

# Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

УДК 669.11 + 669.24

DOI: 10.14529/met170402

## ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОТВАЛЬНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ШЛАКОВ С ЦЕЛЬЮ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА

**А.А. Веселовский<sup>1</sup>, В.Е. Роцин<sup>2</sup>, С.А. Лайхан<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО ПК «Ходовые системы», г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Оценивается возможность и эффективность применения метода химико-термической обработки (ХТО) отвальных никелевых шлаков хлорсодержащими реагентами с осаждением никеля на железной подложке в шихте. Магнитная сепарация обработанных шлаков извлекает металлические образования после ХТО в концентрат, переплавка которого позволяет получить ферроникель. Немагнитный концентрат и шлак от переплава магнитного концентрата может быть использован в цементной промышленности и в строительстве в качестве щебня или наполнителя бетонов.

*Ключевые слова:* шлак, никель, отвал, переработка шлака.

### Введение

Проблема переработки шлакоотвалов заводов черной и цветной металлургии является наиболее актуальной в настоящее время не только с точки зрения дополнительного сырья для извлечения цветных металлов и железа, но и с экологической. Утилизация такого сырья в последнее десятилетие стала национальной проблемой для многих государств мира в связи с интенсивным ростом производств и загрязнением окружающей среды.

Обеднение известных рудных месторождений и непрерывный рост производства цветных металлов вызвали научный и промышленный интерес к техногенным отходам металлургических предприятий, рассматривая эти отходы как фактор снижения себестоимости готовой металлопродукции при их вовлечении в процесс производства [1–3]. Вовлечение в производство низкосортных ломов и отходов при производстве никелевых сплавов увеличилось более чем в 1,5 раза [4]. В результате значительно выросли объемы техногенных отходов – шлаков, шламов, пыли и т. д., значительная часть которых до сих пор не используется, складывается в отвалах, хранилищах, отстойниках.

Отвальные никелевые шлаки в твердом

состоянии частично перерабатываются чисто механическими методами с целью извлечения металлической фазы – корольков. Никель, кобальт и железо, находящиеся в этих шлаках в виде химических соединений (сульфидов и оксидов), не извлекаются, так как для этого необходимы сложные технологические операции, связанные с тонким помолом и переплавом отвальных шлаков.

Немагнитная фракция отвальных шлаков частично используется для изготовления абразивного порошка для абразивной обработки металлоизделий в качестве щебня для строительства дорог неотвественного назначения, железнодорожных насыпей и т. п. При этом часть элементов теряется безвозвратно.

Поэтому, анализируя вышеизложенное, можно заключить, что экономия и резкое снижение уровня потерь цветных металлов при производстве готовой продукции – одна из приоритетных задач современного развития металлургического производства. Учитывая, что их решение должно удовлетворять требованиям экологии, актуальной представляется разработка и внедрение альтернативных технологий переработки техногенных отходов с получением готовой продукции.

### Материалы, оборудование и методика проведения экспериментов

Исследованию подвергались складированные отвальные шлаки ЮУНК усредненного состава, находящиеся в отвалах на настоящий момент. Состав отвального шлака приведен в табл. 1.

Шлак измельчался в мельнице методом истирания до фракции 0,16 мм (основная часть на калиброванном сите) на машине истирания модели ИДА-175 Уфимского производства, фото которой представлено на рис. 1.

Для проведения восстановительного обжига использовался в качестве восстановителя хлористый аммоний, разлагающийся при температуре 350 °С на хлороводород и аммиак, при более высоких температурах роль восстановителя играет свободный хлор. Дополнительно в шихту вводился кокс.

Реакционная шихта для обжига состояла из 98 % масс. шлака и 2 % масс.  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Обжиг проводился при температуре 1000 °С в течение 1–8 ч в спроектированной лабораторной установке на базе нагревательной трубной печи СУОЛ, схема которой представлена на рис. 2.

Работа установки происходит следующим образом. Камера нагрева с цилиндрическим муфелем, электронагревателем и датчиком температуры с помощью механизма поворота устанавливается в вертикальное положение (пунктирные линии на рис. 2). Реакционная шихта заполняет 90–95 % объема реторты для возможности перемешивания при вращении в

период нагрева. Затем реторта закрывается задней крышкой, камера нагрева приводится в горизонтальное положение. Вал реторты приводится во вращение приводом с частотой 3–10 об/мин. Контроль температурного режима обработки проводится датчиками температуры, установленными на муфеле и дополнительными датчиками, размещенными в гильзе. Такой контроль температуры обеспечивает равномерный нагрев по длине и сечению реторты. При необходимости создания вибрирующего слоя на реторту накладываются высокочастотные колебания от вибратора. По окончании процесса реторта остывала вместе с печью до температуры ниже 100 °С, раскрывалась и проводились дальнейшие исследования.

Исследования строения шлака и его химический состав проводились электронно-микроскопическим и рентгенофлуоресцентным анализом и анализом фазового состава.

Электронномикроскопический анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-7001F. Поверхность исследовалась в режиме вторичных и отраженных электронов, были построены карты распределения элементов по поверхности.

Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA X-ma/80, который смонтирован на микроскопе Jeol JSM-7001F.

Исследования фазового состава проводены с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima 4.

