

The aim of the researches is the optimization of the compositions of cold hardening mixtures based on oligofurfuriloxysiloxane (OFOS). Modeling of properties of mixes made by means of the equations of regress received by a method of planned experiment. All measurements were spent by standard techniques. The nomogram describing dependences between parameters of technology and properties of forming mixes is developed for management of properties of mixes.

Поступила 13.01.11

УДК 621.74.04

С. И. Репях

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

## Коробление выплавляемых моделей отливок

Приведены описание механизма коробления выплавляемых моделей отливок балочного типа несимметричного таврового сечения и новый метод расчета величины их коробления. Установлено, что величина коробления выплавляемых моделей отливок снижается с повышением давления запрессовки модельного состава в пресс-форму, уменьшением коэффициента термического линейного расширения применяемого модельного состава, сокращением длины выплавляемых моделей и зависит от соотношения ширины и толщины их стенок.

**Ключевые слова:** коробление, модельный состав, отливка, модель, температура, давление

Качество выплавляемых моделей отливок (ВМ), используемых в литье по выплавляемым моделям, во многом предопределяет качество самих отливок. В настоящее время известные экспериментальные данные о короблении ВМ носят фрагментарный характер, а расчеты по определению величин коробления ВМ и теоретические исследования механизма коробления ВМ отсутствуют, что не позволяет разработать однозначные и эффективные мероприятия, направленные на повышение точности формы ВМ и, соответственно, отливок.

Задача исследований – определить параметры формирования ВМ, ответственные за ее коробление, и оценить их влияние на величину коробления ВМ.

Для проведения теоретических исследований в качестве объекта исследования приняли ВМ балочного типа несимметричного таврового сечения. Схема сечения исследуемой ВМ представлена на рис. 1, а; обозначения плоскостей, продольно секущих тело ВМ, – на рис. 1, б, в.

Величину коробления ( $-\Delta_k$ ) ВМ, представленную на рис. 1, в, рассчитывают при следующих допущениях: ВМ затвердевает и охлаждается в неподатливой пресс-форме до комнатной температуры; во

время нахождения в пресс-форме затвердевание и охлаждение полки и ребра ВМ проходят независимо друг от друга как в силовом, так и тепловом отношении до момента перехода модельного состава в ребре ВМ из пластического состояния в упругое (переход происходит при постоянной температуре  $t_{\text{пв}}$ ); величина линейной усадки ребра ВМ предопределяется только ее торможением со стороны стенок пресс-формы во время охлаждения; величина линейной усадки полки ВМ – только ее торможением при усадке со стороны ребра; коробление ВМ, извлеченной из пресс-формы, возникает в результате различия величин линейных усадок сопрягающихся (полки и ребра) элементов ВМ; изогнутая (коробленная) ВМ имеет дугообразный вид с условным геометрическим центром дуги в точке О.

Исходя из принятых условий формирования ВМ, а также в соответствии с рис. 1, в, можно записать

$$DD' > AA' > EE' > BB' > CC',$$

$$AA' = 0,5(DD' + EE'); BB' = 0,5(EE' + CC'),$$

где  $DD'$ ,  $AA'$ ,  $EE'$ ,  $BB'$ ,  $CC'$  – длины дуг  $DD'$ ,  $AA'$ ,  $EE'$ ,  $BB'$  и  $CC'$  соответственно.

При этом расстояние между точками  $D$ ,  $A$ ,  $E$ ,  $B$  и  $C$  (рис. 1, в) равно

$$DA = AE = 0,5x_2, EB = BC = 0,5x_1.$$

Длину дуги  $AA'$  (рис. 1, в) рассчитываем по формуле

$$AA' = \frac{\pi\alpha R_A}{180}, \quad (1)$$

где  $\pi = 3,14$ ;  $\alpha$  – угол, град;  $R_A$  – радиус (расстояние от точки  $O$  до точки  $A$ ), м.

Длину дуги  $BB'$  рассчитываем по выражению

$$BB' = \frac{\pi\alpha R_B}{180}, \quad (2)$$

где  $R_B$  – радиус (расстояние от точки  $O$  до точки  $B$ ), м.

Поскольку (рис. 1, а)

$$R_B = R_A - \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad (3)$$

то из совместного решения зависимостей (1)-(3) находим

$$R_A = \frac{x_1 + x_2}{2} \left( \frac{AA'}{AA' - BB'} - 1 \right), \quad (4)$$

или, в соответствии с рис. 1 и выражением (4),

$$R_C = \frac{x_1 + x_2}{2} \left( \frac{AA'}{AA' - BB'} - 1 \right) - \frac{x_2 + 2x_1}{2}. \quad (5)$$

Величину коробления  $BM$  ( $-\Delta_K$ ) рассчитываем по известной из курса геометрии формуле

$$-\Delta_K = R_C - \sqrt{R_C^2 - 0,25l_{CC'}^2}, \quad (6)$$

где  $l_{CC'}$  – расстояние между точками  $C$  и  $C'$  (прямая  $CC'$  на рис. 1, в), м.

Для проведения инженерных расчетов допустимо принять  $l_{CC'} = BB'$ .

Взаимное силовое влияние сопрягающихся элементов охлажденной  $BM$  на величину ее коробления учтем с помощью поправочного коэффициента  $k$

$$k = \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^n,$$

где  $n$  – показатель степени (для модельных составов  $n \approx 2,7$ ).

