

УДК 536:621.742

*Ильченко К.Д.* – д-р техн. наук, проф., НМетАУ

*Маркелова А.В.* – студентка, НМетАУ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Исследовано влияние теплофизических свойств на качество отливок и производительность для захлаживающих, утепляющих, металлокерамических и литейных смесей из отходов промышленности и энергетики.*

### **Введение**

Одной из важных задач промышленного производства является усовершенствование технологии литейного производства, в которой значительное место занимают процессы изготовления форм и стержней. Формовочные смеси готовят из природных материалов: кварцевых и цирконовых песков и глин, а также таких материалов, как магнетит, хромомагнетит, хромит, перлит и др.

Формовочные смеси и правильный выбор их состава оказывают большое влияние на технологию литейного производства, так как именно состав смесей влияет на качество полученных отливок и производительность литейных цехов. Известно, что около половины брака литья возникает из-за некачественных формовочных материалов.

Для получения высококачественных отливок формовочные смеси должны обладать следующими свойствами: определенным гранулометрическим составом, пластичностью, прочностью в сыром и сухом состояниях, податливостью, выбиваемостью отливок после затвердевания, заданной теплоаккумулирующей способностью, влияющей на качество поверхности, структуру и свойства отливок.

### **Состояние вопроса**

Литейное производство – единственное производство заготовок деталей, формообразование которых осуществляется, когда материал заготовки находится в расплавленном состоянии. В этом заключается важнейшее достоинство и перспективность технологии метода, так как для придания детали любой конфигурации из любого расплава

требуются минимальные затраты энергии. Но это же приводит к главному недостатку литых заготовок, так как в результате затвердевания расплава в отливках возникают многие дефекты, ухудшающие их свойства.

Процесс формирования отливки складывается из разнообразных процессов: физических, химических, тепловых и др. Однако основу этого процесса составляют тепловые явления, так как именно изменение теплового состояния металла обуславливает формирование тех или иных свойств слитка. Следовательно, изучение тепловых условий процесса и свойств формовочных смесей является необходимой предпосылкой его рационального ведения и получения желаемых свойств отливки.

Формовочные материалы должны отвечать технологии приготовления формовочной или стержневой смеси, а изготовленные из них формовочные смеси – условиям взаимодействия с жидким металлом при заливке формы и затвердеванию и охлаждению отливки.

### **Постановка задачи**

Важнейшие свойства литейных смесей можно разделить на четыре группы свойств:

- теплофизические (энтальпия, теплоемкость, коэффициент теплопроводности, теплоаккумулирующая способность);
- механические (прочность во влажном и сухом состоянии);
- связанные с газообменом (газопроницаемость);
- технологические (противопригарность, выбиваемость из них отливок).

Для данного исследования представляет интерес первая группа свойств, поскольку от теплофизических характеристик формовочных смесей зависит скорость кристаллизации металла, залитого в форму, и последующего его охлаждения. Значения теплофизических свойств необходимы также для расчета тепловых процессов, происходящих в формах после заполнения их металлом.

Основной теплофизической константой, определяющей интенсивность процесса затвердевания и охлаждения отливки, является теплоаккумулирующая способность литейной формы (коэффициент аккумуляции тепла), которая определяется по формуле

$$b = \sqrt{\lambda c \rho}, \text{ кВт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала формы, кВт/(м·°C);  
 $c$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Время затвердевания отливки обратно пропорционально корню квадратному из коэффициента аккумуляции тепла материалом формы

$$\tau_3 \sim \frac{1}{\sqrt{b}}, \text{ с.}$$

Следовательно, если по технологии производства необходимо, чтобы отливка остывала быстро, то материал формы должен иметь высокий коэффициент аккумуляции тепла. Если же необходимо замедлить остывание отливки, то форма должна обладать низкой теплоаккумулирующей способностью.

В данной работе исследованы теплофизические свойства и их влияние на качество отливок и производительность для захлаживающих, утепляющих (в том числе из отходов промышленности и энергетики) и металлокерамических и литейных смесей.

