

**П.И. ПИЛОВ, Ю.С. МОСТЫКА**, д-ра техн. наук,**Л.З. ГРЕБЕНЮК**, канд. техн. наук,**В.Ю. ШУТОВ, А.И. ЗУБАРЕВ**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

**В.С. КУЦИН**, канд. техн. наук

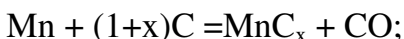
(Украина, Никополь, ПАО "Никопольский завод ферросплавов"),

**М.И. ГАСИК**, д-р техн. наук,**О.И. ПОЛЯКОВ**, канд. техн. наук,**И.В. ЦВЕТКОВ**

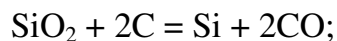
(Украина, Днепропетровск, Национальная металлургическая академия Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ  
ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА И ВЫБОР МЕТОДА МАГНИТНОЙ  
СЕПАРАЦИИ ОТВАЛЬНОГО ШЛАКА С ЦЕЛЬЮ ИЗВЛЕЧЕНИЯ  
ВКЛЮЧЕНИЙ СПЛАВА**

Ферросиликомарганец – комплексный раскислитель и легирующий ферросплав на основе марганца и кремния. В соответствии со стандартом ДСТУ 3548-97 ферросиликомарганец выплавляется четырех марок MnC12, MnC17, MnC22, MnC25 с содержанием кремния от 10 до 35% масс. включительно. Наиболее крупнотоннажным является производство сплава марки MnC17 (15-20% Si, 65% Mn, 2,5% C, 0,1-0,6% P, 0,03% S). В качестве исходных шихтовых материалов в условиях ПАО "НЗФ" используется обогащенная никопольская марганцевая руда (концентрат), овручский кварцит, металлургический коксик. Марганцевые концентраты предварительно подвергаются агломерации. Ферросиликомарганец как и высокоуглеродистый ферромарганец (ДСТУ 3547-97, 75% Mn до 6% Si, до 7% C, 0,1...0,7% P, 0,03% S) выплавляется в рудовосстановительных дуговых электропечах типа РПЗ-63, РПГ-63 и РКГ-75 с установленными печными трансформаторами единичной мощностью 63 и 75 МВА. Марганец и кремний из чистых фаз (активность равна единице) восстанавливается по реакции:



$$\Delta G_T^\circ = 196293 - 123 \cdot T, \text{ Дж/моль.}$$



$$\Delta G_T^\circ = 697390 - 359,07 \cdot T, \text{ Дж/моль.}$$

Теоретические температуры начала этих реакций соответственно равны 1597К(1324 °С) и 1942К(1669 °С). Химизм процесса получения ферросиликомарганца может быть представлен в общем виде реакцией

## **Магнітна і електрична сепарація**



Ферросиликомарганец характеризується складною мікроструктурою, змінюючоюся від карбосилицидної фази  $\text{Mn}_{17}\text{Si}_4\text{C}_2$  при малому вмісті кремнію (марка сплаву МнС12) до  $\text{Mn}_5\text{Si}_3\text{C}_x$  (МнС17, МнС22) і  $\text{MnSi}$  (МнС25 при 33% Si). Процеси виплавки ферросиликомарганця характеризуються утворенням великої кількості печного шлаку, вихід якого становить 1,2-1,4 т на тону ферросиликомарганця. Шлак має наступний хімічний склад, % мас:

| MnO   | SiO <sub>2</sub> | CaO   | MgO     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | P    | S   |
|-------|------------------|-------|---------|--------------------------------|------|-----|
| 15-17 | 46-49            | 10-13 | 2,0-2,7 | 3,0-3,5                        | 0,01 | 0,5 |

Ферросиликомарганец і шлак з печі випускають через одну лутку в футерований ковш, з переливом шлаку по ходу випуску в сталеву шлакову чашу. Розливка сплаву проводиться на розливочних машинах конвеєрного типу. Отвальний шлак піддається дробленню, фракціонуванню з отриманням шлакового щебня, з реалізацією його будівельної індустрії.

