

Металлургия техногенных и вторичных ресурсов

УДК 669.243:669.054.8

DOI: 10.14529/met190408

СПОСОБ БЕЗОТХОДНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛЬНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ШЛАКОВ

А.А. Веселовский¹, С.А. Лайхан²

¹ *Еманжелинский литейно-механический завод, г. Челябинск, Россия,*

² *Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Приводятся структура и химический анализ структурных составляющих отвальных, конверторных никелевых шлаков на примере шлаков ОАО «Южно-Уральский никелевый комбинат» (ЮУНК) и Режского никелевого комбината (РНК), исследуются химические процессы, происходящие в реакционной емкости в процессе химико-термической обработки с использованием специальных компьютерных программ, химический состав и коррозионная стойкость полученных никелевых покрытий.

В настоящий момент шлаковые отвалы разрабатываются с целью извлечения полезных элементов. Отвальные шлаковые массы перемещаются с места на место, перемешиваются, а в результате дробления и сепарации увеличивается содержание в отвалах фракции 10 мм, что значительно затрудняет его дальнейшую переработку. Отвальный шлак измельчался до фракции 0,16 мм с целью наибольшей полноты вскрытия сульфидных включений, проводилась магнитная сепарация с получением магнитного и немагнитного концентратов.

Лабораторные эксперименты высокотемпературной обработки проводились с использованием печи Таммана, разогретой до температуры 1550–1600 °С, в которую в графитовом тигле помещали навеску концентратов отвальных шлаков, выдерживали при данной температуре 10–15 мин. Шлак отделялся от металла, проводились металлографические исследования, определялся выход годного и химический состав продуктов плавки. Приведены карты распределения этих элементов в шлаке. Проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Jeol78M-7001F и смонтированного на нем энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA x-mail 80. Фазовый состав определяли с использованием рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima 4.

Разрабатывается схема технологического процесса одного из вариантов безотходной переработки лежалых и вновь образованных отвальных никелевых шлаков. Продуктами такой переработки является металл, легированный никелем, молибденом, кобальтом, и продукты использования шлаков: литье, щебень, цементная добавка и т. д.

Ключевые слова: шлак, никель, отвалы, отходы, шлаковое литье, вторичные ресурсы.

Введение

Шлаковые отвалы никелевых комбинатов по характеру и составу складированных в них отходов представляют собой сложные техногенные системы. Сюда вывозятся и складироваются шлаки различных этапов технологической цепочки, имеющие различный химический состав, фазы и структуру. К основным типам никелевых шлаков, которыми заполняются отвалы, относятся шлаки шахтной и электрической плавки с высоким содержанием кремнезема и низким содержанием железа и конверторный шлак, отличающийся высоким содержанием железа и серы.

Основу промышленной переработки никелевых техногенных отходов составляют методы пирометаллургии [1–4] и гидрометаллургии [5–7]. При этом каждому из методов обычно предшествует стадия механической подготовки сырья, для чего техногенные отходы подвергают дроблению, измельчению и классификации.

В настоящий момент шлаковые отвалы разрабатываются с целью извлечения полезных элементов. Отвальные шлаковые массы перемещаются с места на место, перемешиваются, а в результате дробления и сепарации увеличивается содержание в отвалах фракции

10 мм, что значительно затрудняет их дальнейшую переработку. Территория, занятая отвалами, расширяется из-за ветров, разносящих мелкую фракцию. С другой стороны, еще более обедненный отвальный никелевый шлак уменьшает коммерческий интерес его дальнейшей утилизации. Следовательно, на настоящий момент проблема утилизации отвальных никелевых шлаков до конца не решена и представляет собой острую экологическую проблему.

Но, не смотря на множество отрицательных моментов, указанных выше, отвальные массы такого характера при правильном подходе могут быть комплексно переработаны в серию востребованных на внутреннем рынке продуктов. И в данной работе приводится один из способов такой переработки.

Обзор исследований строения и составов отвальных никелевых шлаков

Шлаки шахтной плавки сульфидных никелевых руд содержат большее количество железа в сравнении со шлаками, полученными от плавки окисленных никелевых руд, являются магнитными, и потери никеля здесь в разы больше. Составы отвальных шлаков, полученных шахтной плавкой сульфидных никелевых руд, согласно исследованиям авторов [8] приведены в табл. 1.

Фазовый состав таких шлаков [8] следующий, % масс.: 50–70 оливина $(Mg,Fe)_2SiO_4$; 15–40 гетенбергита $CaFeSi_2O_6$; 1–6 стекла; 1–8 магнетита; 4–5 сульфидов железа и никеля (пирротин, пентландит, халькозин, бернит).