Таблица 1

Химический состав отвального шлака ЮУНК

| Состав отвальных шлаков, % масс. |         |         |           |         |         |           |          |             |     |      |
|----------------------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|----------|-------------|-----|------|
| Fe <sub>общ</sub>                | Si      | Mg      | S         | Ca      | Al      | Cr        | Ni       | Co          | Mn  | Др.  |
| 12–23                            | 19,5–22 | 4,8–6,5 | 0,18–0,58 | 10,4–11 | 2,9–3,5 | 0,65–0,95 | 0,14–0,6 | 0,035–0,042 | 0,3 | Ост. |



Рис. 1. Фотография истирающей машины ИДА-175

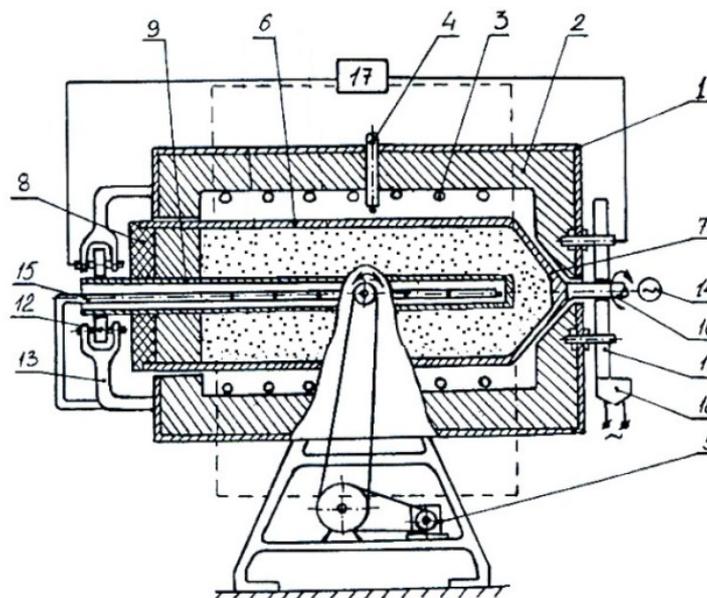


Рис. 2. Лабораторная установка для обжига отвального никелевого шлака: 1 – камера нагрева; 2 – цилиндрический муфель; 3 – электронагреватель; 4 – датчик температуры; 5 – механизм поворота; 6 – реторта; 7 и 8 – передняя и задняя крышки; 9 – глуходонная гильза; 10 – вал; 11 – передние катки; 12 – задние катки; 13 – изолятор; 14 – привод; 15 – дополнительные датчики температуры; 16 – вибратор; 17 – источник питания

## Результаты проведенных экспериментов

Химический состав отвальных никелевых шлаков и карты распределения химических элементов представлены, соответственно, на рис. 3, 4 и в табл. 2, 3.

Результаты рентгеновского фазового анализа представлены на рис. 5 и 6.

Рентгенограмма на рис. 5 позволяет выделить три основные фазы: диопсида  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  (35 % масс.), частично замещенного магнием фаялита  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  (12 % масс.), кварца  $\text{SiO}_2$  (2,5 % масс.) и большого количества аморфного стекловидного шлака (50 % масс.).

Результаты фазового анализа согласуются с данными, полученными при картировании. Никель в шлаке находится в виде фазы  $(\text{Fe,Ni})\text{S}$ , которая присутствует в малом количестве в виде отдельных включений, попавших в основной шлак механическим путем, и не может быть определена. Соотношение  $\text{Fe}:\text{Ni}$  в представленных на рис. 3 и 4 картах составляет от 1 : 1 до 1 : 5. Часть никеля находится в окисленной форме в виде ферритов (рис. 6). Опираясь на результаты рентгенограммы аморфного шлака (см. рис. 6), можно заключить, что кобальт преимущественно распределен в оксидной части шлака в виде

ферритов и хромитов, хром присутствует в виде хромитов и оксидов.

На основании данных микрорентгеноспектрального и фазового анализов отвального никелевого шлака Южно-Уральского Никелевого комбината можно заключить, что основная часть никеля входит в состав сульфидных фаз с участием железа, типа  $(\text{Fe,Ni})\text{S}$ , остальной никель замещает железо в фаялите или входит в состав ферритов. Сульфидные фазы являются мелкими каплевидными включениями. Размером от 10 до 100 мкм в массе стекловидного шлака на основе фаялита. Поэтому для полноты извлечения необходимо первоочередно тонко измельчать отвальный шлак.

Восстановление никеля из отвального никелевого шлака коксом путем расплавления позволило получить железоникелевый сплав с содержанием никеля 2,2–3,0 % масс., 0,57–0,7 % серы, остальное – железо. Выход годного составил по металлической фазе 8–10 %, степень извлечения никеля – 49 %. Извлекать данным способом никель, даже применяя для этого сульфидирующие добавки или металл-коллектор, является экономически неэффективным и технологически трудным, приходится извлекать большие объемы шлака из печи

