

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ПОТЕРЬ МЕТАЛЛА С ОТВАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ ПРИ ВЫПЛАВКЕ УГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА

Г.И. Невьянцев, Г.Г. Михайлов, И.Ю. Пашкеев, Ю.И. Пашкеев

## DEFINITION OF QUANTITY OF LOSSES OF METAL WITH SLAGS AT MELTING HIGH CARBON FERROCHROMIUM

G.I. Nevyantsev, G.G. Mikhailov, I.Yu. Pashkeev, Yu.I. Pashkeev

Проведена магнитная сепарация отвальных шлаков производства углеродистого феррохрома. Приведены данные по составу магнитного продукта, а также по химическому составу металла и шлака, полученных после переплава магнитного продукта, содержащего хром. Установлена связь между степенью измельчения шлаков и выходом извлекаемого металла. Методом комбинирования решен вопрос о массе пробы, магнитная сепарация которой дает достоверную информацию о количестве содержащегося в шлаке металла. Построенные зависимости позволяют определить массу пробы и количество параллельных опытов для определения выхода целевого магнитного продукта с требуемой точностью.

*Ключевые слова:* высокоглиноземистый феррохром, шлак, потери, магнитный продукт, погрешность.

Magnetic separation slags of high carbon ferrochromium manufacture is carried out. The data on structure of a magnetic product, and also on a chemical composition of metal and slag received after melting the magnetic product containing chromium are cited. Connection between degree of crushing of slags and an exit of taken metal is established. The combination method permitted to solve the question on the weight of the test which will give trustworthy information about quantity of metal content in the slag by magnetic separation. The constructed dependences permit to define the weight of the test and quantity of parallel experiments for definition of the exit of a target magnetic product with demanded accuracy.

*Keywords:* high carbon ferrochromium, slag, losses, magnetic product, definition error.

Одним из основных видов потерь в металлургическом производстве являются потери металла с отвальным шлаком, которые особенно ощущимы в производстве ферросплавов. В работах Никулиной Л.Б., Дерябина А.А. с соавторами [1, 2] были определены потери металла с отвальным шлаками при производстве высокоглиноземистого феррохрома в условиях Актюбинского завода ферросплавов (АЗФ) и приведена доля потерь 0,5-4 % от массы металла. Разброс значений потерь металла был объяснен авторами различием в технологических параметрах плавки и прежде всего в температуре выпуска, а следовательно, в вязкости выпускаемого шлака и в величине межфазного взаимодействия. В более поздней работе [2] на шлаках АЗФ были определены потери металла, которые составили в среднем 3,3 % от выхода сплава за выпуск, в то время как на отдельных плавках они достигали 7,7 %. Авторами настоящей статьи также был проведен анализ потерь металла в процессе магнитной сепарации отвальных шлаков произ-

водства углеродистого феррохрома ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» (ОАО ЧЭМК) и Серовского завода ферросплавов (СЗФ). Установлено, что существует связь между степенью измельчения шлаков и выходом извлекаемого металла, так дробление шлаков до фракции менее 3,0 мм практически не дает приращения выхода магнитного продукта, поэтому обогащению методом магнитной сепарации подвергали шлаки, измельченные до фракции -2,8 мм. При проведении магнитной сепарации было установлено наличие немагнитного металлического продукта, рентгенофазовый анализ которого показал, что основными составляющими его фазами являются карбиды  $(\text{Cr}, \text{Fe})_3\text{C}$  и углерод С. Установлено, что содержание в отвальных шлаках немагнитного металлического продукта достигает 0,5 % от массы шлака, а содержание магнитного продукта в среднем составляет около 3,5 % от массы шлака. Содержание хрома и железа в магнитном продукте представлено в табл. 1.

\* Работа проведена по научной программе Федерального агентства по образованию «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)», код проекта- 375.

После магнитной сепарации был проведен переплав полученного магнитного продукта с последующим определением количества и химического состава разделившихся фаз. Переплав производился в корундовом тигле, помещенном в графитовый контейнер в высокотемпературной печи сопротивления.

Химический состав металла и шлака, полученного при переплаве магнитного продукта, представлен в табл. 2.

Масса металла, полученного при переплаве 100 г магнитного продукта, составила 36,8 г (из которых 24,4 г - в виде слитка и 12,4 г - в виде взвеси в шлаке). Таким образом, в магнитном продукте содержится около 37 % металлической фазы.

Одним из основных вопросов при определении потерь является масса пробы шлака, магнитная сепарация которой должна дать достоверную информацию о количестве содержащегося в шлаке металла. При проведении магнитной сепарации отвальных шлаков нами была установлена связь между массой пробы, количеством параллельных опытов и относительной погрешностью измерений. В качестве проб были взяты куски отвального шлака без выхода металла на поверхность по внешним признакам (непрометалленный шлак).