### **Методика измерений теплофизических свойств**

Исследование теплофизических свойств проводилось на основе метода баланса тепла в образце на установке ОТСМ-1 (определение теплофизических свойств материалов), разработанной для определения энтальпии, теплоемкости и коэффициента теплопроводности различных материалов в диапазоне изменения температуры 100 – 1100 °С [1]. Использование установки ОТСМ-1 предусмотрено для определения свойств твердых и сыпучих материалов с низким коэффициентом теплопроводности. При этом возможно определение, как отдельных свойств, так и их комплекса.

Нестационарный метод баланса тепла в образце позволяет определять теплофизические свойства в функции температуры за один опыт.

Образец помещается в цилиндрическую оболочку с известными или заранее определенными теплофизическими свойствами и нагревается постоянным во времени тепловым потоком. При этом температура различных частей образца монотонно возрастает по линейному закону.

В процессе эксперимента фиксируются значения перепада температур по сечению образца и в оболочке, а также абсолютное значение температуры поверхности образца. Метод является относительным. Установка подлежит тарировке на стандартных материалах, что позволяет исключить влияние переменных внешних условий и накопление систематической погрешности.

## Анализ результатов исследований

### 1. Захлаживающие смеси

Влияние теплопроводных добавок на теплофизические свойства литейных смесей можно проследить, добавляя в формовочные смеси металлическую составляющую, наилучшей формой введения которой является металлическая дробь [2]. Плотность усадки дроби по сравнению со стружкой больше, вследствие чего увеличивается плотность и снижается пористость смесей. Наибольшее влияние на повышение захлаживающих свойств оказывают первые порции дроби в смеси.

Исследованы теплофизические свойства: теплоемкость  $c$ , (кДж/(кг·°C)), коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ , Вт/(м·°C)) и теплоаккумулирующая способность ( $b$ , кВт·с<sup>1/2</sup>/(м<sup>2</sup>·°C)) захлаживающих хромомagneзитовых, магнезитовых и хромитовых литейных смесей с добавками 50 % чугуной дроби диаметром 0,5 и 1,0 мм.

Уравнения зависимости свойств захлаживающих литейных смесей от температуры представлены в табл. 1.

Таблица 1

*Теплофизические свойства захлаживающих литейных смесей*

Литейная смесь		Уравнение
хромо-магнезитовая	без дроби	$c = 0,764 + 0,357 \cdot 10^{-3} t$ $\lambda = 0,720 + 0,319 \cdot 10^{-2} t - 0,224 \cdot 10^{-5} t^2$ $b = 0,590 + 0,330 \cdot 10^{-2} t - 0,200 \cdot 10^{-5} t^2$
	с дробью диаметром 0,5 мм	$c = 0,857 + 0,300 \cdot 10^{-3} t$ $\lambda = 1,364 + 0,970 \cdot 10^{-2} t - 0,711 \cdot 10^{-5} t^2$ $b = 1,116 + 0,830 \cdot 10^{-2} t - 0,600 \cdot 10^{-5} t^2$
магнезитовая	без дроби	$c = 0,670 + 0,143 \cdot 10^{-3} t$ $\lambda = 0,801 + 0,326 \cdot 10^{-3} t - 0,267 \cdot 10^{-6} t^2$ $b = 0,643 + 0,290 \cdot 10^{-2} t - 0,500 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,300 \cdot 10^{-8} t^3$
	с дробью диаметром 0,5 мм	$c = 0,769 - 0,132 \cdot 10^{-3} t$ $\lambda = 2,392 - 0,186 \cdot 10^{-2} t + 0,926 \cdot 10^{-6} t^2$ $b = 2,235 - 0,900 \cdot 10^{-3} t + 0,200 \cdot 10^{-6} t^2$
	с дробью диаметром 1,0 мм	$c = 0,467 - 0,117 \cdot 10^{-3} t$ $\lambda = 1,789 - 0,317 \cdot 10^{-2} t + 0,219 \cdot 10^{-5} t^2$ $b = 1,697 - 0,150 \cdot 10^{-2} t + 0,700 \cdot 10^{-6} t^2$
хромитовая	без дроби	$c = 0,777 - 0,670 \cdot 10^{-4} t + 0,514 \cdot 10^{-7} t^2$ $\lambda = 0,998 - 0,633 \cdot 10^{-3} t + 0,405 \cdot 10^{-6} t^2$ $b = 1,293 - 0,400 \cdot 10^{-3} t + 0,200 \cdot 10^{-6} t^2$
	с дробью диаметром 1,0 мм	$c = 0,581 - 0,113 \cdot 10^{-3} t + 0,343 \cdot 10^{-7} t^2$ $\lambda = 0,869 - 0,239 \cdot 10^{-2} t + 0,513 \cdot 10^{-8} t^2$ $b = 1,252 - 0,300 \cdot 10^{-3} t + 0,300 \cdot 10^{-7} t^2$