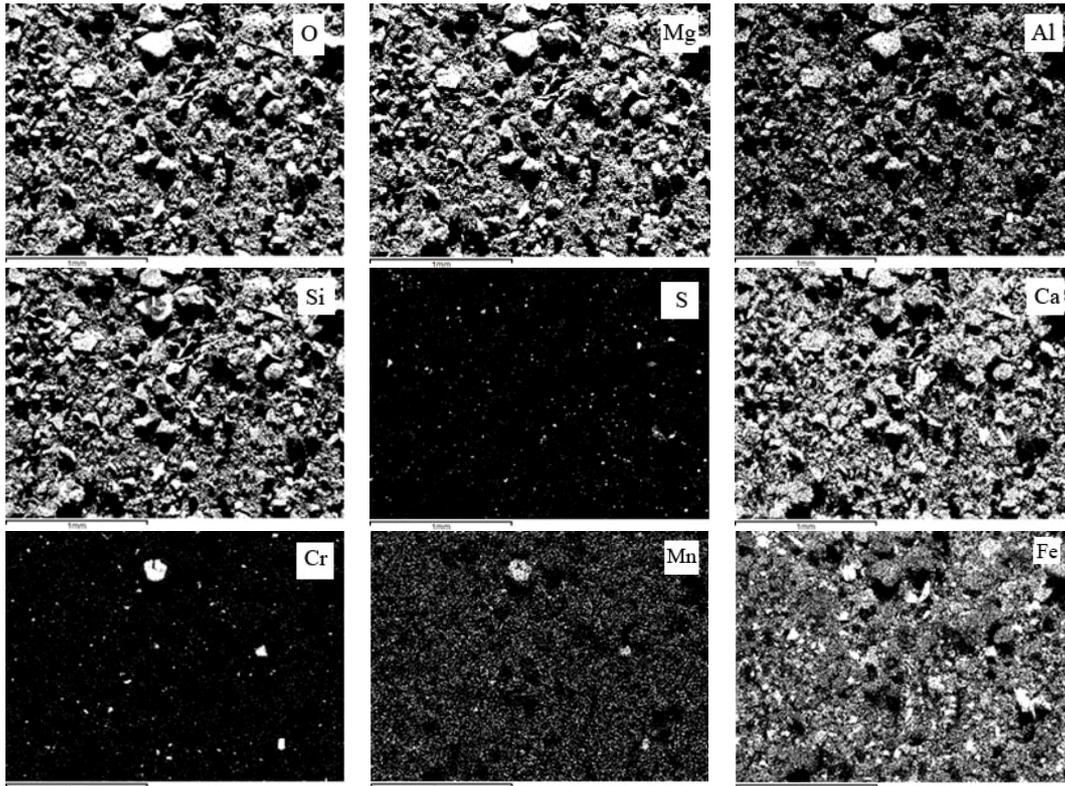


Рис. 3. Распределение элементов в шлаке на площади 2 × 3 мм

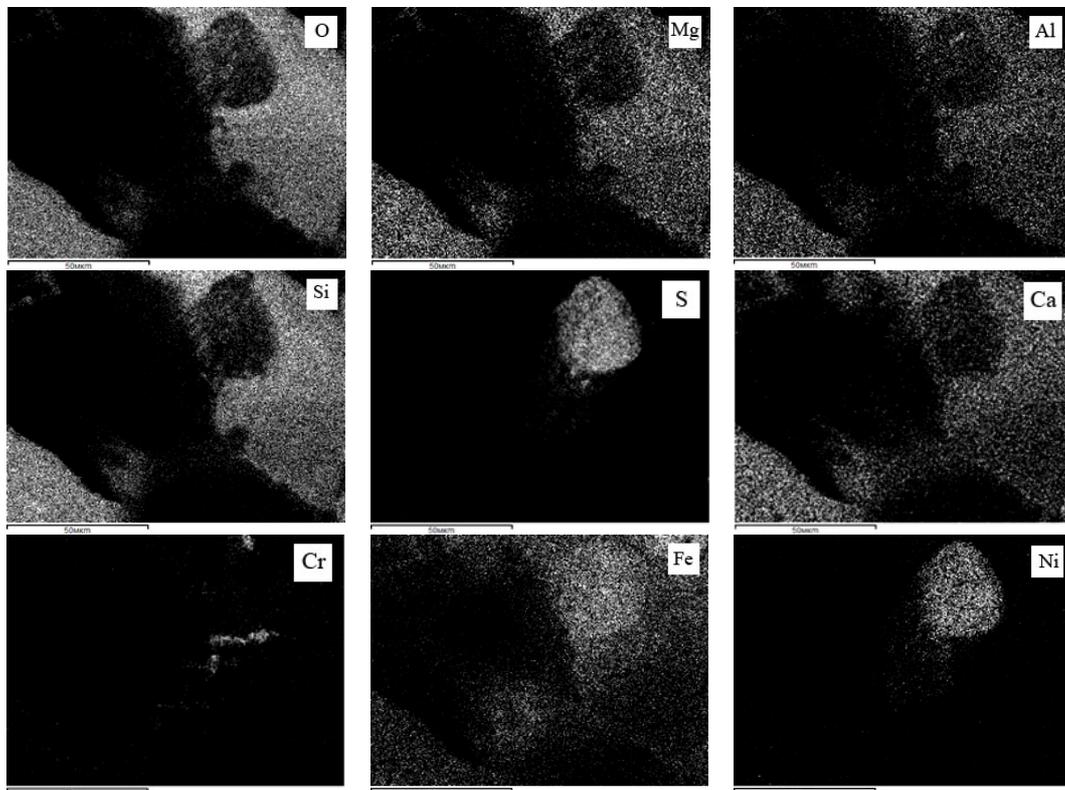


Рис. 4. Распределение элементов в шлаке на площади 100 × 200 мкм

Таблица 2

Состав размолотого и усредненного шлага, полученный от площади анализа 2 × 3 (рис. 3)