Магнитной сепарации подвергали отвальные шлаки, предварительно измельченные до фракции 2,8 мм.

Задачу решали методом комбинирования случайным образом результатов магнитной сепарации девятнадцати порций (проб) отвального шлака по 1000 г каждая. Такой подход позволил оценить необходимое количество натурных испытаний для определения выхода магнитной фракции с требуемой погрешностью.

На рис. 1 приведены результаты магнитной сепарации девятнадцати проб отвального шлака по 1000 г каждая. Все значения удовлетворяют закону нормального распределения (по среднему абсолютному отклонению, по асимметрии, по эксцессу). На первом этапе комбинирования устанавливали значения выхода магнитной фракции для проб различной массы ( $m=1000; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000$  г). Для этого из исходного массива девятнадцати значений выхода магнитной фракции, полученных в натурных испытаниях для девятнадцати проб массой 1000 г каждая, случайным образом выбирали, например, пять значений, и определяли их среднее арифметическое значение, которое затем обозначали как выход магнитной фракции из  $j$ -й порции, массой 5000 г:

Таблица 1

Содержание хрома и железа в магнитном продукте, мас. %

Предприятие	$\text{Cr}_{\text{общ}}$ , мас. %	$\text{Fe}_{\text{общ}}$ , мас. %	$\text{Cr}_{\text{общ}}/\text{Fe}_{\text{общ}}$
ОАО «ЧЭМК»	20,91	8,18	2,56
СЗФ	14,65	8,03	1,82

Таблица 2

Химический состав металла и шлака

Предприятие	Состав металла, мас. %			Состав шлака, мас. %					
	Cr	Fe	P	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{FeO}_{\text{общ}}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$
ОАО «ЧЭМК»	56,7	31,82	0,043	8,17	33,16	1,50	15,83	1,47	39,00
СЗФ	54,12	33,33	0,044	11,68	28,66	4,10	22,35	3,78	28,60

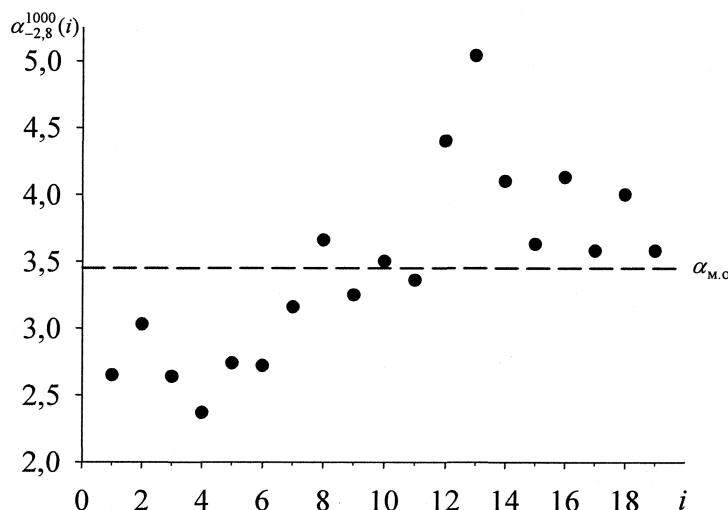


Рис. 1. Выход магнитной фракции:  $\alpha_{-2,8}^{1000}(i)$  – значение выхода магнитной фракции для  $i$ -й пробы массой 1000 г, мас. %;  $\alpha_{\text{м.о.}}$  – значение математического ожидания

$$\alpha_{-2,8}^m(j) = \sum_{i=1}^5 \alpha_{-2,8}^{1000}(i) / 5, \quad (1)$$

где  $\alpha_{-2,8}^{1000}(i)$  – выход магнитной фракции из пробы массой 1000 г в  $i$ -м опыте;  $\alpha_{-2,8}^{5000}(j)$  – скомбинированный выход магнитной фракции из пробы массой 5000 г в  $j$ -м опыте.

Например, для опытов 2, 6, 9, 11, 15 получим

$$\alpha_{-2,8}^{5000}(1) = (30,3 + 27,2 + 32,5 + 33,63 + 36,3) / 5 = 31,99 \text{ г.}$$

Для каждой выбранной массы  $m$  пробы было скомбинировано  $m/1000$  результатов натурных экспериментов с пробами по 1000 г и получены значения выхода магнитной фракции  $\alpha_{-2,8}^m(j)$ , где  $j=1 \dots 19$ .