## 2. Утепляющие смеси

Перлитные смеси являются утепляющими, они легкоплавкие ( $t_{пл} = 700 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ), имеют низкую плотность и низкий коэффициент аккумуляции тепла. Поскольку время затвердевания отливки обратно пропорционально корню квадратному из коэффициента аккумуляции тепла формой, то время затвердевания отливки в перлитной форме будет существенно больше, чем, например, в форме из кварцевого песка, поэтому перлитные смеси применяют для теплоизоляции прибылей и отдельных частей отливок (особенно, тонких сечений).

Для формовочных смесей на перлитной основе в качестве связующих компонентов используются: жидкое стекло, боксит и ортофосфорная кислота (алюмофосфат) и алюмохромфосфат. Ортофосфорная кислота служит отвердителем для боксита при затвердевании формовочной смеси. Графит вводят в качестве добавки в смеси, высушиваемые токами высокой частоты, так как он повышает теплопроводность и скорость прогрева смеси, а также увеличивает ее термостойкость.

Исследованы теплофизические свойства утепляющих перлитных смесей с добавками графита, со связующими алюмофосфатом и алюмохромфосфатом, уравнения зависимости которых от температуры представлены в табл. 2.

Таблица 2

Теплофизические свойства утепляющих хромитовых литейных смесей

Добавка	Связующее	Уравнение
-	жидкое стекло	$c = 1,329 - 0,217 \cdot 10^{-3}t + 0,267 \cdot 10^{-5}t^2$ $\lambda = 0,431 - 0,956 \cdot 10^{-3}t + 0,488 \cdot 10^{-6}t^2$ $b = 0,441 - 0,800 \cdot 10^{-3}t + 0,100 \cdot 10^{-6}t^2$
графит	жидкое стекло	$c = 1,158 - 0,854 \cdot 10^{-3}t - 0,289 \cdot 10^{-6}t^2$ $\lambda = 0,860 - 0,161 \cdot 10^{-2}t + 0,760 \cdot 10^{-6}t^2$ $b = 0,665 - 0,120 \cdot 10^{-2}t + 0,600 \cdot 10^{-6}t^2$
-	алюмофосфат	$c = 0,251 + 0,115 \cdot 10^{-3}t - 0,883 \cdot 10^{-6}t^2$ $\lambda = 0,220 + 0,408 \cdot 10^{-3}t - 0,478 \cdot 10^{-6}t^2$ $b = 0,084 + 0,110 \cdot 10^{-2}t - 0,200 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,900 \cdot 10^{-9}t^3$
-	алюмохромфосфат	$c = 0,457 - 0,335 \cdot 10^{-3}t - 0,338 \cdot 10^{-6}t^2$ $\lambda = 0,164 - 0,161 \cdot 10^{-3}t - 0,523 \cdot 10^{-7}t^2$ $b = 0,082 + 0,400 \cdot 10^{-3}t - 0,700 \cdot 10^{-6}t^2$

Для утепления прибылей применяются также формовочные смеси, изготовленные из отходов металлургии и энергетики. К ним относятся пыли, уловленные электрофильтрами сухой, и шламы, уловлен-

ные трубами Вентури мокрой газоочисток ферросплавного производства, а также зола тепловых электростанций.