Важко відзначити, що корисне використання марганцю в товарний ферросиликомарганец становить 78-82%. Знаючи, що 12-15% марганцю втрачається з отвальним шлаком у зв'язаному з кремнієм вигляді складних сполук силікатного складу, 5-6% марганцю, відновленого з шихти, втрачається з щебнем і погіршує його якість.

З метою вилучення великих включень сплаву з шлакового щебня на ПАО "НЗФ" розроблено і впроваджено технологію вилучення великих фракцій сплаву з використанням установки сортування речовин – модуля кускової сортування МКС/Т1, – розробленою ООО НПП "ГАМАЮН" (г. Кривий Ріг).

Технічним результатом технології з використанням модуля МКС/Т1 є сортування кускового матеріалу з використанням електронної сенсорикою і сучасних програмних продуктів для обробки інформаційних потоків. Впровадження модуля МКС/Т1 з інтегруванням його в існуючу технологічну схему переробки шлаку дробленням і розсівом дозволяє вилучити великі фракції сплаву і металізованого шлаку – металоконцентрату з 38-40% вмістом марганцю. Сортуванню піддається шлаковий щебень трьох фракцій 10-20, 20-40 і 40-70 мм. Як показали дослідження, визначена частина включень сплаву не вилучається з фракції щебня нижче 10 мм.

У зв'язі з цим, метою нинішнього дослідження було вивчення магнітної чутливості включень ферросиликомарганця з різним вмістом кремнію з метою прогнозування можливості доцільного відновлення сплаву, що міститься в шлаковому щебні фракції 0-10 мм.

### *Дослідження магнітних властивостей ферромарганцевих продуктів*

Магнітна сила, що діє на досліджувану зразок, обчислюється за формулою:

## Магнітна і електрична сепарація

$$F_m = \mu_o \alpha V_{обр} H \frac{dH}{dx}, \quad (1)$$

где  $\mu_o$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\alpha$  – объемная магнитная восприимчивость (безразмерная величина);  $V_{обр}$  – объем образца, измеренный либо вычисленный по длине образца  $L_{обр}$  и площади поперечного сечения образца  $S_{обр}$ :

$$V_{обр} = S_{обр} L_{обр}; \quad (2)$$

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м.

В формуле (1) предполагается, что в пределах объема  $V_{обр}$  напряженность магнитного поля  $H$  и ее производная  $\frac{dH}{dx}$  постоянны (т.е. образец имеет малые размеры).

Если напряженность магнитного поля  $H$  в пределах исследуемого образца не постоянна, то вместо формулы (1) берется ее аналог в виде:

$$F_m = \mu_o \cdot \alpha \cdot \int H \frac{dH}{dx} dV. \quad (3)$$

В формуле (3) предполагается, что  $\alpha$  – величина постоянная для данного образца.

Если функция  $H(x)$  линейная, то  $\frac{dH}{dx} = const$ , и ее можно вынести за знак интеграла, а интеграл  $\int H dV$  можно заменить произведением объема  $V_{обр}$  на среднее значение  $H$ , определяемое по формуле:

$$H_{cp} = \frac{H_2 + H_1}{2}. \quad (4)$$

На этих предположениях основан известный метод длинного образца, который и используется в данной работе.

Напряженность  $H$ , измеряется в двух точках (рис. 1):

1-я – в плоскости нижнего сечения образца ( $H_1$ );

2-я – в плоскости верхнего сечения образца ( $H_2$ ).

