

*А.В. Сандуляк, А.А. Сандуляк, В.В. Самохин, Д.В. Ершов*

Московский государственный технический университет МАМИ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИОПЕРАЦИОННОГО (ПРЕЦИЗИОННОГО) МАГНИТОКОНТРОЛЯ ФЕРРОФРАКЦИИ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ**

Одним из показателей качества и технологичности оборотных формовочных смесей литейного производства и их компонентов является массовая доля железосодержащих включений (обладающих ферромагнитными свойствами брызг металла, фрагментов облоя, литниковых систем, продуктов износа оборудования и пр.). Для ее определения используются регламентированные ГОСТами 23409.2 – 78, 29234.7 – 91, 3594.14 – 93 методы, основанные на фотометрии с предшествующей реагентной обработкой пробы смеси, а для извлечения – магнитные сепараторы [1]. При этом представленные выше методы контроля ориентированы на получение результата в пересчете только на оксид железа (что не дает информации о магнитоактивной фракции) и, к тому же, пригодны лишь до определенного значения массовой доли таких включений.

В работах [2, 3] рассмотрен метод магнитоконтроля ферровключений формовочной смеси. Он, хотя и предусматривает использование такого известного подхода, как многократный магнитофорез (со все более полной выборкой ферровключений из анализируемой пробы и соответственно уменьшающейся их остаточной массой), но имеет принципиальную особенность.

Так, базируясь на нахождении зависимости операционных масс  $m$  извлекаемых ферровключений [2 – 5] от порядкового номера  $n$  операции (цикла), этот метод обязывает находить функциональный вид получаемой ограниченной экспериментальной зависимости (для возможности ее последующей неограниченной экстраполяции и, как следствие, выполнения соответствующих расчетов истинной массы, включая объективно остаточную, и массовой доли ферровключений [2 – 5]).

Пооперационное убывание массы  $m$  осадка феррочастиц, извлекаемых из подвергаемой анализу пробы той или иной среды, наиболее часто подчиняется экспоненциальному закону [4, 5]:  $m = a \exp(-kn)$ , где  $a$  и  $k$  – эмпирические параметры. Нетрудно заметить, что эта дискретная зависимость представляет собой количественный ряд в виде убывающей геометрической прогрессии с первым членом  $m_1 = a \exp(-k)$  и знаменателем  $q = \exp(-k)$ . Тогда становится возможным определение общей (и фактически извлеченной, и остаточной) массы ферровключений в пробе анализируемой сре-

ды – как суммы величины  $m_{1, \dots, \infty}$  бесконечного числа членов ( $n \rightarrow \infty$ ) этой прогрессии [4, 5]:

$$m_{1, \dots, \infty} = \sum_{n=1}^{\infty} m_n = \frac{m_1}{1 - q} = \frac{a}{\exp k - 1}. \quad (1)$$

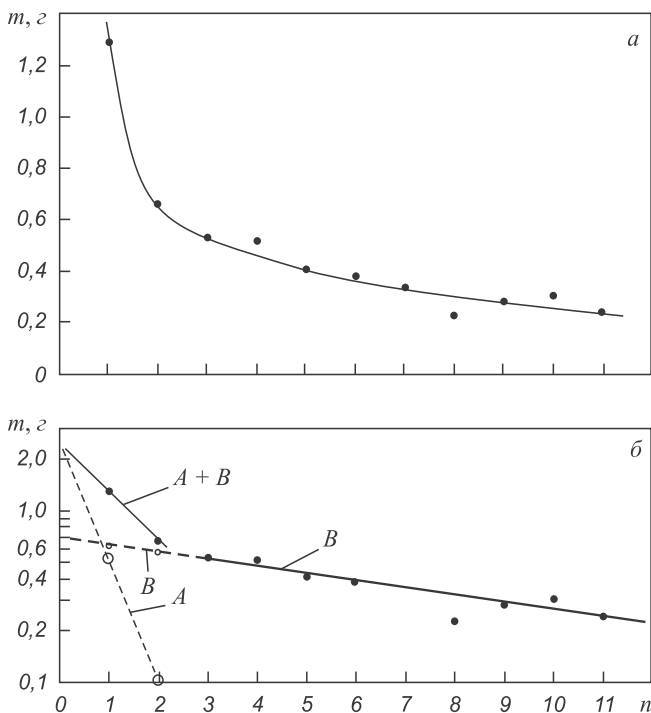
Для ограниченного числа  $n$  операций магнитофореза соответствующая масса  $m_{1, \dots, n}$  ферровключений находится как сумма ограниченного числа членов этой геометрической прогрессии [4, 5]:

$$m_{1, \dots, n} = \sum_{n=1}^n m_n = \frac{m_1 - m_n q}{1 - q} = \frac{a [1 - \exp(-kn)]}{\exp k - 1}. \quad (2)$$

Зависимость масс  $m_n$  экспериментально извлекаемых ферровключений от числа  $n$  операций магнитофореза легко тестируется на соответствие или несоответствие экспоненте – в удобных для этого полулогарифмических координатах (по признаку линеаризации или нелинеаризации в этих координатах).

Что касается именно формовочной смеси, то, в отличие от других сред [4, 5], ее массово-операционная характеристика (см. позицию  $a$  рисунка), будучи представленной в полулогарифмических координатах (см. позицию  $b$  рисунка), не линеаризуется во всем принятом диапазоне  $n$ , но вместе с тем поддается кусочной линеаризации [2, 3]. А это указывает на целесообразность применения двухэкспоненциальной модели [2], одновременно свидетельствуя о наличии в формовочной смеси ферровключений сравнительно широкого спектра крупности и магнитной восприимчивости, т.е. о наличии по меньшей мере двух подфракций ферровключений [2, 6]. Первая ( $A$ ) из них состоит из «легко извлекаемых» частиц: сравнительно крупных, обладающих улучшенными магнитными свойствами. Вторая ( $B$ ) состоит из «трудно извлекаемых» частиц: высокодисперсных, обладающих ухудшенными магнитными свойствами.

Это значит, что в рассматриваемом случае необходимые расчетные зависимости могут быть получены на основании соответствующей физической модели, в основе которой принципы «автономного» магнитофоретического поведения каждой из подфракций и суперпозиции основных характеристик этих подфракций [2]. И если для каждой из подфракций ( $A$  или  $B$ )



Пооперационные значения масс осадка ферропримесей, полученных магнитофорезом из пробы формовочной смеси массой 40 г (а), и эти же значения в полулогарифмических координатах (б), выявляющих кусочно-линейный характер зависимости  $m$  от  $n$  и дающих возможность применения двухэкспоненциальной модели (для подфракций  $A$  и  $B$ )

справедливы индивидуальные характеристики экспоненциального убывания пооперационных масс ферровключений [2], т.е.  $m_A = a_A \exp(-k_A n)$  и  $m_B = a_B \exp(-k_B n)$ , причем  $m_A + m_B = m_n$ , то подобно уравнению (1) выражения для общих масс ферровключений (каждой из подфракций) [2] имеют следующий вид:

$$(m_{1, \dots, \infty})_A = \frac{a_A}{\exp k_A - 1}; \quad (3)$$

$$(m_{1, \dots, \infty})_B = \frac{a_B}{\exp k_B - 1}, \quad (3a)$$

а общая масса извлекаемых ферровключений

$$m_{1, \dots, \infty} = (m_{1, \dots, \infty})_A + (m_{1, \dots, \infty})_B;$$

здесь  $a_A, a_B, k_A, k_B$  – эмпирические параметры для  $A$ - и  $B$ -подфракции.

В работе [2] показано, что получаемую пооперационную зависимость  $m$  от  $n$  (см. позицию б рисунка) можно графически разложить на составляющие (по  $A$  и  $B$ ) зависимости (разумеется, с получением индивидуальных значений параметров  $a_A$  и  $a_B, k_A$  и  $k_B$ ). При этом хвостовой участок исследуемой зависимости ( $n \geq [n]$ ) после «точки излома»  $n = [n]$  практически характеризует только фракцию  $B$ , т.е. при почти полном отсутствии фракции  $A$  (извлеченной до  $n = [n]$ ). Принцип же разложения начального участка ( $1 \leq n \leq [n]$ ) зависимости  $m$  от