Шлаки шахтной плавки окисленных никелевых руд являются немагнитными и характеризуются большим количеством CaO и низким содержанием окиси железа [9–11], % масс.: 42–46 SiO_2 ; 14–15 CaO; 10–12 MgO; 6–7 Al_2O_3 ; 14–19 Fe; 0,13–0,32 Ni; 0,7–1,0 Cr_2O_3 ; 0,014–0,031 Co; 0,23–0,30 S.

Данный вид шлаков имеет пироксеновый (диопсидовый) состав – $CaMgSi_2O_6$ с незначительным количеством стекла. В этих шлаках, как и в шлаках, полученных от плавки сульфидных никелевых руд, наблюдаются каплеобразные вкрапления сульфидов [12] основ-

ной формы потери никеля со шлаками, но в сульфидных шлаках его количество большее.

Электротепечные отвальные шлаки, полученные от рудно-термических плавов окисленных никелевых руд на ферроникель, по составу мало чем отличаются от шлаков шахтных плавов [13, 14], %: 40,2–56,0 SiO_2 ; 10–24 FeO; 2,9–20,7 CaO; 2,9–21,3 MgO; 5,1–16,1 Al_2O_3 ; 1,1–1,6 Cr_2O_3 ; 0,1–0,69 MnO.

Конверторные шлаки, поступающие в отвал после процессов обеднения, отличаются, как было отмечено выше, более высоким содержанием железа и поэтому являются магнитовосприимчивыми. По данным авторов [15], в отвал Южно-Уральского никелевого комбината после процессов обеднения направляется конверторный шлак следующего состава, %: 19,9–29,2 SiO_2 ; 31–58 Fe; 0,14–0,32 Ni; 0,11–0,20 Co и 1,2–5 S. На ОАО «Уфалейникель» [14] конверторные шлаки до обеднения содержат 0,54–1,36 % Ni, 0,21–0,45 % Co и 20,5–27,4 % SiO_2 , а после процессов обеднения их смесью колчедана, коксика и известняка – 0,16–0,36 % Ni; 0,13–0,28 % Co; 48,1–53,1 % Fe и 22,2–31,0 % SiO_2 . Фазовый состав таких шлаков следующий [14]: FeS; FeO_x ; Fe_3O_4 ; $(Cr,Fe)_2O_3$; $Ca(Fe,Mg)Si_2O_3$; Fe_2SiO_4 . При этом отмечается, что большая часть никеля в шлаке находится в сульфидной, а железа – в оксидной фазах.

Опираясь на приведенные выше исследования авторов, можно сделать вывод, что теряемые со шлаками никель, кобальт и железо преимущественно находятся в легкоплавких фазах. Сульфид никеля (штейн) в зависимости от содержания в нем серы при температуре около 900 °C находится в жидком состоянии. Фаялит при температуре 1000 °C начинает разлагаться на Fe_2O_3 и SiO_2 , а при 1500 °C фаялита как самостоятельной фазы не существует. Учитывая, что температура плавления отвального никелевого шлака 1050–1150 °C и удельный вес Fe_2O_3 и сульфидов никеля, железа и других элементов выше основной массы шлака, которая в основном представлена оксидами пустой породы, обеспечив достаточный перегрев шлака, можно про-

Таблица 1

Химический состав шлаков никелевой плавки

Номер пробы	Содержание компонентов в шлаке, % масс.								
	SiO_2	FeO	CaO	Al_2O_3	Cu	Co	Ni	S	MgO
1	36,7	39,3	9,7	2,3	0,19	0,07	0,27	0,87	7,3
2	33,2	41,5	7,5	7,5	0,43	0,25	0,57	1,69	5,6

Металлургия техногенных и вторичных ресурсов

вести гравитационное разделение металлосодержащих фаз от пустой породы.

Материалы, оборудование и методика проведения экспериментов

Исследование строения, химического и фазового составов, используемых в данных исследованиях отвальных шлаков Южно-Уральского никелевого комбината (ЮУНК) и Режского никелевого комбината (РНК), проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Jeol78M-7001F и смонтированного на нем энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA x-mail 80. Фазовый состав определяли, используя рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima 4.

Отвальный шлак измельчался до фракции 0,16 мм с целью наибольшей полноты вскрытия сульфидных включений, проводилась магнитная сепарация с получением магнитного и немагнитного концентратов.

Лабораторные эксперименты высокотемпературной обработки проводились с исполь-

зованием печи Таммана, разогретой до температуры 1550–1600 °С, в которую в графитовом тигле помещали навеску концентратов отвальных шлаков, выдерживали при данной температуре 10–15 мин. Далее тигель с расплавом изымался из печи и расплав заливался в воду. При таком способе охлаждения сохранялся средний химический состав металла и шлака. Шлак отделялся от металла, проводились металлографические исследования, определялся выход годного и химический состав продуктов плавки.