На втором этапе комбинирования ставилась задача определения среднего значения выхода магнитной фракции при различном числе  $n$  параллельных опытов с пробами одинаковой массы  $m$ . Например, необходимо определить среднее значение  $\alpha_{-2,8}^{5000}$  в трех ( $n=3$ ) параллельных опытах. Для этого из массива двадцати скомбинированных значений  $\alpha_{-2,8}^{5000}(j)$  случайным образом составляли

сочетание по три значения  $\alpha_{-2,8}^{5000}(j)$  и определяли его среднее арифметическое  $\alpha_{-2,8}^{5000(3)}(k)$ , где  $k$  – порядковый номер серии из трех параллельных опытов:

$$\alpha_{-2,8}^{5000(3)}(1) = (\alpha_{-2,8}^{5000}(1) + \alpha_{-2,8}^{5000}(2) + \alpha_{-2,8}^{5000}(5)) / 3 = (3,55 + 3,45 + 3,9) / 3 = 3,63 \text{ мас. \%}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{-2,8}^{m(n)}(k)$  – среднее значение выхода магнитной фракции в  $k$ -й серии, состоящей из трех ( $n=3$ ) параллельных опытов (магнитных сепараций) проб по 5000 г ( $m=5000$  г) каждая.

Для каждого из значений массы пробы  $m$  было скомбинировано девятнадцать серий испытаний по три параллельных опыта ( $k=19$  для  $n=3$ ), пять серий для десяти параллельных опытов ( $k=5$  для  $n=10$ ) и одна серия для девятнадцати параллельных опытов ( $k=1$  для  $n=19$ ), т.к. существует единственный вариант сочетания по девятнадцать из девятнадцати исходных значений.

На рис. 2 приведены расчетные результаты скомбинированных значений выхода магнитной фракции.

Для каждого из значений  $\alpha_{-2,8}^{m(n)}(k)$ , являющегося усредненным значением выхода магнитной

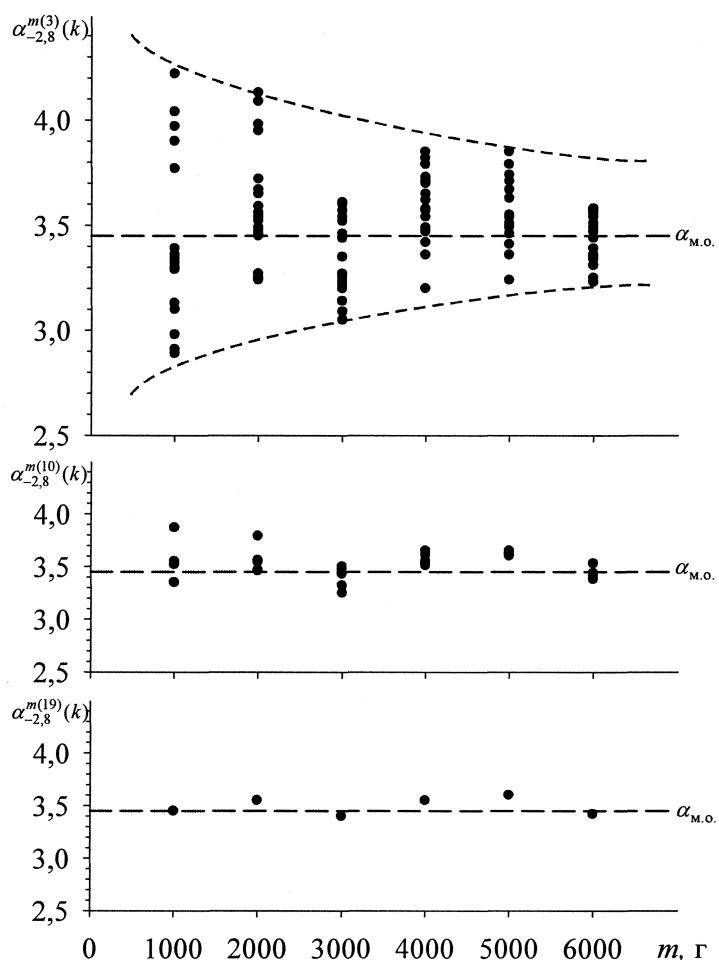


Рис. 2. Значения выхода магнитной фракции в зависимости от массы пробы  $m$  и от числа параллельных опытов  $n$