Исследованы пыли от производства ферромарганца (FeMn) и силикомарганца (SiMn), шлам от производства силикомарганца, смесь пылей и шлама от производства ферро- и силикомарганца, формовка из смеси пылей и шлама, а также зола Кураховской тепловой электростанции. Состав исследованных пылей и шлама представлены в табл. 3, а уравнения зависимости свойств исследованных материалов от температуры – в табл. 4.

Таблица 3

Химический состав пылей и шлама, %

Материал	Mn	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	C	H <sub>2</sub> O
пыль FeMn	41,60	11,60	2,00	6,18	4,40	6,66	0,24	9,46	2,0
пыль SiMn	29,50	26,50	1,15	4,42	3,00	4,59	0,15	2,41	0,5
шлам SiMn	22,33	26,83	1,05	3,90	2,21	4,69	0,15	-	-
смесь пылей и шлама	33,79	21,99	1,31	6,21	2,85	4,38	0,16	-	6,0

Таблица 4

Теплофизические свойства пылей, шлама, формовки из них и золы

Материал	Уравнение
пыль от производства ферромарганца	$c = 0,711 + 0,919 \cdot 10^{-3}t - 0,330 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,189 \cdot 10^{-8}t^3$ $\lambda = 0,261 - 0,119 \cdot 10^{-3}t - 0,126 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,103 \cdot 10^{-9}t^3$ $b = 0,527 - 0,400 \cdot 10^{-3}t + 0,700 \cdot 10^{-7}t^2$
пыль от производства силикомарганца	$c = 1,095 + 0,166 \cdot 10^{-2}t - 0,697 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,477 \cdot 10^{-8}t^3$ $\lambda = 0,250 - 0,252 \cdot 10^{-3}t - 0,205 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,393 \cdot 10^{-9}t^3$ $b = 0,401 + 0,300 \cdot 10^{-4}t - 1,000 \cdot 10^{-6}t^2 + 1,000 \cdot 10^{-9}t^3$
шлам от производства силикомарганца	$c = 1,492 - 0,504 \cdot 10^{-3}t - 0,181 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,121 \cdot 10^{-8}t^3$ $\lambda = 0,478 - 0,135 \cdot 10^{-3}t + 0,167 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,709 \cdot 10^{-9}t^3$ $b = 0,771 - 1,100 \cdot 10^{-3}t + 0,500 \cdot 10^{-6}t^2$
смесь пылей и шлама	$c = 0,883 - 0,989 \cdot 10^{-4}t - 0,130 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,919 \cdot 10^{-8}t^3$ $\lambda = 1,027 - 0,233 \cdot 10^{-3}t + 0,323 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,144 \cdot 10^{-8}t^3$ $b = 1,154 - 1,200 \cdot 10^{-3}t + 0,700 \cdot 10^{-6}t^2$
формовка из смеси пылей и шлама	$c = 0,736 - 0,213 \cdot 10^{-3}t - 0,531 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,503 \cdot 10^{-9}t^3$ $\lambda = 0,572 - 0,243 \cdot 10^{-3}t - 0,167 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,272 \cdot 10^{-9}t^3$ $b = 0,880 - 0,700 \cdot 10^{-3}t + 0,400 \cdot 10^{-6}t^2$
зола Кураховской тепловой электростанции	$c = 1,185 - 0,800 \cdot 10^{-3}t + 0,200 \cdot 10^{-6}t^2$ $\lambda = 0,573 - 0,500 \cdot 10^{-3}t + 0,200 \cdot 10^{-6}t^2$ $b = 0,827 - 0,600 \cdot 10^{-3}t + 0,300 \cdot 10^{-6}t^2$