$n$  на составляющие (см. позицию б рисунка, штриховые линии  $A$  и  $B$ ) следующий. Составляющая  $B$  здесь идентифицируется экстраполяцией полученного фактического участка  $B$  (сплошная линия) зависимости  $m$  от  $n$  в область малых значений  $n$ . Для идентификации составляющей  $A$  осуществляется простое вычитание соответствующих ординат фактического участка ( $A + B$ ) зависимости  $m$  от  $n$  и экстраполированного участка  $B$ . При этом формальная экстраполяция идентифицированных (для подфракций  $A$  и  $B$ ) зависимостей до  $n \rightarrow 0$  непосредственно дает значения  $a_A$  и  $a_B$ , а значения  $k_A$  и  $k_B$  находятся обратным пересчетом.

Фактические значения параметров магнитоконтроля подфракций  $A$  и  $B$  ферровключений в изучаемой пробе формовочной смеси (см. рисунок) оказались следующими:  $a_A = 2,6$  г и  $a_B = 0,7$  г;  $k_A = 1,63$  и  $k_B = 0,094$ ;  $(m_{1, \dots, \infty})_A = 0,63$  г и  $(m_{1, \dots, \infty})_B = 7,1$  г. При значении же общей массы ферровключений  $m_{1, \dots, \infty} = (m_{1, \dots, \infty})_A + (m_{1, \dots, \infty})_B = 0,63 + 7,1 = 7,73$  г значения долей этих подфракций, которые определяли как  $\lambda_A = (m_{1, \dots, \infty})_A / m_{1, \dots, \infty} (\times 100 \%)$  и  $\lambda_B = (1 - \lambda_A)$ , составили 8,2 и 91,8 % соответственно.

Следует далее отметить, что наряду с таким моделированием полиоперационного магнитоконтроля «разносортной» феррофракции формовочной смеси, основанному на квазифракционировании ферровключений, может быть реализовано и полуформальное [2], наполовину феноменологическое моделирование. Поводом для этого является сам характер (кусочно-линейный) фактически получаемой зависимости  $m$  от  $n$  в полулогарифмических координатах (см. позицию б рисунка).

Так, масса осадка  $m_{1, \dots, [n]}$  (совместно подфракций  $A$  и  $B$  при параметрах  $a_{AB} = a_A$  и  $k_{AB}$  для смеси) до «излома» зависимости  $m$  от  $n$  (см. позицию б рисунка) формально может быть найдена по адаптированному к этому участку уравнению (2) [2]:

$$m_{1, \dots, [n]} = \frac{a_{AB} [1 - \exp(-k_{AB}[n])]}{\exp k_{AB} - 1}. \quad (4)$$

Не вызывает затруднений и нахождение массы осадка ( $m_{([n]+1), \dots, \infty}$ ) для хвостовой части рассматриваемой зависимости после ее «излома» (где, как уже отмечено, почти полностью превалирует подфракция  $B$ ). Для этого следует использовать уже применяемую формулу (3a), которая учитывает и экстраполяционную область остатка ферропримесей (вплоть до  $n \rightarrow \infty$ ), а также адаптированное к этому участку выражение (2) [2]. Далее из очевидной разницы используемых формул

$$\frac{a_B}{\exp k_B - 1} - \frac{a_B(1 - \exp(-k_B[n]))}{\exp k_B - 1} = m_{([n]+1), \dots, \infty}$$

следует, что

$$m_{([n]+1), \dots, \infty} = \frac{a_B \exp(-k_B[n])}{\exp k_B - 1}. \quad (5)$$

Общая же масса осадка равна сумме данных по уравнениям (4) и (5), т.е.  $m_{1, \dots, \infty} = m_{1, \dots, [n]} + m_{([n]+1), \dots, \infty}$ . И здесь, в соответствии с рассматриваемой моделью,  $m_{1, \dots, \infty} = m_{1, \dots, [n]} + m_{([n]+1), \dots, \infty} = 1,98 + 5,88 = 7,86$  г (при  $a_{AB} = a_A = 2,6$  г и  $k_{AB} = 0,68$ ). Характерно, что это значение полностью согласуется с предшествующим ( $m_{1, \dots, \infty} = 7,73$  г), полученным согласно предыдущей модели, основанной на квазифракционировании ферровключений. А такое взаимное согласие (отличие в пределах 1 – 2 %) подтверждает приемлемость обеих моделей рассматриваемого прецизионного метода полиоперационного магнитоконтроля «разносортной» феррофракции формовочной смеси.