Результаты проведенных экспериментов

Микроструктура отвального никелевого шлака ЮУНК и РНК с указанием мест рентгеноспектрального анализа, полученная от закаленного в воду при 1200 °С шлака, представлена на рис. 1, а результаты химического анализа выделенных фрагментов – в табл. 2 и 3.

Результаты рентгеновского фазового анализа отвального шлака ЮУНК в графической интерпретации представлены на рис. 2.

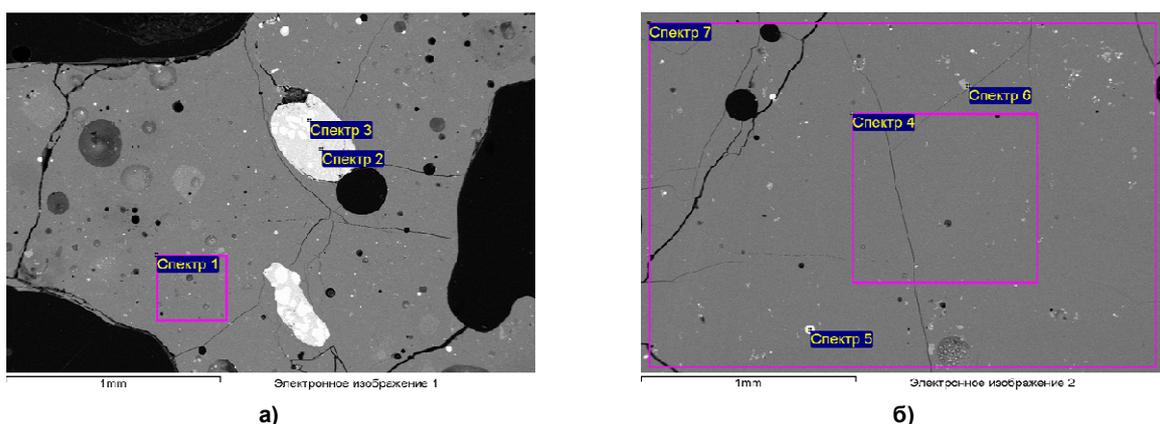


Рис. 1. Микроструктура отвальных никелевых шлаков: а – ЮУНК, б – РНК

Таблица 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (рис. 1а)

Номер спектра	Химический состав, % масс.							
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ni
1	45,11	4,79	2,28	19,44	0,38	6,50	21,51	–
2	4,10	–	–	–	33,18	–	56,86	5,86
3	–	–	–	–	–	–	53,97	46,03

Таблица 3

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (рис. 1б)

Номер спектра	Химический состав, % масс.							
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ni
4	46,85	3,76	4,70	20,28	0,25	11,64	12,51	–
5	–	–	–	–	27,71	–	46,57	25,72
6	56,36	4,62	6,14	8,43	–	4,13	20,12	0,21
7	46,89	3,83	4,72	20,07	0,28	11,52	12,61	0,08

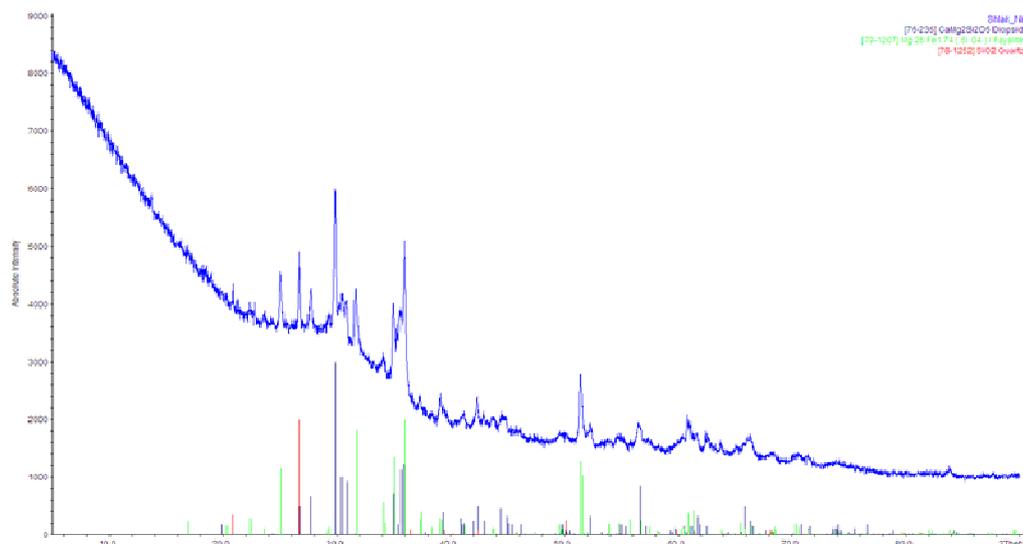


Рис. 2. Результаты рентгеновского фазового анализа отвальных шлаков (приведение к основным фазам шлака)