### 3. Металлокерамические смеси

В последние годы заметно возрос интерес к металлокерамическим материалам, уровень рабочих параметров которых может быть значительно выше, чем у других материалов, а стоимость с учетом не дефицитности сырья ставит эти материалы в ряд наиболее перспективных. Во всем мире интенсивно ведутся работы по созданию такой металлокерамики, в которой отсутствовали или были сведены к минимуму основные ее недостатки, используя при этом наиболее простую и дешевую технологию.

Серьезным успехом стало создание в России многокомпонентных металлокерамических материалов, в том числе литейных смесей, позволяющих улучшить физико-механические свойства литейной формы. Универсального металлокерамического материала не существует, поэтому конструировать и создавать металлокерамические изделия необходимо с учетом конкретных условий эксплуатации.

Такой важный для металлокерамики показатель, как трещиностойкость, у композиционных материалов в три раза выше, чем у многокомпонентных. Им присуща микропористость, резко снижающая вредное воздействие концентраторов напряжений. Особенностью структуры таких материалов является наличие частиц всех фаз, из которых была составлена шихта. При этом в процессе спекания не происходит перераспределение компонентов шихты, благодаря образованию новых фаз, то есть спеченная керамика представляет собой конгломерат частиц шихты, соединенный между собой некоторым пограничным слоем, который во многом определяет свойства материала.

Кроме того, важным преимуществом композитных металлокерамик является возможность использования в ее составе компонентов достаточно низкой чистоты (97-98 %) и, соответственно, более дешевых. При их правильном подборе и соотношении в шихте можно получить материалы с высокими физико-механическими свойствами. Важно, что такие материалы могут быть получены на стандартном, применяемом в литейном производстве, оборудовании. Перечисленные свойства открывают для композитных металлокерамических материалов чрезвычайно широкие и разнообразные методы применения.

Исследования теплофизических свойств выполнены для двухкомпонентных металлокерамических литейных смесей на основе алюминиевых порошков ПА-3 и ПА-4. Образцы литейных смесей изготовлены на оборудовании земельной лаборатории Казанского компрессорного завода и института ВНИИТНасосМаш.

Целью исследования являлось не только определение зависимости теплофизических свойств от температуры, но и от состава, для че-

го было применено планирование эксперимента для двухкомпонентных смесей по методу А. Шеффе с включением в модели несмесевого фактора – температуры [3].

В результате были получены следующие уравнения зависимости теплофизических свойств металлокерамических литейных смесей от состава и температуры:

$$c = 0,361x_1 + 0,480x_2 - 0,550x_1x_2 + 0,145 \cdot 10^{-2} x_1t + 0,157 \cdot 10^{-2} x_2t + 0,157 \cdot 10^{-2} x_1x_2t - 0,139 \cdot 10^{-5} x_1t^2 - 0,189 \cdot 10^{-5} x_2t^2 + 0,530 \cdot 10^{-5} x_1x_2t^2, \quad (1)$$

$$\lambda = 0,763x_1 + 0,804x_2 + 0,906x_1x_2 + 0,544 \cdot 10^{-3} x_1t - 0,453 \cdot 10^{-3} x_2t + 0,003x_1x_2t + 0,734 \cdot 10^{-6} x_1t^2 + 0,292 \cdot 10^{-5} x_2t^2 - 0,153 \cdot 10^{-4} x_1x_2t^2, \quad (2)$$

$$b = 0,582x_1 + 0,673x_2 - 0,028x_1x_2 + 0,128 \cdot 10^{-2} x_1t + 0,893 \cdot 10^{-3} x_2t + 0,580 \cdot 10^{-3} x_1x_2t - 0,695 \cdot 10^{-6} x_1t^2 - 0,303 \cdot 10^{-7} x_2t^2 + 0,450 \cdot 10^{-7} x_1x_2t^2. \quad (3)$$

### Выводы

Из анализа результатов исследования теплофизических свойств магнетитовых, хромоманганитовых и хромитовых смесей с добавками чугуновой дроби следует, что для создания литейных смесей с захлаживающими свойствами можно рекомендовать использование чугуновой дроби диаметром 0,5 мм, так как смеси с этой добавкой обладают наибольшим коэффициентом теплопроводности и захлаживающей способностью.

