. С дальнейшим ростом температуры процесс восстановления зависит только от расхода восстановителя (рис. 4). Кобальт полностью восстанавливается из оксида при расходе углерода 0,1 кг/кг CoO при температуре 1273 К.

Термодинамические расчеты восстановления кобальта в системах $\text{Co}-\text{O}-\text{Si}$ и $\text{Co}-\text{O}-\text{Al}$ в интервале температур от 273 до 1273 К показали, что он полностью восстанавливается при расходе кремния 0,1 кг/кг CoO

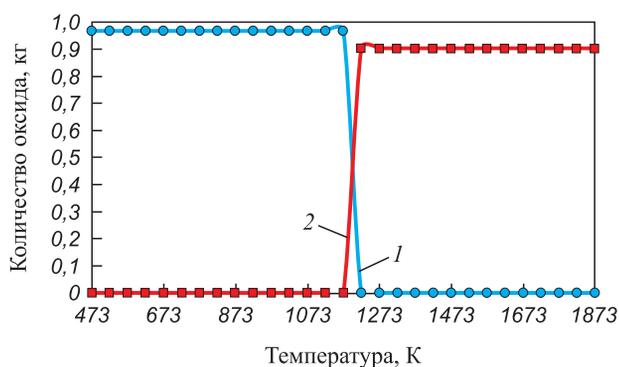


Рис. 3. Термическая диссоциация оксидов кобальта:
1, 2 – Co_3O_4 , CoO

Fig. 3. Thermal dissociation of cobalt oxides:
1, 2 – Co_3O_4 , CoO

или при расходе алюминия 0,24 кг/кг CoO при температуре 1273 К.

Восстановление никеля и кобальта из кобальт-никелевого концентрата

Было также исследовано восстановление кобальта и никеля из оксидов концентрата коксом в интервале температур от 273 до 2073 К. Расход кокса варьировался от 0,02 до 0,1 кг/кг концентрата.

В составе продуктов восстановления в значимых количествах присутствовали:

- кобальт, никель, оксиды кобальта, никеля, железа, марганца, силикаты и алюминаты кальция и магния (конденсированная фаза);

- пары воды, оксиды CO и CO_2 , хлориды металлов (газовая фаза); хлориды определяли при температурах выше 1513 К.

Зависимости коэффициентов извлечения кобальта и никеля из кобальт-никелевого концентрата от температуры и расхода углерода приведены на рис. 5.

Из полученных термодинамических данных следует, что восстановление кобальта начинается при температуре примерно 513 К и в дальнейшем от температуры зависит незначительно. Степень извлечения кобальта возрастает с увеличением количества восстановителя при температурах до 553 К, затем остается постоянной до температуры 1473 К. С дальнейшим ростом температуры извлечение кобальта снижается. При расчете коэффициента извлечения кобальта учитывался только кобальт, содержащийся в конденсированной фазе. В газовой фазе присутствует соединение CoCl_2 , количество которого возрастает с увеличением температуры.

Восстановление никеля протекает при температуре выше 473 К. Степень восстановления никеля слабо зависит от температуры и количества восстановителя при расходе последнего выше 0,02 кг/кг концентрата.

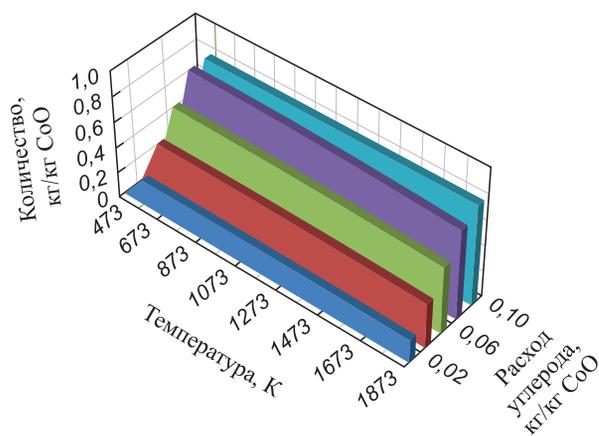


Рис. 4. Зависимость количества восстановленного кобальта от температуры и расхода углерода в системе $\text{CoO}-\text{C}$

Fig. 4. Dependence of the amount of reduced cobalt on temperature and carbon consumption in the $\text{CoO}-\text{C}$ system