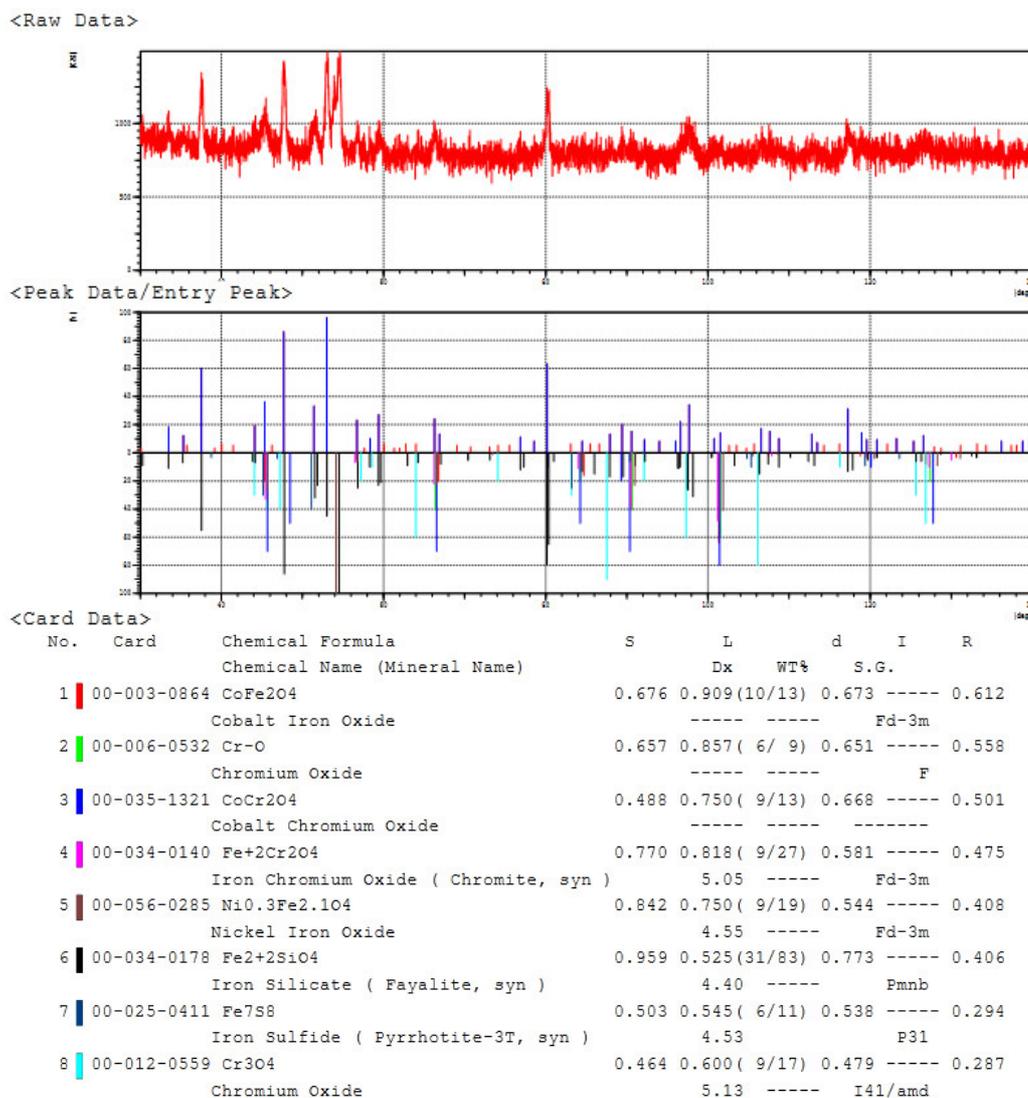


Рис. 3. Результаты рентгеновского фазового анализа аморфной составляющей отвальных никелевых шлаков

Металлургия техногенных и вторичных ресурсов

Согласно результатам рис. 2, отвальные шлаки представлены файлитом – 12 %, пироксеном $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ – 35 %, SiO_2 – 2,5 % и 50 % аморфного стекловидного шлака (см. рис. 2). Более подробный фазовый анализ аморфного стекловидного шлака (рис. 3) фиксирует мелкие фазы ферритов, хромитов, оксидов и силикатов.

Никель преимущественно находится в сульфидных включениях (см. рис. 1), механически застрявших в шлаке, размер которых в отдельных случаях достигает 500 мкм. Причем в сульфидных включениях такого размера просматриваются внутри отдельные кристаллы ферроникеля, образованные из сульфидного расплава в период кристаллизации. Поэтому вокруг кристаллов ферроникеля находится более бедный по никелю (см. рис. 1а, спектр № 2) твердый раствор на базе сульфидов железа.