|     | O     | Na   | Mg   | Al   | Si    | S    | Ca   | Ti   | Cr   | Mn   | Fe    | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | Mo    |
|-----|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| 1   | 42,31 | 0,35 | 4,97 | 2,94 | 17,66 | 0,63 | 8,19 | 0,11 | 0,99 | 0,30 | 20,80 | 0,20 | 0,36 | 0,15 | 0,09 | 0,17  |
| 2   | 42,74 | 0,41 | 5,09 | 2,93 | 17,93 | 0,61 | 8,29 | 0,11 | 0,75 | 0,30 | 20,09 | 0,19 | 0,29 | 0,19 | 0,12 | 0,16  |
| 3   | 42,14 | 0,32 | 4,95 | 2,90 | 17,89 | 0,72 | 8,42 | 0,11 | 0,77 | 0,30 | 20,74 | 0,24 | 0,32 | 0,20 | 0,10 | 0,12  |
| 4   | 42,08 | 0,44 | 4,77 | 2,82 | 17,88 | 0,81 | 8,22 | 0,14 | 0,77 | 0,26 | 21,14 | 0,21 | 0,37 | 0,25 | 0,10 | -0,03 |
| 5   | 41,37 | 0,38 | 4,74 | 2,87 | 17,56 | 1,01 | 8,26 | 0,13 | 0,72 | 0,30 | 21,59 | 0,21 | 0,48 | 0,23 | 0,19 | 0,19  |
| Ср. | 42,13 | 0,38 | 4,90 | 2,89 | 17,78 | 0,76 | 8,28 | 0,12 | 0,80 | 0,29 | 20,87 | 0,21 | 0,36 | 0,20 | 0,12 | 0,12  |

Таблица 3

Состав никелевого включения (рис. 4)

| O     | Na   | Mg   | Al   | Si   | S     | Ca   | Ti   | Cr   | Mn    | Fe    | Co   | Ni    | Cu   | Zn   | Mo   | Итого  |
|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|--------|
| 15,97 | 0,24 | 0,88 | 0,76 | 2,71 | 13,13 | 0,78 | 0,06 | 0,14 | -0,03 | 53,98 | 1,13 | 10,32 | 0,23 | 0,34 | 0,50 | 100,00 |

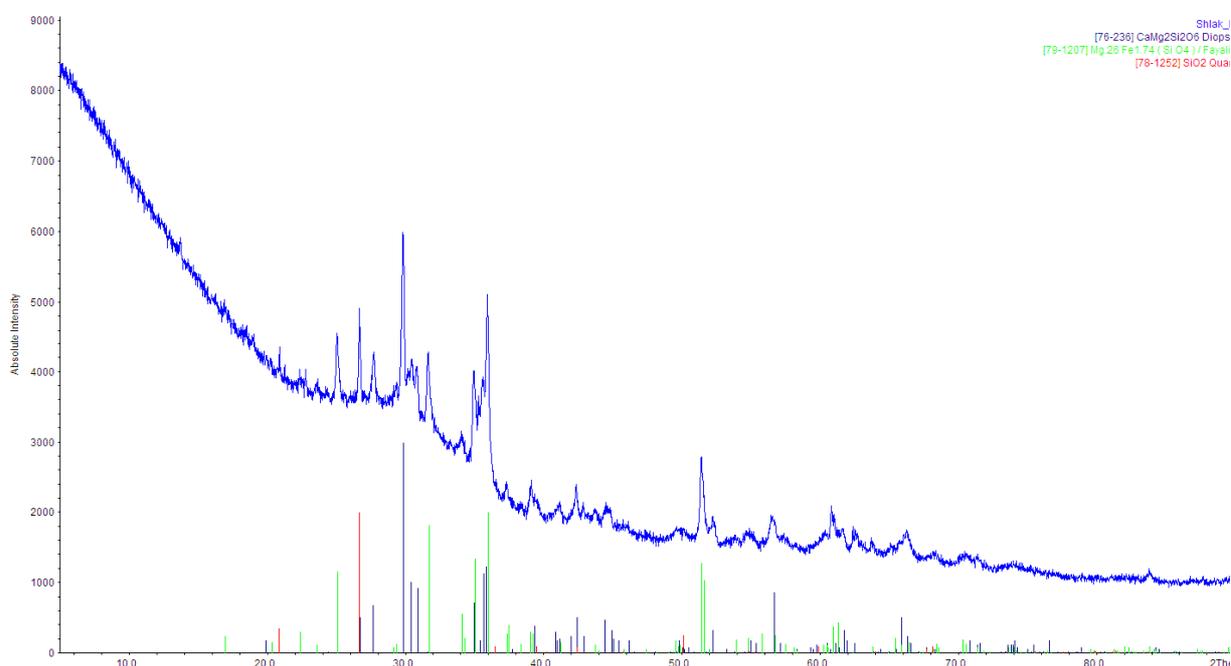
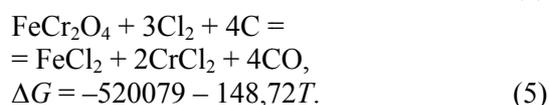
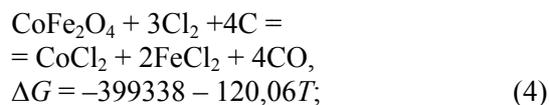
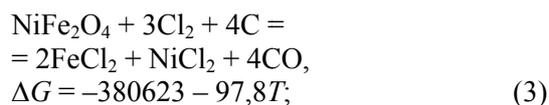
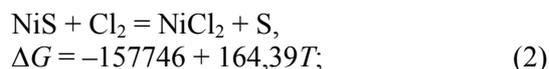
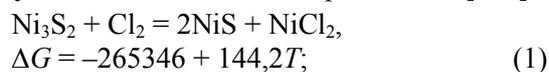


Рис. 5. Отнесение пиков рентгенограммы CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> диопсид (1), (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> фаялит (2), SiO<sub>2</sub> кварц (3)

и использовать разжижающие флюсы. Для увеличения экономических показателей переплава необходимо предварительно обогатить отвальный никелевый шлак до содержания в нем никеля, эквивалентное ряду окисленных никелевых руд разрабатываемых месторождений [5].