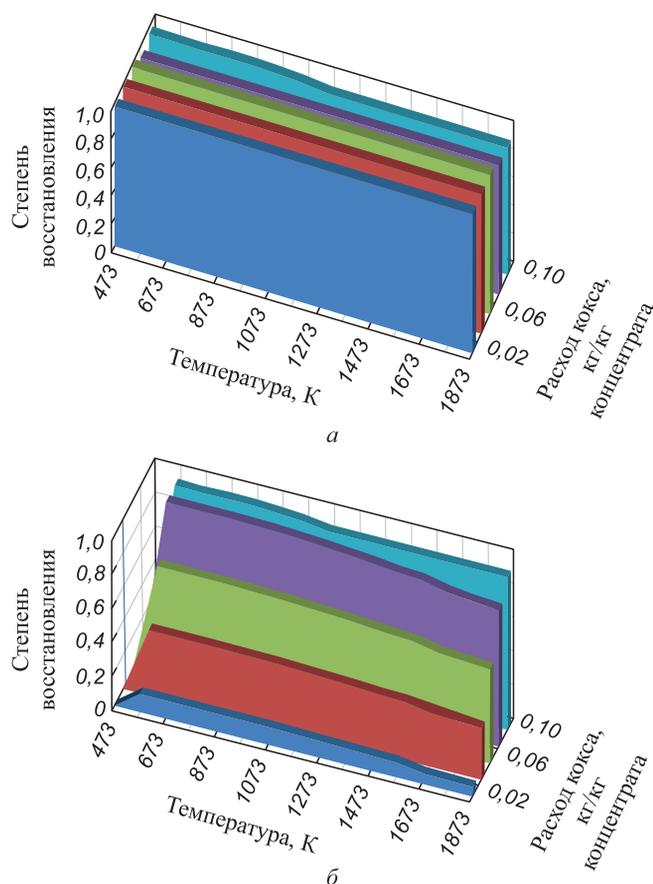


Рис. 5. Зависимости коэффициентов извлечения никеля (а) и кобальта (б) из кобальт-никелевого концентрата от температуры и расхода углерода

Fig. 5. Dependences of extraction coefficients of nickel (a) and cobalt (b) from cobalt-nickel concentrate on temperature and carbon consumption

Результаты исследования показали, что при восстановлении никеля и кобальта из концентратов полное восстановление этих элементов достигается при температурах твердофазного восстановления в интервале 573 – 1073 К. Полученные данные согласуются с результатами работ [18; 19].

Выводы

Из результатов теоретических и экспериментальных исследований следует, что при восстановлении никеля и кобальта целесообразно использовать твердофазный процесс. Никель углеродом из никелевого концентрата можно полностью восстановить при температуре 1073 К, восстановление кобальта и никеля из кобальт-никелевого концентрата начинается при температуре примерно 513 К и в дальнейшем от температуры зависит незначительно. Следовательно, концентрат никеля и кобальт-никелевый концентрат при выплавке стали в электропечи целесообразно вводить в завалку в виде окомкованных с углеродистым восстановителем смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Дмитриенко В.И., Платонов М.А. Легирование и модифицирование стали с использованием природных и техногенных материалов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2013:320.
2. Носов Ю.Н., Камшуков В.П., Соколов В.В. и др. Прямое легирование стали марганцевым агломератом в ковше на выпуске из конвертера. *Сталь*. 2004;(5):35–36.
Nosov Yu.N., Kamshukov V.P., Sokolov V.V., etc. Direct alloying of steel with manganese agglomerate in a ladle at converter tapping. *Stal'*. 2004;(5):35–36. (In Russ.).
3. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(5):344–350.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-344-350>
Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Edil'baev A.I., Edil'baev B.A. Manganese ores of the Kemerovo region – Kuzbass and methods of their enrichment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(5):344–350. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-344-350>
4. Чернобровин В.П., Мизин В.Г., Сирина Т.П., Дашевский В.Я. Комплексная переработка карбонатного марганцевого сырья: химия и технология. Челябинск: ЮУрГУ; 2009:294.
5. Курков А.В., Мамошин М.Ю., Рогожин А.А. Прорывные гидрометаллургические процессы для устойчивого развития технологий переработки минерального сырья. Москва: Научное издание ФГБУ «ВИМС»; 2019:106.
6. Pan M.C., Liu X.L., Zou R., Huang J., Han J.C. Study of heat treatment technology on medium-carbon-low-alloy-steel large hammer formation of gradient performance. *Advanced Materials Research*. 2014;881-883:1288–1292.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.881-883.1288>
7. Sun D., Li M.L., Li C.H., Cul R., Zheng X.Y. A green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;644–650:5427–5430.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5427>
8. Ayala J., Fernandez B. Recovery of manganese from silico-manganese slag by means of a hydrometallurgical process. *Hydrometallurgy*. 2015;158:68–73.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.10.007>
9. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Голодова М.А., Израильский А.О. Гидрометаллургическое обогащение полиметаллических и железомарганцевых руд. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(4):273–281. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-273-281>
Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Golodova M.A., Izrail'skii A.O. Hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(4):273–281. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-273-281>
10. Pat. 7125436 USA, IPC7 from 22 at 15/00, from 22 at 11/08. The method of autoclave leaching of nickel ores. Run L., Maurt T. No. 10/907324. Published on 10.24.2006. NPC 75/724.
11. Wang K., Li J, McDonald R.G., Browner R.E. The effect of iron precipitation upon nickel losses from synthetic atmo-