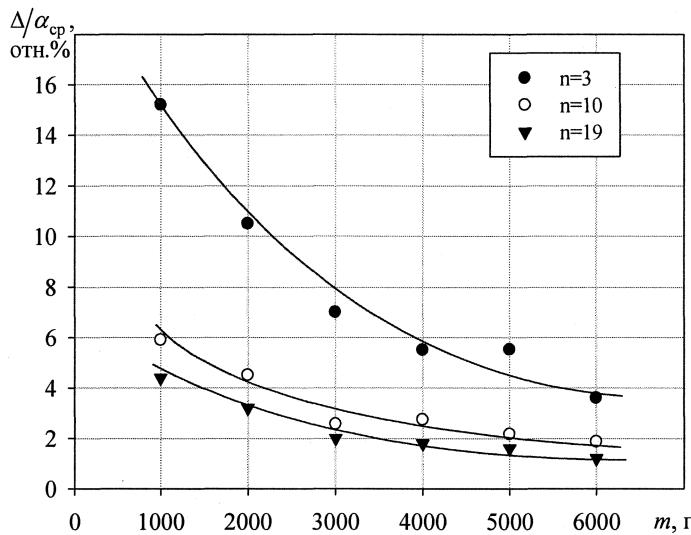


Рис. 3. Относительная погрешность измерения  $\Delta/\alpha_{\text{cp}}$  выхода магнитной фракции в зависимости от массы пробы  $m$  и от количества параллельных опытов  $n$

фракции в  $k$ -й серии из  $n$  параллельных опытов, были вычислены относительные погрешности измерения величины  $\alpha_{-2,8}$  в каждой  $k$ -й серии из  $n$  параллельных опытов:

$$\delta_{-2,8}^{m(n)}(k) = \Delta/\alpha_{\text{cp}} = t_{\alpha,n} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}/\alpha_{\text{cp}}, \quad (3)$$

где  $\Delta$  абсолютная погрешность измерения величины  $\alpha_{-2,8}$ .

Среднее значение выхода магнитной фракции  $\alpha_{\text{cp}}$  в  $k$ -й серии

$$\alpha_{\text{cp}} = \alpha_{-2,8}^{m(n)}(k), \quad (4)$$

а среднеквадратичное отклонение  $S$  рассчитывается следующим образом:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_n (\alpha_{-2,8}^m(j) - \alpha_{-2,8}^{m(n)}(k))^2}{n-1}}. \quad (5)$$

Например, относительную погрешность определения выхода магнитной фракции из пробы массой 5000 г в трех параллельных опытах рассчитывали по формулам:

$$\delta_{-2,8}^{5000(3)}(1) = t_{0,95,3} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}}/\alpha_{-2,8}^{5000(3)}(1); \quad (6)$$

$$S = \left[ \left( (\alpha_{-2,8}^{5000}(1) - \alpha_{-2,8}^{5000(3)}(1))^2 + (\alpha_{-2,8}^{5000}(2) - \alpha_{-2,8}^{5000(3)}(1))^2 + (\alpha_{-2,8}^{5000}(5) - \alpha_{-2,8}^{5000(3)}(1))^2 \right) / (3-1) \right]^{1/2}. \quad (7)$$

На рис. 3 приведены средние значения  $\Delta/\alpha_{\text{cp}}$  относительных погрешностей измерения  $\delta_{-2,8}^{m(n)}(k)$  выхода магнитной фракции в зависимости от массы пробы  $m$  и от количества  $n$  параллельных опытов с каждой пробой массой  $m$ . Каждая точка на

графике является усредненным значением из  $k$  значений погрешности. Например, значение  $\Delta/\alpha_{\text{cp}}$  для  $m=5000$  и  $n=3$  получено путем статистической обработки девятнадцати значений  $\delta_{-2,8}^{5000(3)}$ , которые, в свою очередь, являются результатом пятидесяти семи измерений (девятнадцать опытов, повторенных трижды). Значение  $\Delta/\alpha_{\text{cp}}$  для  $m=5000$  и  $n=10$  получено путем статистической обработки пяти значений  $\delta_{-2,8}^{5000(10)}$ , являющихся результатом пятидесяти измерений (пять опытов, повторенных десять раз). При  $m \rightarrow \infty$  и  $n \rightarrow \infty$  относительная погрешность асимптотически приближается к нулю, что соответствует приближению значения измеряемой величины к математическому ожиданию.

Таким образом, в данной работе предложена методика статистической обработки данных выхода магнитной фракции и построены зависимости, позволяющие определить необходимое количество параллельных опытов  $n$  и массу пробы шлака  $m$ , обеспечивающих требуемую точность определения выхода магнитной фракции (рис. 3).

### Литература

1. Определение потерь хрома со шлаком от выплавки углеродистого феррохрома / Л. Б. Никулина, А. А. Дерябин, В. М. Журавлев и др. // Шлаки черной металлургии, их переработка и применение: труды УралНИИЧМ. - Свердловск, 1971. - Т. 12. - С 98-103.

2. Определение потерь углеродистого феррохрома со шлаками / Л. Б. Никулина, А. А. Дерябин, П. В. Аганичев, В. М. Журавлев // Шлаки черной металлургии, их переработка и применение: Труды УралНИИЧМ. - Свердловск, 1973. - Т. 17. - С 112-115.

Поступила в редакцию 29 января 2010 г.

Вестник ЮУрГУ, № 13, 2010