Гораздо эффективнее из технологических и экономических соображений извлекать никель из отвальных шлаков в магнитный концентрат, используя хлористый аммоний и кокс. Хлористый аммоний, начиная с температуры 350 °С, разлагается с выделением хлороводорода, который при более высоких температурах диссоциирует с образованием свободного хлора. Кокс создает восстановительную атмосферу и участвует в процессах вос-

становления никеля и железа. Процессы, протекающие в шихте, могут быть реализованы следующими химическими процессами [6–9]:



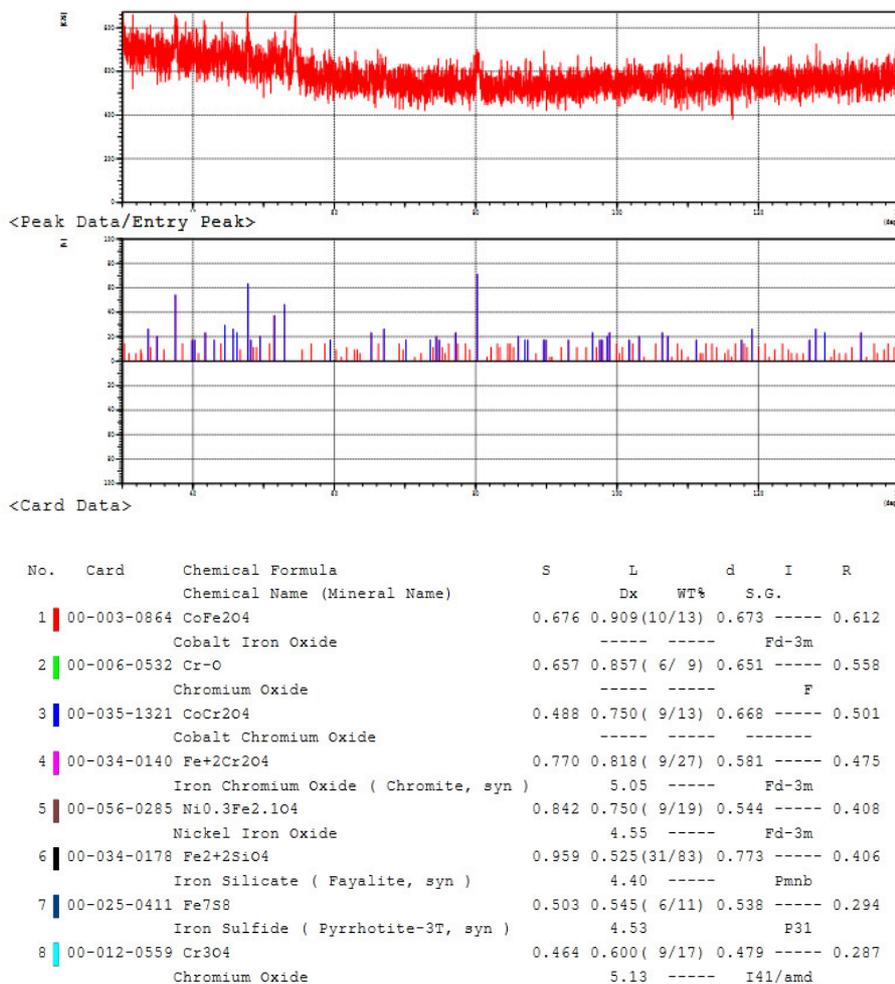


Рис. 6. Рентгенограмма аморфной составляющей никелевого шлака

Образующийся хлорид никеля, начиная с температуры 978 °С, возгоняется и конденсируется на поверхности железных включений, которые, в свою очередь, образуются при восстановлении железа из оксидов в шлаке на границах коксовых включений (рис. 7, а). В результате реакции обмена железные частицы обогащаются никелем и увеличиваются в размерах (рис. 7, б и табл. 4).

Последующее измельчение спекшейся шихты и магнитная сепарация позволяют извлечь данные образования в магнитный концентрат. Результаты анализа магнитной части шлака с площади 2 × 3 мм представлены в табл. 5. Структура, места точечного спектрального анализа и результаты химического анализа с исследуемой площади поверхности немагнитной части шлака приведены на рис. 8 и в табл. 6.

Химический состав структурных составляющих немагнитной части шлака после хи-

мико-термической обработки (рис. 8, а) представлен в табл. 7. Последующий переплав магнитной части шлака, составов, приведенных в табл. 8, позволяет получить ферроникель, химический состав которого приведен в табл. 9.

Анализируя данные табл. 7, можно заключить, что в большинстве структурных составляющих немагнитной части шлака отсутствует никель, так как он перешел в магнитный концентрат. Степень извлечения отвального никеля в магнитный концентрат составляет 80–85 %, а при последующем переплаве никель практически полностью переходит в расплав. Химический состав шлака, полученный от переплава магнитного концентрата, представлен в табл. 10.

Согласно данным табл. 10, шлак представляет собой очищенную от железа и никеля пустую породу в виде стекловидной фазы темно-блестящего цвета.