## Магнітна і електрична сепарація

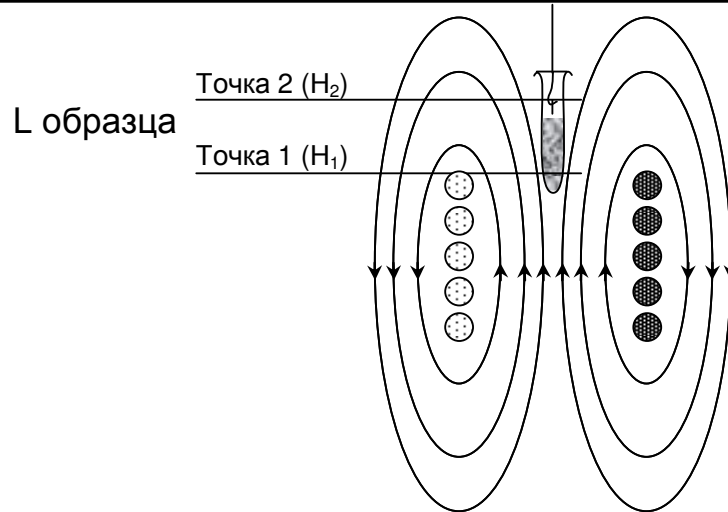


Рис. 1. Схема размещения исследуемого образца относительно электромагнитной катушки

Если  $H(x)$  – линейная функция от  $x$ , то есть

$$H(x) = H_1 + \frac{H_2 - H_1}{L_{обр}} x,$$

то

$$\frac{dH}{dx} = \frac{H_2 - H_1}{L_{обр}}. \quad (5)$$

В формулу (1) подставим  $H \frac{dH}{dx}$  для случая линейности функции  $H(x)$ , то есть формулы (4) и (5):

$$H = H_{cp} = \frac{H_1 + H_2}{2};$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{H_2 - H_1}{L_{обр}};$$

$$H \frac{dH}{dx} = \frac{H_2^2 - H_1^2}{2L_{обр}}. \quad (6)$$

Таким образом, магнитная сила, действующая на образец пробы, будет определяться по формуле:

$$F_m = \mu_o \cdot \varpi \cdot S_{обр} \cdot L_{обр} \cdot \frac{H_2^2 - H_1^2}{2L_{обр}};$$

или, после сокращений,

$$F_m = \frac{1}{2} \mu_o \cdot \alpha \cdot S_{обр} \cdot (H_2^2 - H_1^2). \quad (7)$$

Отсюда магнитная восприимчивость определяется следующим выражением:

$$\alpha = \frac{2F_m}{\mu_o S_{обр} (H_2^2 - H_1^2)}. \quad (8)$$

Если в результате измерений  $F_m$  и последующей обработки экспериментальных данных окажется, что величина  $\alpha$  принимает различные значения для различных значений напряженности магнитного поля, то следует повторить измерения по методу малого образца. В этом случае образец должен быть достаточно малым в том смысле, что в пределах его объема напряженность магнитного поля  $H$  и производную  $\frac{dH}{dx}$  можно считать постоянными.

### *Измерение магнитной восприимчивости проб ферросплавов*

На рис. 2 представлен стенд для измерения магнитных свойств ферросплавов.