**Выводы.** На основании экспериментально обнаруженного несоответствия результатов магнитофоретического контроля ферровключений формовочной смеси одноэкспоненциальной модели показана возможность применения двухэкспоненциальной. Кроме подхода, основанного на графоаналитической детализации массово-операционной характеристики (по

подфракциям ферропримесей), излагается также полупроформальный прямой расчет этой суперпозиционной характеристики (кусочно-линейной в полулогарифмических координатах).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голотенков О.Н. Формовочные материалы. – Пенза: изд. Пензенского гос. ун-та, 2004. – 166 с.
2. Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н. и др. // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 2 (10). С. 140 – 146.
3. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Самохин В.В. и др. // Литейщик России. 2011. № 4. С. 37 – 41.
4. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Свистунов Д.И. и др. // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 1 (9). С. 148 – 158.
5. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Ершов В.А. и др. // Измерительная техника. 2010. № 8. С. 57 – 60.
6. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Самохин В.В. и др. // Литейное производство. 2011. № 1. С. 15 – 19.

© 2012 г. А.В. Сандуляк, А.А. Сандуляк,  
В.В. Самохин, Д.В. Ершов  
Поступила 9 августа 2011 г.

УДК 669.28.046

*И.П. Герасименко, Е.В. Протопопов, Р.С. Айзатулов,  
С.А. Филиппенко, И.А. Жибинова*

Сибирский государственный индустриальный университет

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ

Эффективность технологии конвертерной плавки во многом определяется полнотой использования энергетических возможностей самого процесса. Для обеспечения наиболее рациональной схемы работы конвертеров необходимо обеспечение сбалансированности шихты в тепловом отношении, что требует с учетом износа футеровки (и в связи с этим увеличением теплопотерь) производить коррекцию тепловой стороны процесса по ходу кампании конвертера с учетом расчета этих потерь в конкретный период его работы.

Совершенно очевидно, что для оптимизации параметров и расчета шихты на предстоящую плавку необходимо учитывать как приходную, так и расходную части теплового баланса процесса в целом. Одной из определяющих технологию статей расходной части теплового баланса являются тепловые потери, которые существенно влияют на определение задаваемых параметров процесса на завершающем этапе плавки (на повалке). От точности прогноза затрат тепла на каждую плавку по ходу кампании конвертера зависят обоснованность выбора технологии, количество и вид шихтовых и других материалов (например, твердого топлива), энергоемкость процесса.

Как известно [1], тепловые потери конвертеров изменяются в широких (1,5 – 12,0 % суммарного прихода тепла) пределах и зависят от многих факторов, в том числе от садки конвертера; от темпа производства, определяемого продолжительностью плавки, от ритмичности производства и его организации; от степени износа футеровки и методов ее восстановления по ходу кампании; от конструкции и параметров работы продуктовой фурмы и т.д.

При классификации тепловых потерь конвертеров в качестве основных выделяют потери тепла через футеровку и корпус конвертера ( $Q_{\phi}$ ); потери тепла ( $Q_{\text{акт}}$ ) на нагрев активного слоя футеровки толщиной  $\delta_{\text{акт}}$ ; потери тепла через горловину конвертера ( $Q_{\text{изл}}^{\text{горл}}$ ); тепловые потери с охлаждающей фурму водой ( $Q_{\text{H, O}}$ ); потери тепла на нагрев кислорода продувки ( $Q_{\text{O}_2}$ ). Вероятный механизм теплопотерь можно представить схемой (рис. 1).

Целесообразно рассмотреть и последовательно проанализировать выделенные позиции теплопотерь расходной части теплового баланса плавки.

*Потери тепла через футеровку и корпус конвертера.* При установившемся режиме работы конвертера тепловые потери через футеровку и корпус достаточно