В мелких сульфидных никельсодержащих включениях выделений кристаллов ферроникеля не наблюдается.

Отвальный шлак ЮУНК содержит большее количество железа и является слабомагнитным. Доля магнитных фаз в нем не превышает 10–20 % масс., а отвальный шлак РНК полностью немагнитен, в настоящий момент в отвале представлен фракцией 10 мм и является хвостом проведенной магнитной сепарации.

Магнитный и немагнитный концентраты отвального шлака ЮУНК, составов, представленных в табл. 4, переплавились в графитовом тигле. Расплав вместе со шлаком заливался в воду для сохранения среднего химического состава металла и шлака.

Микроструктура полученного металла представлена на рис. 4, а химический состав в табл. 5.

Полученные в результате переплава шлаки содержали, % масс.: 3,40–8,31 Mg; 1,50–6,11 Al; 17,60–23,37 Si; 1,78–8,69 Ca; 0,60–1,81Cr; 0,00–2,08 Fe; 0,00–0,10 Ni, остаточное кислород.

Таблица 4

Состав концентратов от отвальных шлаков ЮУНК

Вид концентрата	Химический состав, % масс.								
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Co	Ni
Магнитный	34,01–43,09	1,10–1,27	1,20–1,50	8,80–12,19	1,90–3,50	1,51–2,30	34,40–47,25	< 0,60	0,16–0,62
Немагнитный	41,64–44,13	5,64–6,09	2,80–3,40	21,39–22,00	0,52–0,62	6,62–7,00	16,68–19,22	–	0,55–0,78

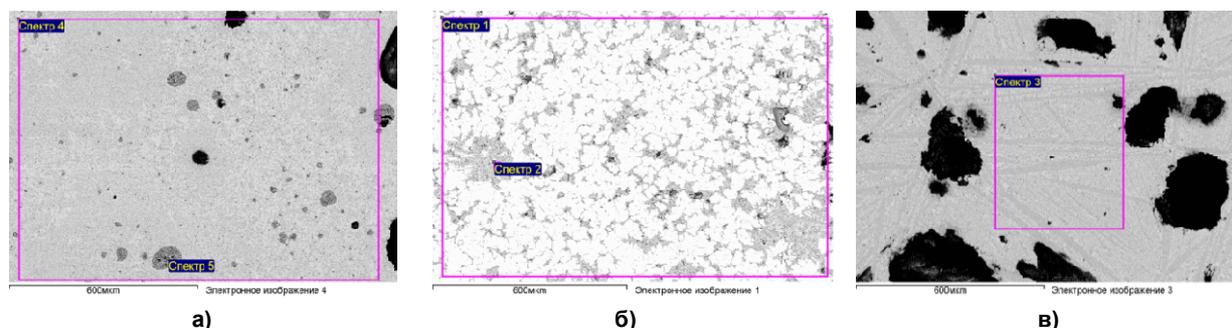


Рис. 4. Микроструктура металла с указанием мест проведения микрорентгеноспектрального анализа, полученного переплавом магнитного (а), немагнитного (б) концентратов и немагнитного отвального шлака РНК (в) при температуре 1550–1600 °С и выдержки 10 мин

Таблица 5

Химический состав полученных сплавов

Место анализа		Химический состав полученных сплавов, % масс.								ВГ, % масс.
Рисунок	№ спектра	P	S	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Mo	
4а	4	0,35	2,78	–	91,68	1,06	3,06	0,13	0,94	22
	5	0,43	12,56	–	72,76	1,31	11,43	0,47	1,04	
4б	1	–	10,48	0,19	75,60	1,28	10,37	0,40	1,67	10
	2	–	29,24	0,30	56,15	0,67	10,53	1,03	2,08	
4в	3	0,42	0,58	0,63	96,01	0,41	1,20	0,52	0,23	18