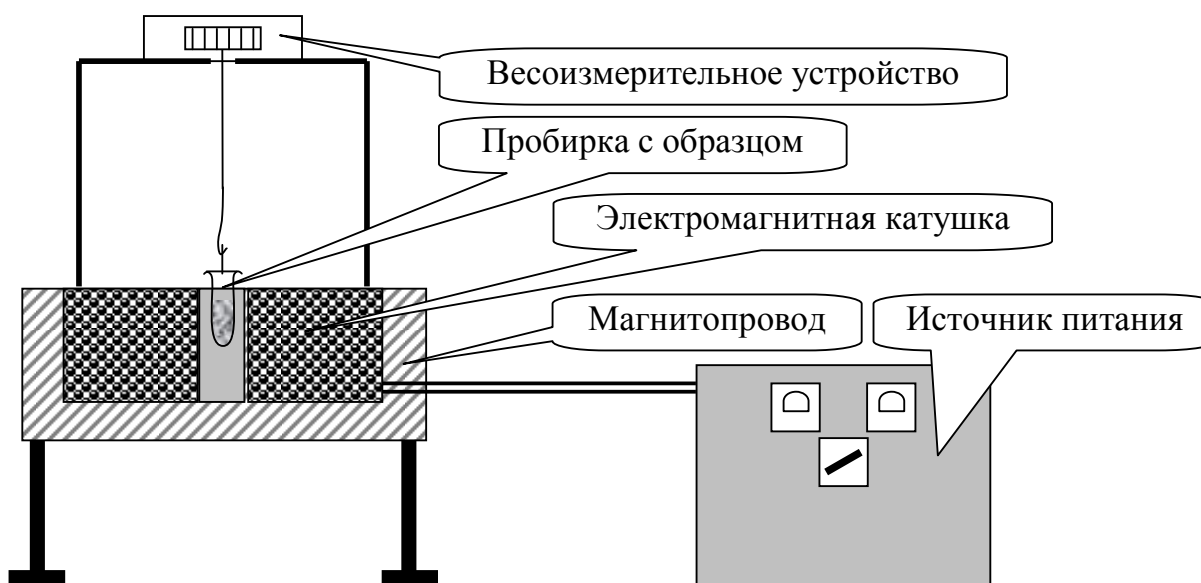


Рис. 2. Стенд для измерения магнитных свойств ферросплавов

### *Характеристика представленных проб ферросплавов*

В таблицах 1-2 представлены данные по химическому составу проб ферросиликомарганца.

## Магнітна і електрична сепарація

Таблиця 1

| № плавки | Химический состав ферросиликомарганца, % масс. |      |      |     |      |      | Σ     |
|----------|--|------|------|-----|------|------|-------|
|          | Mn   | Si   | P    | C   | Fe   | S    |       |
| 16       | 73,4   | 18   | 0,41 | 1,4 | 6,6  | 0,01 | 99,82 |
| 19       | 70,2   | 19,7 | 0,4  | 1,1 | 8,3  | 0,01 | 99,71 |
| 20       | 70,9   | 17,9 | 0,45 | 1,4 | 9,2  | 0,01 | 99,86 |
| 21       | 71   | 17,4 | 0,5  | 1,6 | 9,3  | 0,02 | 99,82 |
| 22       | 70,6   | 15,1 | 0,68 | 1,9 | 11,6 | 0,02 | 99,9  |
| 23       | 70,8   | 17,7 | 0,49 | 1,6 | 9,2  | 0,02 | 99,81 |
| 24       | 71,3   | 17,6 | 0,5  | 1,4 | 9    | 0,01 | 99,81 |
| 25       | 70,6   | 17,7 | 0,54 | 1,6 | 9,8  | 0,02 | 100   |
| 26       | 70,2   | 17,7 | 0,54 | 1,6 | 9,8  | 0,02 | 99,86 |
| 27       | 71,8   | 15,4 | 0,66 | 2   | 10   | 0,02 | 99,88 |
| 28       | 73,2   | 12,6 | 0,82 | 2,5 | 10,8 | 0,01 | 99,93 |
| 29       | 73,3   | 11,3 | 0,85 | 2,8 | 11,6 | 0,01 | 99,86 |
| 30       | 72,2   | 10,6 | 0,86 | 3,2 | 12,8 | 0,01 | 99,67 |
| 31       | 72,6   | 10,2 | 0,86 | 3   | 13,2 | 0,01 | 99,87 |

*Методика проведення измерений магнитной восприимчивости представленных проб ферросплавов*

Стенд (рис. 2) для измерения магнитной восприимчивости состоит из магнитопровода с катушкой, весоизмерительного устройства, подвеса с пробиркой для исследуемых образцов, регулируемого источника питания.

Весоизмерительное устройство перед началом измерений включается в сеть и производится его прогрев в течении 15 мин.

Исследуемый образец пробы загружается в пробирку на высоту примерно 10 см ( $L_{\text{образца}}$ ) от дна пробирки (рис. 1), закрепляется на подвесе и вводится симметрично оси катушки на расстоянии 5см ниже верхнего среза катушки. Производится взвешивание пробирки с образцом.

Затем включается источник питания и на катушку подается напряжение при фиксированных значениях тока (5, 10 и 20 А). Измеренные значения веса пробирки с образцами при этих токах заносятся в журнал измерений. Далее производятся вычисления магнитной силы  $F_m$  как разности показаний весоизмерительного устройства при наличии магнитного поля ( $P_n$ ) и при его отсутствии ( $P_o$ ):

$$F_m = P_n - P_o.$$

В соответствии с формулой (8) определяем значения объемной магнитной восприимчивости исследуемых проб и заносим их в табл. 2-3.