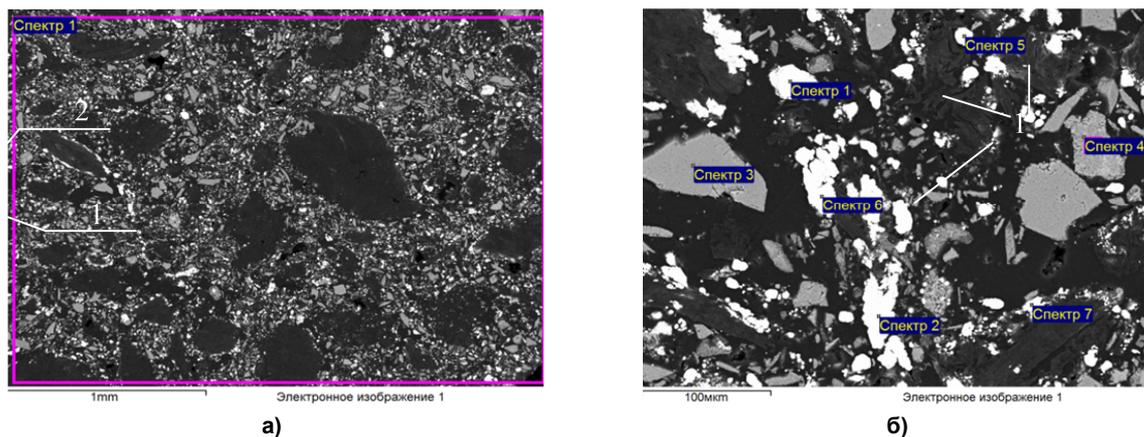


Рис. 7. Морфология зарождения металлической фазы в шихте (а) и корольки ферроникеля (б) в шихте (2 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 10 % кокс, остальное – шлак) после ее нагрева и выдержки при температуре 1000 °С в течение 1 ч: 1 – корольки ферроникеля; 2 – кокс

Таблица 4  
Химический состав структурных составляющих шлака после прокалики (рис. 7, б)

| Номер спектра | Химический состав, % масс. |     |     |      |     |      |     |      |     |      |
|---------------|----------------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
|               | O                          | Mg  | Al  | Si   | S   | Ca   | Cr  | Fe   | Co  | Ni   |
| 1             | 1,3                        | 0   | 0,1 | 0,2  | 0,2 | 0,1  | 0   | 76,7 | 2,0 | 19,8 |
| 2             | 1,6                        | 0   | 0   | 0,2  | 0,3 | 0,1  | 0   | 95,8 | 0,8 | 1,9  |
| 3             | 42,7                       | 7,0 | 3,3 | 21,0 | 0   | 13,9 | 0,5 | 11,4 | 0,1 | 0,1  |
| 4             | 40,2                       | 4,7 | 3,4 | 20,9 | 0,4 | 11,7 | 1,2 | 17,2 | 0,1 | 0,1  |
| 5             | 1,0                        | 0,1 | 0   | 0,1  | 0,3 | 0,1  | 0   | 96,5 | 0,9 | 1,5  |
| 6             | 1,3                        | 0   | 0   | 0,2  | 0,2 | 0    | 0   | 96   | 1,0 | 1,7  |
| 7             | 2,6                        | 0,4 | 0,1 | 0,3  | 0,3 | 0,1  | 0,1 | 94,4 | 0,8 | 1,7  |

Таблица 5  
Химический анализ магнитного концентрата (рис. 7, а)

| Номер | O    | Mg  | Al  | Si   | S   | Ca  | Cr  | Fe   | Co  | Ni  |
|-------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| 1     | 36,0 | 3,2 | 1,8 | 13,0 | 0,3 | 5,3 | 0,5 | 39,0 | 0,3 | 0,5 |

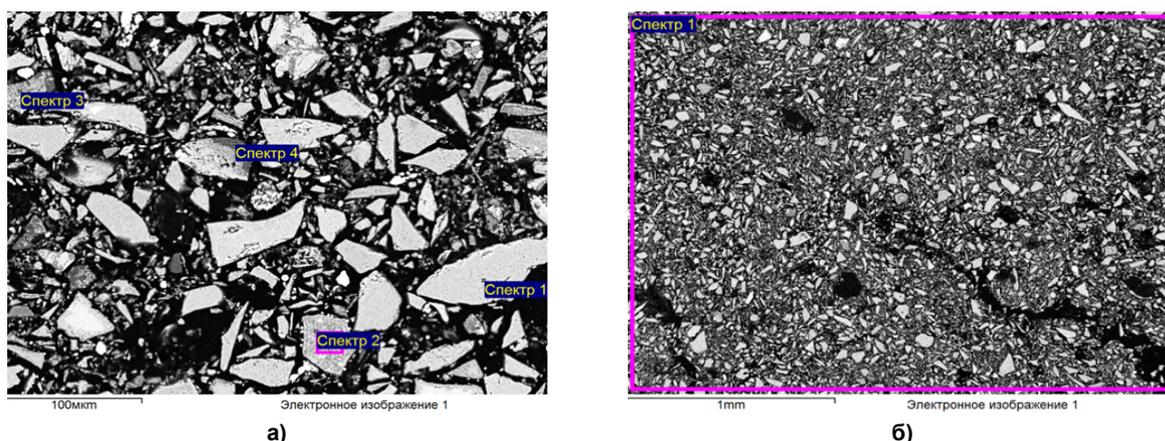


Рис. 8. Структура немагнитной фракции шлака с площади 500 × 400 мкм (а) и 3 × 2 мм (б), полученная от магнитной сепарации шихты (2 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 10 % кокс, остальное – шлак), прокаленной в течение 1 ч при 1000 °С