Наибольший коэффициент аккумуляции тепла имеет хромоманганитовая смесь с дробью, который в среднем составляет  $b_{\text{ХМЗ}} = 3,405 \text{ кВт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ , тогда как у хромоманганита  $b_{\text{ХМ}} = 1,650 \text{ кВт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ . Следовательно, применение захлаживающих хромоманганитовых смесей с чугуновой дробью для изготовления литейных форм позволит уменьшить время затвердевания отливок на 44 %

$$\frac{\tau_{31}}{\tau_{32}} = \frac{\sqrt{b_{\text{ХМЗ}}}}{\sqrt{b_{\text{ХМ}}}} = \frac{\sqrt{3,405}}{\sqrt{1,650}} = 1,44.$$

Коэффициент аккумуляции тепла для магнетитовой смеси с дробью составляет  $b_{\text{МЗ}} = 1,772 \text{ кВт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ , а без добавки –  $b_{\text{М}} = 1,112 \text{ кВт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ . Применение захлаживающей магнетитовой литейной смеси позволит уменьшить время затвердевания отливок на 26 %



$$\frac{\tau_{31}}{\tau_{32}} = \frac{\sqrt{b_{M3}}}{\sqrt{b_M}} = \frac{\sqrt{1,772}}{\sqrt{1,112}} = 1,26.$$

Коэффициент аккумуляции тепла хромитовой формовочной смеси с добавкой чугуной дробы диаметром 1 мм составляет  $b_{x3} = 1,095 \text{ кВт}\cdot\text{с}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$ , а без добавки –  $b_x = 1,160 \text{ кВт}\cdot\text{с}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$  (практически одинаковы), то есть добавка крупной дробы не только не увеличивает теплоаккумулирующую способность формы, но и несколько уменьшает ее вследствие уменьшения плотности литейной смеси с крупной дробью. Следовательно, значительный эффект увеличения теплоаккумулирующей способности формы может быть достигнут лишь введением в смесь чугуной дробы мелкой фракции.

Применение перлитных смесей и смесей из отходов промышленности и энергетики для утепления прибылей позволяет снизить их вес на 30 – 55 % и дает экономию на каждой тонне отливок 185 – 357 кг жидкого металла [4].

Металлокерамические смеси применяются для изготовления постоянных литейных форм, отверждаемых углекислым газом, для литья алюминиевых сплавов и свободной заливки литевых полиуретанов. Преимуществом металлокерамических форм по сравнению с заменяемой металлической формой или литьем в землю является меньшая масса формы и более короткий цикл ее изготовления.

По моделям (1 – 3) можно прогнозировать зависимость теплофизических свойств литейных смесей от состава и температуры, а также создавать литейные смеси с заданными теплофизическими свойствами.

### Список литературы

1. Теплофизические свойства промышленных материалов: Справочник / К.Д. Ильченко, В.А. Чеченев, В.П. Иващенко и др. – Дніпропетровськ: Січ, 1999. – 152 с.
2. Гуляев Б.Б. Литейные процессы. – М.-Л.: Машгиз, 1960. – 416 с.
3. Ильченко К.Д., Тарасевич Т.Ю. Теплофизические свойства двухкомпонентных смесей металлургии и коксохимии. – Днепропетровск: ІМА-прес, 2004. – 96 с.
4. Гольбин И.А. Вопросы экономики литейного производства. – Минск: Изд. АН БССР, 1960. – 261 с.

*Рукопись поступила 01.03.2008 г.*