Таблиця 2

Результаты определения магнитной восприимчивости проб ферросиликомарганца (крупность -1,5 мм),  $\times 10^{-3}$

| № пробы /<br>I, А | 16   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5                 | – *  | 5,94 | 5,94 | 11,9 | 5,94 | 5,94 | 5,94 | – *  | 8,3  | 8,3  | 2,4  | 8,3  | 5,94 | 24   |
| 10                | 5,33 | 5,92 | 5,92 | 7,4  | 5,92 | 5,92 | 8,88 | 4,44 | 5,92 | 7,99 | 2,07 | 6,51 | 8,88 | 13,3 |
| 20                | 2,73 | 2,93 | 2,93 | 3,7  | 2,93 | 3,51 | 3,51 | 2,73 | 3,51 | 3,78 | 2,23 | 3,2  | 2,93 | 5,46 |

Результаты определения магнитной восприимчивости проб ферросиликомарганца (крупность 1,5-5 мм),  $\times 10^{-3}$

| № пробы / I, А | 16   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5              | - *  | -    | -    | 5,94 | 5,94 | -    | 14,2 | 5,94 | -    | -    | -    | -    | 8,3  | 11,9 |
| 10             | 5,92 | 2,96 | 2,96 | 2,96 | 5,92 | 2,96 | 6,51 | 4,44 | 5,92 | 1,48 | 1,48 | 4,44 | 6,51 | 8,88 |
| 20             | 2,73 | 2,34 | 2,15 | 2,15 | 2,54 | 2,54 | 2,42 | 2,34 | 2,93 | 2,15 | 1,95 | 2,54 | 3,0  | 3,9  |

\* – В процессе измерений на данном режиме недостаточная чувствительность весоизмерительного устройства

По результатам, представленным в табл. 2-3 построены графики зависимости магнитной восприимчивости проб от напряженности магнитного поля, которые приведены на рис. 3-4.