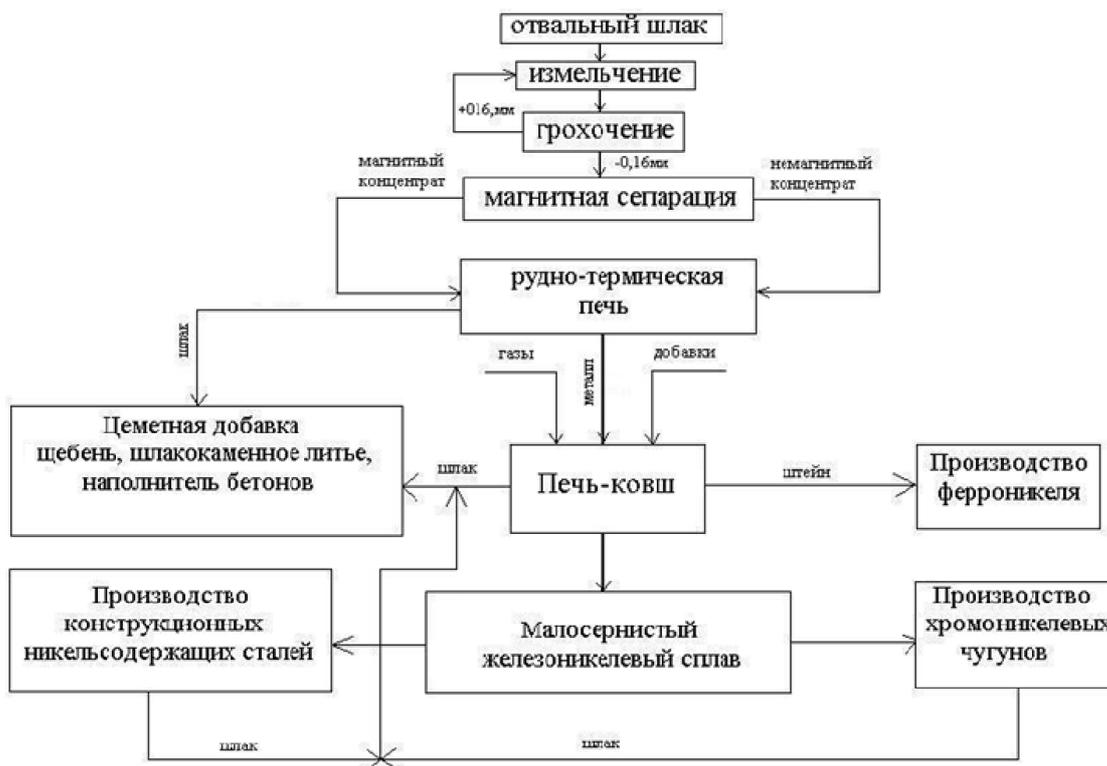


Рис. 5. Схема цикла безотходной переработки отвальных никелевых шлаков гравитационным расслоением при высоких температурах

На микроструктурах полученных сплавов (см. рис. 4) видны поры (черные включения) различных форм и размеров, свидетельствующие о начале кипения металла. Самый большой размер пор наблюдается у металла, полученного переработкой шлака РНК, а самые мелкие поры образовались в металле, полученном переплавом немагнитного концентрата шлака, что скорее всего связано с содержанием серы в полученных продуктах: чем ее меньше, тем сильнее проявляется кипение расплава.

Переплав шлаков в графитовой футеровке (другую применять нельзя из-за агрессивности окислов шлака) кроме кипения может привести к процессам науглероживания, что значительно сузит спектр дальнейшего применения полученных металлов. Поэтому следует ограничить время плавки. Высокая окисленность получаемых металлов будет препятствовать процессам науглероживания, и после необходимой выдержки для завершения процессов гравитационного разделения шлака и металла первый удаляется из печи, а последний направляется на предварительное раскисление, доводку по химическому составу и т. д. в агрегат печь-ковш, где футеровка не обязательно должна быть графитовой.

На основании проведенных исследований была разработана схема применения данного метода переработки шлаковых отвалов в условиях действующих или вновь созданных мини-заводов и цехов с минимальными капитальными затратами и широким спектром номенклатуры товаров. Данная схема приведена на рис. 5.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Никель, кобальт, почти все железо и молибден (содержание в шлаке до 0,12 %) в результате такой переработки полностью перешли в металл.

2. Переплав магнитного концентрата позволил получить низкосернистый (2–3 %) железоникелевый сплав с низким содержанием никеля (около 3 %) и 1 % масс. кобальта, такой сплав после рафинирования может быть направлен на производство отливок или заготовок для металлопроката из конструкционных низколегированных никельсодержащих сталей без дошихтовки по никелю, а также может быть использован как основа для выплавки нержавеющей марок сталей.

3. Переплав немагнитного концентрата позволяет получать продукты, состав и назна-

чение которых определяется содержанием в нем серы. Если содержание серы в исходном концентрате не превышает 0,1–0,2 % масс., как в случае с отвальным немагнитным шлаком РНЗ, то продуктом переплава является низкосернистый железоникелевый сплав, идентичный по составу сплаву, полученному переплавом магнитного концентрата. Но если содержание серы более 0,4–0,5 % масс., продуктом переплава является никелевый штейн.