Таблица 6  
Химический анализ немагнитной фракции (рис. 8, б)

| Номер | O    | Mg  | Al  | Si   | S   | Ca   | Cr  | Fe | Co  | Ni  |
|-------|------|-----|-----|------|-----|------|-----|----|-----|-----|
| 1     | 43,8 | 5,2 | 3,1 | 22,4 | 0,4 | 10,1 | 0,8 | 14 | 0,2 | 0,1 |

Таблица 7

Химический состав структурных составляющих хвостов магнитной сепарации

| Номер спектра | Химический состав, % масс. |     |     |      |     |      |     |      |     |     |
|---------------|----------------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|-----|
|               | O                          | Mg  | Al  | Si   | S   | Ca   | Cr  | Fe   | Co  | Ni  |
| 1             | 42,4                       | 5,3 | 2,6 | 22,6 | 0,1 | 14,4 | 0,8 | 11,7 | 0,1 | 0,0 |
| 2             | 41,1                       | 6,3 | 2,6 | 23,9 | 0,0 | 9,9  | 0,7 | 15,4 | 0,2 | 0,0 |
| 3             | 36,0                       | 7,4 | 0,3 | 27,1 | 0,0 | 11,9 | 1,0 | 16,5 | 0,0 | 0,0 |
| 4             | 40,5                       | 0,1 | 0,4 | 46,6 | 0,3 | 0,2  | 0,1 | 12,1 | 0,1 | 0,3 |

Таблица 8

Состав шихты и выход годного магнитного концентрата

| № опыта | Шихта для ХТО, % масс. |                    |      | Температура, °C | Выдержка, ч | Концентраты после сепарации, % масс. |         |
|---------|------------------------|--------------------|------|-----------------|-------------|--------------------------------------|---------|
|         | Шлак                   | NH <sub>4</sub> Cl | Кокс |                 |             | Магн.                                | Немагн. |
| 1       | 88                     | 2                  | 10   | 1000            | 1           | 15                                   | 85      |
| 2       | 88                     | 2                  | 10   | 1000            | 2           | 69                                   | 31      |
| 3       | 88                     | 2                  | 10   | 1000            | 4           | 64                                   | 36      |
| 4       | 88                     | 2                  | 10   | 1000            | 6           | 54                                   | 46      |
| 5       | 88                     | 2                  | 10   | 1000            | 8           | 62                                   | 38      |

Таблица 9

Химический состав и выход годного ферроникеля, полученного от переплава магнитного концентрата (см. табл. 8)

| № опыта | Шихта, % масс. |      | T, °C | ВГ, % | Химический состав ферроникеля, % масс. |     |     |     |     |      |
|---------|----------------|------|-------|-------|--|-----|-----|-----|-----|------|
|         | Конц.          | Кокс |       |       | Cr                                     | Ni  | S   | Si  | Co  | Fe   |
| 1       | 99             | 1    | 1550  | 34    | 0,8                                    | 9,2 | 3,0 | 3,0 | 0,8 | Ост. |
| 2       | 99             | 1    | 1550  | 28    | 1,0                                    | 6,1 | 1,7 | 4,3 | 0,7 | Ост. |
| 3       | 99             | 1    | 1550  | 27    | 1,1                                    | 6,2 | 1,8 | 3,4 | 0,9 | Ост. |
| 4       | 99             | 1    | 1550  | 32    | 1,9                                    | 6,2 | 4,5 | 6,0 | 0,8 | Ост. |
| 5       | 99             | 1    | 1550  | 34    | 1,2                                    | 7,0 | 4,2 | 3,0 | 0,7 | Ост. |

Таблица 10

Химический состав шлака, полученный после переплава магнитной фракции

| № опыта | Химический состав, % масс. |       |       |      |      |      |      |
|---------|----------------------------|-------|-------|------|------|------|------|
|         | O                          | Al    | Si    | Ca   | Mn   | Fe   | Ni   |
| 1       | 54,12                      | 15,44 | 20,82 | 7,93 | 0,28 | 0,08 | 0,09 |
| 2       | 53,96                      | 18,29 | 19,38 | 8,05 | 0,16 | 0,1  | 0,08 |
| 3       | 53,75                      | 15,21 | 21,62 | 8,95 | 0,26 | 0,11 | 0,10 |
| 4       | 53,51                      | 20,18 | 18,20 | 7,86 | 0,28 | 0,00 | 0,00 |
| 5       | 52,89                      | 20,70 | 17,16 | 8,99 | 0,15 | 0,08 | 0,03 |

### Заключение

1. Проведенными анализами установлено, что в отвальном никелевом шлаке содержание никеля в среднем 0,36 % масс., основная часть которого входит в состав сульфидных фаз с участием железа, типа (Fe,Ni)S, остальной никель замещает железо в фаялите или входит в состав ферритов.

2. Кобальт преимущественно распределен в оксидной части шлака в виде ферритов и хромитов, основная часть железа сосредоточена в фаялите.

3. Переработка отвальных никелевых шла-

ков представленным способом позволяет извлекать до 80–85 % никеля и хрома, последний содержится в отвальных никелевых шлаках в качестве примеси, перешедшей из руды, и железа в количестве 55–65 % масс., которая переходит в магнитный концентрат после химико-термической обработки.

### Литература

1. Куприянов, Ю.П. Шахтная плавка вторичного сырья цветных металлов / Ю.П. Куприянов. – М: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1995. – 164 с.