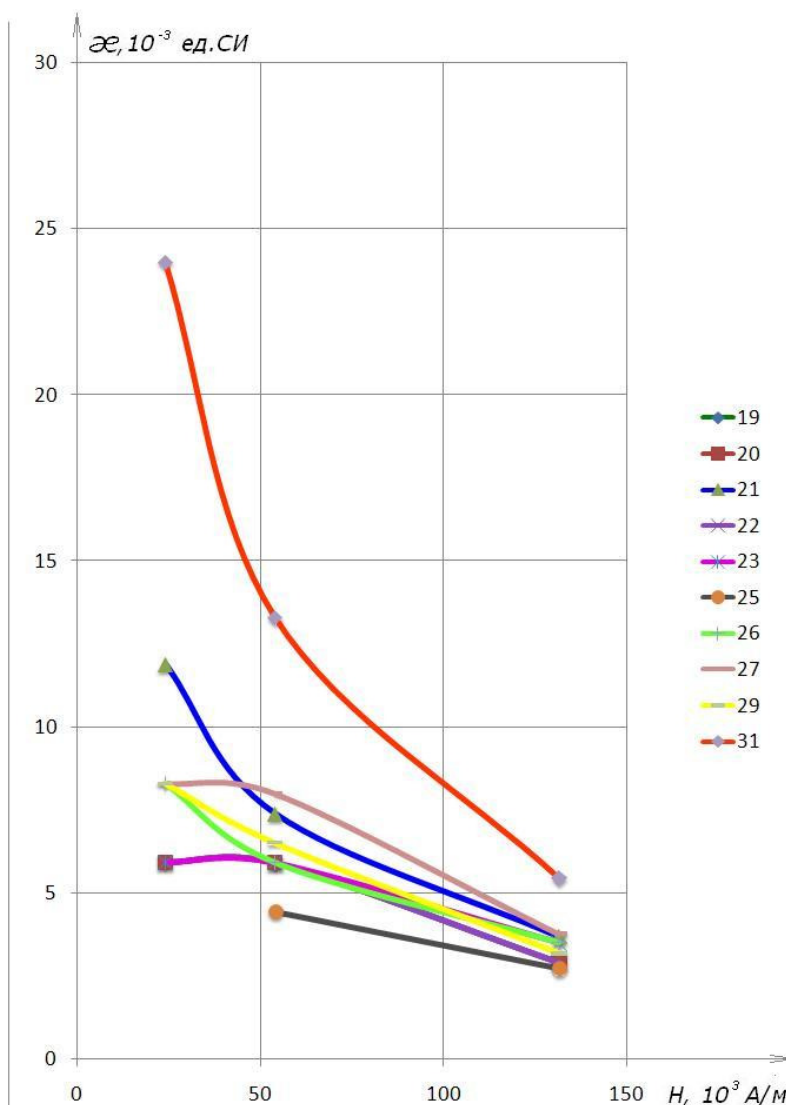


Рис. 3. Зависимость магнитной восприимчивости проб ферросиликомарганца (крупность -1,5 мм) от напряженности магнитного поля

## Магнітна і електрична сепарація

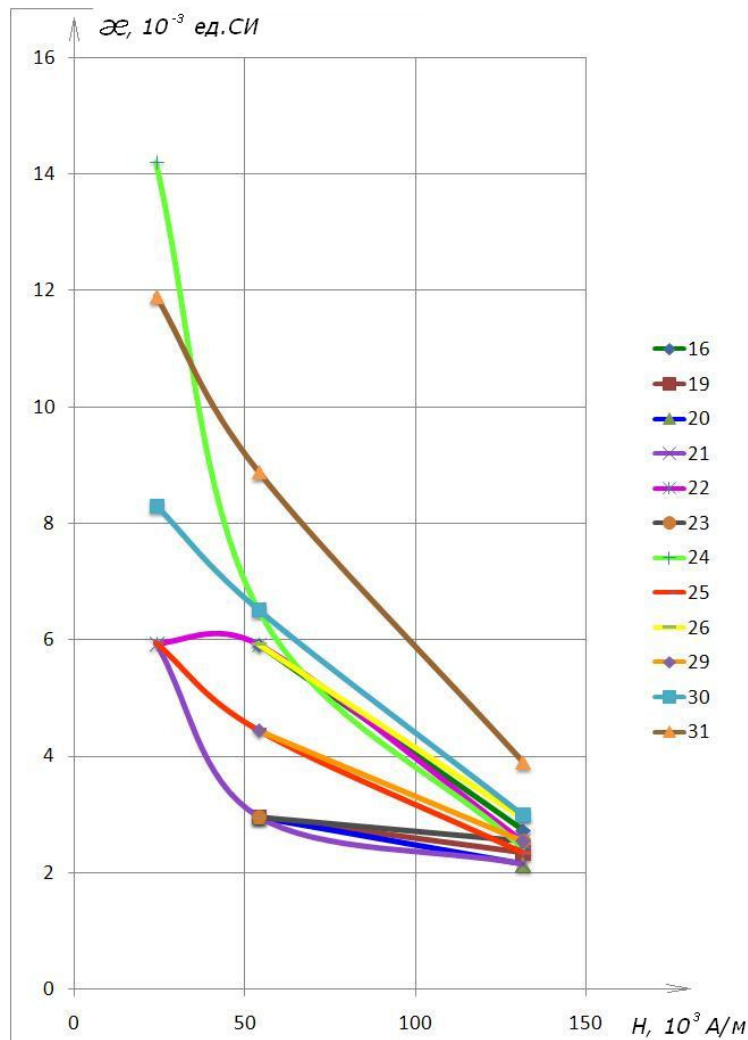


Рис. 4. Залежність магнітної восприимчивості проб ферросилікомарганця (крупність 1,5-5 мм) від напруженності магнітного поля

### Заключення

1. Виполнені теоретическіе дослідження і обоснован метод експериментального визначення магнітної восприимчивості применительно к ферросилікомарганцу марок МнС20 – МнС10 і середнеуглеродистого ферромарганца.