Литература

1. *Металлургия меди, никеля и кобальта* / В.И. Смирнов, А.А. Смирнов, А.А. Цейдлер, И.Ф. Худяков. – М.: *Металлургия*, 1966. – 404 с.
2. Ванюков, А.В. *Теория пирометаллургических процессов* / А.В. Ванюков. – М.: *Металлургия*, 1971. – 504 с.
3. Ежов, Е.И. *Состояние производства никеля и кобальта на ведущих предприятиях Канады* / Е.И. Ежов, В.Д. Мурашов, А.В. Филатов. – М.: ЦНИИЭиИЦМ, 1989. – 129 с.
4. Ванюков, А.В. *Шлаки и штейны цветной металлургии* / А.В. Ванюков, В.Я. Зайцев. – М.: *Металлургия*, 1969. – 406 с.
5. Ерцева, Л.Н. *Исследование твердофазных превращений, происходящих при нагреве сульфидного медно-никелевого сырья, и разработка на основе полученных данных усовершенствованных технологических процессов его переработки: дис. ... д-ра техн. наук* / Л.Н. Ерцева. – СПб., 2001. – 345 с.
6. Warner, N.A. *Advanced technology for smelting McArthur river one* / N.A. Warner // *Minerals Engineering*. – 1989. – Vol. 2, no. 1. – P. 3–32.
7. Задиранов, А.Н. *Катодное электроформирование никелевых шарообразных осадков, легированных серой* / А.Н. Задиранов, Д.А. Козин, А.Б. Дровосеков // *Цветная металлургия* – 2004. – № 3 – С. 24–28.
8. Кукоев, В.А. *Исследование отвальных шлаков комбината «Южуралникель» микро-рентгеноспектральным анализом* / В.А. Кукоев, И.Д. Резник, Е.В. Козлова // *Цветные металлы*. – 1975. – № 10. – С. 13–16.
9. Коротич, В.И. *Теоретические основы окомкования железорудных материалов* / В.И. Коротич. – М.: *Металлургия*, 1986. – 151 с.
10. Селиванов, Е.Н. *Формы нахождения металлов в шлаке конвертирования никелевых штейнов* / Е.Н. Селиванов, С.А. Федичкин // *Расплавы*. – 2004. – № 3. – С. 17–23.
11. Старых, В.Б. *О возможности выпадения из силикатного раствора сульфидных корольков в процессе затвердевания шлакового расплава* / В.Б. Старых, М.Р. Цемехман, М.Р. Русаков // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 1979. – № 2. – С. 27–31.
12. Веселовский, А.А. *Извлечение никеля и кобальта из лежалых и вновь образованных отвальных никелевых шлаков* / А.А. Веселовский // *Вестник ИрГТУ*. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 194–208.
13. Диомидовский, Д.А. *Металлургия ферроникеля* / Д.А. Диомидовский, Б.П. Оницин, В.Д. Линева. – М.: *Металлургия*, 1983. – 183 с.
14. Федичкин, С.А. *Исследование процесса обеднения конверторного шлака никелевого производства восстановительно-сульфидирующими комплексами, содержащими алюминий: автореф. дис. ... канд. техн. наук* / С.А. Федичкин. – Екатеринбург, 2005. – 22 с.
15. Лозицкий, В.Ю. *Формы нахождения никеля в отвальных и конверторных шлаках и способ снижения безвозвратных потерь с ними* / В.Ю. Лозицкий, С.В. Гуляев // *Цветные металлы*. – 2008. – № 11. – С. 49–53.

Веселовский Александр Александрович, начальник службы качества, Еманжелинский литейно-механический завод, г. Челябинск; a_a_ves@mail.ru.

Лайхан Саламат Аргынулы, инженер-исследователь, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sala_laihan_93@mail.ru.

Поступила в редакцию 11 июня 2019 г.

METHODOLOGY FOR NON-WASTE RECYCLING OF DUMP NICKEL SLAGS

A.A. Veselovskiy¹, a_a-ves@mail.ru,
S.A. Laihan², sala_laihan_93@mail.ru

¹ Emanzhelinsky Foundry and Mechanical Plant, Chelyabinsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The structure and chemical analysis on the structural components of dump converter nickel slags is given on the example slags received from South Ural Nickel Plant OJSC (SUNP) and Rezhsky Nickel Plant (RNP), as well as the chemical process in the reaction container during chemical-thermal treatment using special computer programs, the chemical composition and corrosion resistance of the obtained nickel coat are studied.

Presently, slag dumps are exploited for extracting useful elements. The waste slag heap is moved from place to place, mixed, and as a result of crushing and separation, the content of 10 mm fractions in the dumps increases, which greatly complicates further processing. The waste slag was crushed to 0.16 mm fractions to maximize the opening of sulfide inclusions, while the magnetic separation was carried out to obtain magnetic and non-magnetic concentrates.

Laboratory-based experiments on high-temperature treatment were carried out using Tamman furnace preheated to 1550–16000 °C. A test charge of dump slag concentrates in a graphite crucible was placed inside and kept at above temperature for 10–15 minutes. As the slag was separated from the metal, metallographic studies were carried out, so the yield ratio and chemical composition of the smelting products were determined. Maps of the element distribution in slag are given. The studies were carried out using a Jeol78M-7001F scanning electron microscope and an Oxford INCA x-mail 80 energy-dispersive spectrometer mounted on it. A Rigaku Ultima IV X-ray diffractometer was used to determine the phase composition.