- spheric nickel laterite leach solutions: Statistical analysis and modeling. *Hydrometallurgy*. 2011;109(1-2):140–152.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.06.009>
12. Anjum F., Shahid M., Akcil A. Biohydrometallurgy techniques of low grade ores: A review on black shale. *Hydrometallurgy*. 2012;117–118:1–12.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.01.007>
 13. Giannopoulou I., Pnias D. Differential precipitation of copper and nickel from acidic polymetallic aqueous solutions. *Hydrometallurgy*. 2008;90(2–4):137–146.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.10.004>
 14. 1731623 EVP, IPC from 22 to 23/00. Method for teaching and extraction of nickel and cobalt. Н. Yakushiji, S. Ito, K. Jura, M. Shimamori. Published on 12.13.2006.
 15. Coto O., Galizia F., Hernandez I., Marrero J., Donati E. Cobalt and nickel recoveries from laterite tailings by organic and inorganic bioacids. *Hydrometallurgy*. 2008; 94(1–4):18–22.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.20-21.107>
 16. Ntuli F., Lewis A.E. Kinetic modelling of nickel powder precipitation by high-pressure hydrogen reduction. *Chemical Engineering Science*. 2009;64(9):2202–2215.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2009.01.026>
 17. Прошунин И.Е., Нохрина О.И. Комплексное извлечение ценных компонентов из железомарганцевых конкреций. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009;52(8):17–19.
Proshunin I.E., Nokhrina O.I. Complex extraction of valuable components from ferromanganese nodules. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009;52(8):17–19. (In Russ.).
 18. Козлов П.А. Исследование влияния легирования на состав жаропрочных 9 %-ных хромистых сталей для элементов теплоэнергетического оборудования: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.16.02. Москва; 2011:25.
 19. Книси В.А. Физико-химические основы и технология восстановительной плавки закиси-оксида кобальта в электропечах постоянного тока: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.16.02. Екатеринбург; 2008:31.
 20. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. В кн.: *III межд. симпозиум «Горение и плазмохимия». 24–26 августа 2005. Алматы, Казахстан*. Алматы: Казак университети; 2005:52–57.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Инна Анатольевна Рыбенко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1679-0839
E-mail: rybenkoi@mail.ru

Ольга Ивановна Нохрина, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-9448-8948
E-mail: nvi52@mail.ru

Ирина Дмитриевна Рожихина, д.т.н., профессор-консультант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-3034-4539
E-mail: rojihina_id@mail.ru

Марина Анатольевна Голодова, к.т.н., доцент кафедры архитектуры, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-0105-9285
E-mail: m.irina1976@mail.ru

Inna A. Rybenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1679-0839
E-mail: rybenkoi@mail.ru

Ol'ga I. Nokhrina, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-9448-8948
E-mail: nvi52@mail.ru

Irina D. Rozhikhina, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-3034-4539
E-mail: rojihina_id@mail.ru

Marina A. Golodova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Architecture, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-0105-9285
E-mail: m.irina1976@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

И. А. Рыбенко – проведение термодинамических расчетов, обработка результатов расчетов.
О. И. Нохрина – постановка задачи, анализ литературных источников, написание основного текста статьи, проведение экспериментов и обработка их результатов.
И. Д. Рожихина – проведение экспериментов и обработка их результатов, редактирование статьи.
М. А. Голодова – обработка термодинамических расчетов, построение графиков и их описание, выполнение рисунков.

I. A. Rybenko – conducting thermodynamic calculations, processing calculation results.
O. I. Nokhrina – setting the task, analyzing literary sources, writing the main text of the article, conducting experiments and processing their results.
I. D. Rozhikhina – conducting experiments and processing their results, editing the article.
M. A. Golodova – processing thermodynamic calculations, plotting and describing of graphs, making drawings.

Поступила в редакцию 27.10.2023
После доработки 12.01.2024
Принята к публикации 14.03.2024

Received 27.10.2023
Revised 12.01.2024
Accepted 14.03.2024