2. По результатам теоретических исследований разработана методика і створена апаратура для вимірювання магнітної восприимчивості зернистих марганцевих ферросплавів.

3. Установлено, що досліджаніе образці марганцевих ферросплавів относятся к классу слабомагнитных материалов.

4. Магнітна восприимчивість образців ферросилікомарганца (фракція -1,5 мм) змінюється від 2,23 до  $24,1 \cdot 10^{-3}$  (одиниць СИ) при напруженності магнітного поля від 23 до  $135 \cdot 10^3$  А/м.

5. Магнітна восприимчивість образців ферросилікомарганца (фракція 1,5-5 мм) змінюється від 2,15 до  $14,2 \cdot 10^{-3}$  (одиниць СИ) при напруженності магнітного поля від 23 до  $135 \cdot 10^3$  А/м.



## **Магнітна і електрична сепарація**

6. Анализ результатов измерений показывает, что мелкие пробы ферросиликомарганца (фракция крупности -1,5 мм) обладают более высокой магнитной восприимчивостью по сравнению с аналогичными пробами более крупного материала (фракции крупности 1,5-5 мм).

7. Результаты изучения магнитных свойства ферросплавов показывают, что их можно извлекать с помощью магнитных сепараторов с сильным полем и разделять по свойствам (составу).

8. Установленное в результате исследований снижение удельной магнитной восприимчивости при повышении напряженности магнитного поля свидетельствует о наличии ферромагнитной фазы. Исходя из этого при выборе магнитных сепараторов для извлечения металла следует выбирать сепараторы с возможно более узким диапазоном уровня магнитной индукции.

9. В результате проведенных испытаний по магнитной сепарации представленных проб установлена принципиальная возможность разделения мелких фракций на фракции с различным содержанием железа и марганца.

10. Впервые полученные зависимости магнитной восприимчивости марганцевых ферросплавов при широком интервале изменения содержания кремния могут рассматриваться как предпосылки для разработки способа доизвлечения сплавов из мелких фракций после сортировки отвальных шлаков на модуле кусковой сортировки.

### **Список литературы**

1. Гасик М.И. Марганец – М.: Металлургия, 1992. – 606 с.
2. Рудовосстановительные электропечи и технологии производства марганцевых ферросплавов / В.С. Куцин, Б.Ф. Величко, М.И. Гасик и др. – Д.: НМАУ, 2011. – 508 с.
3. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Физикохимия и технология электроферросплавов – Д.: Системные технологии, 2008. – 448 с.
4. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные и электромагнитные методы обогащения: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1988. – 304 с.
5. Кармазин В.И. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. – Д.: НГАУ, 2001. – 102 с.
6. Анализ влияния магнитного насыщения матрицы ВГМС и снижения магнитной восприимчивости извлекаемых частиц за счет роста напряженности магнитного поля на эффективность процесса магнитной сепарации / В.И. Кармазин, Ю.С. Мостыка, В.Ю. Шутов и др. // Горн. инф.-анал. бюл. – 2000. – №11. – С. 221-223.
7. Устройство идентификации полезного компонента в металлосодержащем сырье естественного и техногенного происхождения: пат. № 88220 Украина / А.М. Кулиш, С.В. Титенко, О.М. Смоленцев и др.; заявл. 08.01.2008, Бюл. №18. – 3 с.
8. Устройство для сепарации техногенного сырья, представленного металлосодержащими отходами или некондиционными рудами: пат. № 88221 Украина / А.М. Кулиш, С.В. Титенко, О.М. Смоленцев и др.; заявл. 08.01.2008, Бюл. № 18. – 3 с.

© Пилов П.И., Мостыка Ю.С., Гребенюк Л.З., Шутов В.Ю., Зубарев А.И.,  
Куцин В.С., Гасик М.И., Поляков О.И., Цветков И.В., 2012

*Надійшла до редколегії 15.02.2012 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*