A process flow sheet is being developed for one of the non-waste recycling options for mature and newly formed dump nickel slags. The products of such recycling are metal alloyed with nickel, molybdenum, cobalt, as well as the slag utilisation products i.e. casting, crushed rock, cement additive, etc.

Keywords: slag, nickel, dumps, waste, slag casting, recyclable material.

References

1. Smirnov V.I., Smirnov A.A., Tseydler A.A., Khudyakov I.F. *Metallurgiya medi, nikelya i kobal'ta* [Metallurgy of copper, nickel and cobalt]/ Moscow, Metallurgiya Publ., 1966, 404 p.
2. Vanyukov A.V. *Teoriya pirometallurgicheskikh protsessov* [Theory of pyrometallurgical processes]. Moscow, Metallurgiya Publ, 1971, 504 p.
3. Ezhov E.I., Murashov V.D., Filatov A.V. *Sostoyaniye proizvodstva nikelya i kobal'ta na vedushchikh predpriyatiyakh Kanady* [Nickel and cobalt production status at leading Canadian plants]. Moscow, TSNIIEiITSM Publ., 1989, 129 p.
4. Vanyukov A.V., Zaytsev V.Ya. *Shlaki i shteyny tsvetnoy metallurgii* [Slags and mattes of non-ferrous metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969, 406 p.
5. Ertseva L.N. *Issledovaniye tverdogfaznykh prevrashcheniy, proiskhodyashchikh pri nagreve sul'fidnogo medno-nikelevogo syr'ya, i razrabotka na osnove poluchennykh dannykh usovershenstvovannykh tekhnologicheskikh protsessov ego pererabotki: dis. d-ra tekhn. nauk* [Research of the solid-phase transformations occurring at heating of sulfide copper-nickel raw materials, and development on the basis of the received data of the improved technological processes of its processing. Doct. sci. diss.]. St. Petersburg, 2001, 345 p.
6. Warner N.A. Advanced technology for smelting McArthur river one. *Minerals Engineering*, 1989, vol. 2, no. 1, pp. 3–32.

7. Zadiranov A.N., Kozin D.A., Drovosekov A.B. [Cathodic Electroformation of Nickel Sulfur-Doped Nickel-Shaped Deposits]. *Tsvetnaya metallurgiya*, 2004, no. 3, pp. 24–28. (in Russ.)
8. Kukoyev V.A., Reznik I.D., Kozlova E.V. [Study of waste slag from the Yuzhuralnickel Combine X-ray spectral analysis]. *Tsvetnyye metally*, 1975, no. 10, pp. 13–16. (in Russ.)
9. Korotich V.I. *Teoreticheskiye osnovy okomkovaniya zhelezo-rudnykh materialov* [Theoretical Foundations of Pelletizing Iron Ore Materials]. Moscow, Metallurgiya publ., 1986, 151 p.
10. Selivanov E.N., Fedichkin S.A. [Forms of metals in the slag of the conversion of Nickel matte]. *Rasplavy*, 2004, no. 3, pp. 17–23. (in Russ.)
11. Starykh V.B., Tsemekhman M.R., Rusakov M.R. [On the possibility of precipitation of sulfide kings from a silicate solution during solidification of the slag melt]. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 1979, no. 2, pp. 27–31. (in Russ.)
12. Veselovskiy A.A. [Extraction of nickel and cobalt from stale and newly formed dump nickel slags]. *Vestnik IrGTU*, 2018, vol. 22, no. 3, pp. 194–208. (in Russ.)
13. Diomidovskiy D.A., Onishchin B.P., Linev V.D. *Metallurgiya ferro-nikelya* [Ferronickel Metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 183 p.
14. Fedichkin, S.A. *Issledovaniye protsessa obedneniya konvertornogo shlaka nikelovogo proizvodstva vosstanovitel'no-sul'fidiruyushchimi kompleksami, sodержashchimi alyuminiy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Investigation of the process of depletion of converter slag of nickel production by reduction-sulfidizing complexes containing aluminum. Abstract of cand. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2005, 22 p.
15. Lozitskiy V.Yu., Gulyayev S.V. [Forms of finding nickel in dump and converter slags and a method for reducing irretrievable losses with them]. *Tsvetnyye metally*, 2008, no. 11, pp. 49–53. (in Russ.)

Received 11 June 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Веселовский, А.А. Способ безотходной переработки отвальных никелевых шлаков / А.А. Веселовский, С.А. Лайхан // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 62–70. DOI: 10.14529/met190408

FOR CITATION

Veselovskiy A.A., Laihman S.A. Methodology for Non-Waste Recycling of Dump Nickel Slags. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 62–70. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190408