2. Шохин, В.Н. Гравитационные методы обогащения / В.Н. Шохин, В.Н. Лопатин. – М.: Недра, 1993. – 350 с.

3. Стрельцов, Ф.Н. Повышение эффективности переработки шлаков на заводах ОЦМ / Ф.Н. Стрельцов, А.Н. Задиранов // Цветные металлы. – 1993. – № 1. – С. 61–64.

4. Козырев, В.М. Основы современной экономики / В.М. Козырев. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 368 с.

5. Диомидовский, Д.А. Metallurgy ferronickel / Д.А. Диомидовский, Б.П. Оницин. – М.: Metallurgy, 1983. – 183 с.

6. Вайсбурд, С.Е. Физико-химические

свойства и особенности строения сульфидных расплавов / С.Е. Вайсбурд. – М.: Metallurgy, 1996. – 304 с.

7. Maurel C. Types de reactions d'oxidation observes au cours de analysethermiquedifferentielle, dans air mineral sulfures et arsenies de Fe, Co, Ni, Cu, Zn // Bull. Soc. Franc. Min. Crist. – 1994. – Т. 87, no. 3. – P. 377–385.

8. Tanabe, T. Oxidation of mixed nickel-iron sulfide / T. Tanabe, M. Ogawa // J. Jap. Inst. Metals. – 1996. – Vol. 50, no. 2. – P. 192–200.

9. Мечев, В.В. Особенности сульфидирования ферритов цветных металлов / В.В. Мечев // Металлы. – 1994. – № 2. – С. 3–10.

**Веселовский Александр Александрович**, канд. техн. наук, доцент, директор по качеству, ООО ПК «Ходовые системы», г. Челябинск; a\_a\_ves@mail.ru.

**Рощин Василий Ефимович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой пирометаллургических процессов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; roshchinve@susu.ac.ru.

**Лайхан Саламат Армангулы**, магистрант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sala\_laihan\_93@mail.ru.

*Поступила в редакцию 10 октября 2017 г.*

---

DOI: 10.14529/met170402

## CHEMICAL HEAT TREATMENT OF DUMPED NICKEL SLAGS TO RECOVER NICKEL AND IRON

**A.A. Veselovskiy**<sup>1</sup>, a\_a\_ves@mail.ru,  
**V.E. Roshchin**<sup>2</sup>, roshchinve@susu.ac.ru,  
**S.A. Lajhan**<sup>2</sup>, sala\_laihan\_93@mail.ru

<sup>1</sup> LLC PC "Running System", Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Here is estimated the feasibility and efficacy of the application of the method of chemical-thermal treatment of dumped nickel slags chlorides with nickel deposition reagents on iron substrate in the charge. Magnetic separation of treated slags retrieves metal education after in concentrate smelting which allows get ferronickel. Not magnetic concentrate and slag from the furnaces of the magnetic concentrate can be used in the cement industry and in construction as rubble or filler concrete.

*Keywords: slag, nickel, Blade, slag recycling.*

### References

1. Kupriyanov Yu.P. *Shakhtnaya plavka vtorichnogo syr'ya tsvetnykh metallov* [Shaft Melting of Recycled Non-Ferrous Metals]. Moscow, TsNIItsvetmet ekonomiki i informatsii Publ., 1995. 164 p.

2. Shokhin V.N., Lopatin V.N. *Gravitatsionnye metody obogashcheniya* [Gravitational Enrichment Methods]. Moscow, Nedra Publ, 1993. 350 p.

3. Strel'tsov F.N., Zadiranov A.N. [Increase of Effectiveness of Processing of Clinkers at NFMP]. *Tsvetnye metally*, 1993, no. 1, pp. 61–64. (in Russ.)
4. Kozyrev V.M. *Osnovy sovremennoy ekonomiki* [Basics of Modern Economy]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1998. 368 p.
5. Diomidovskiy D.A., Onishchin B.P. *Metallurgiya ferronikelya* [Ferronickel Metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 183 p.
6. Vaysburd S.E. *Fiziko-khimicheskie svoystva i osobennosti stroeniya sul'fidnykh rasplavov* [Physicochemical Characteristics of Structure of Sulfide Melt]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1996. 304 p.
7. Maurel C. Types de reactions d'oxidation observes au cours de analysethermiquedifferentielle, dans air mineral sulfures et arsenies de Fe, Co, Ni, Cu, Zn. *Bull. Soc. Franc. Min. Crist.*, 1994, T. 87, no. 3, pp. 377–385.
8. Tanabe T., Ogawa M. Oxidation of Mixed Nickel-Iron Sulfide. *J. Jap. Inst. Metals*, 1996, vol. 50, no. 2, pp. 192–200.
9. Mechev, V.V. *Osobennosti sul'fidirovaniya ferritov tsvetnykh metallov* [Features of Sulphurizing of Ferrite of Nonferrous Metals]. *Metally*, 1994, no. 2, pp. 3–10. (in Russ.)

Received 10 October 2017

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Веселовский, А.А. Химико-термическая обработка отвальных никелевых шлаков с целью извлечения никеля и железа / А.А. Веселовский, В.Е. Рощин, С.А. Лайхан // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 22–31. DOI: 10.14529/met170402

**FOR CITATION**

Veselovskiy A.A., Roshchin V.E., Lajhan S.A. Chemical Heat Treatment of Dumped Nickel Slags to Recover Nickel and Iron. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 22–31. (in Russ.) DOI: 10.14529/met170402