С учетом поправочного коэффициента формула (6) будет иметь вид

$$-\Delta_K = k(R_C - \sqrt{R_C^2 - 0,25l_{CC'}^2}), \quad (7)$$

или

$$-\Delta_K = \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^n (R_C - \sqrt{R_C^2 - 0,25l_{CC'}^2}). \quad (8)$$

В формуле (8) неизвестной величиной является  $R_C$ . Исходя из принятого механизма и условий формирования коробления  $BM$ , величину  $R_C$  вычисляем по выражению (5), в котором длину дуги  $AA'$  рассчитываем по формуле

$$AA' = l_2 = l_{\text{пф}}(1 - \alpha_2), \quad (9)$$

где  $l_{\text{пф}}$  – длина рабочей полости пресс-формы;  $\alpha_2$  – коэффициент линейной усадки по длине ребра  $BM$ .

Длину дуги  $BB'$  находим из равенства

$$BB' = l_1 = l_{\text{пф}}(1 - \alpha_1), \quad (10)$$

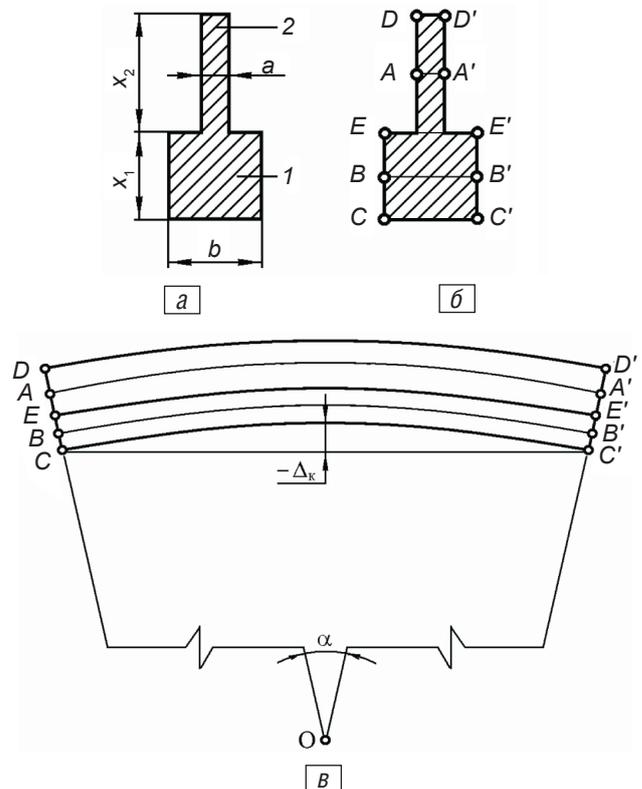


Рис. 1. Поперечное сечение  $BM$  (а, б); вид сбоку (в): 1 – полка; 2 – ребро

где  $\alpha_1$  – коэффициент линейной усадки по длине полки  $BM$ .

Для вычисления коэффициента  $\alpha_1$  рассмотрим зависимости температуры и длины элементов  $BM$  от времени ее пребывания в пресс-форме (рис. 2). С момента окончания запрессовки модельного состава в пресс-форму ( $\tau = 0$ ) начинается процесс его затвердевания и охлаждения. При этом ребро  $BM$

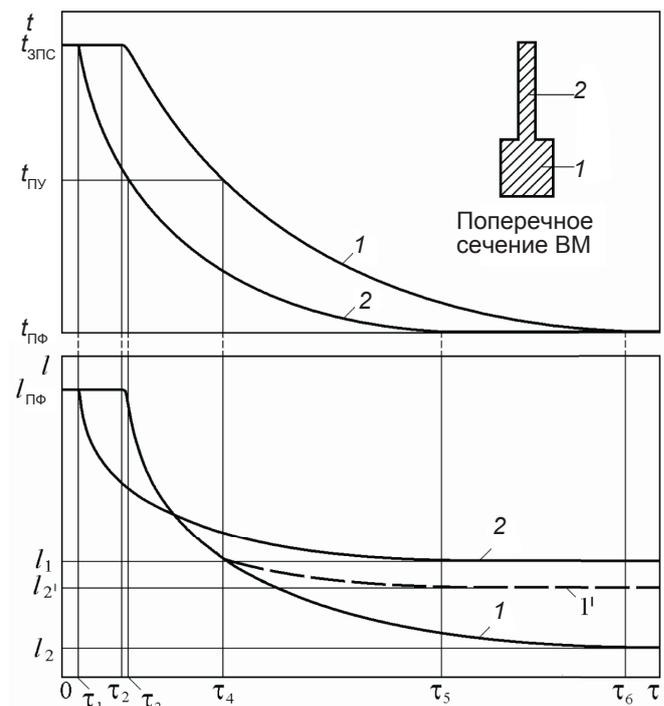


Рис. 2. Изменение температуры ( $t$ ) и длины  $BM$  ( $l$ ) от времени ее пребывания в пресс-форме: 1 – ребро; 2 – полка

имеет плотный (по всей своей поверхности) контакт с рабочей поверхностью пресс-формы в течение времени  $\tau_1$ , полка – в течение времени  $\tau_2$ . Время существования плотного контакта полки ВМ с рабочей поверхностью пресс-формы больше аналогичного времени для ребра, и, как минимум, для каждого из этих элементов это время равно времени затвердевания модельного состава в каждом из них.

Данное утверждение основано на том, что модельный состав до полного затвердевания в каждом из элементов ВМ находится под давлением шприца, из которого поступает в пресс-форму. Поскольку твердый модельный состав ВМ при повышенной температуре достаточно податлив, то в период затвердевания ВМ давление от шприца, оказываемое на еще пастообразный модельный состав во внутренних областях элементов ВМ, приводит к «распиранию» изнутри уже затвердевших поверхностных слоев модельного состава. Собственно, эффект «распирания» и обеспечивает плотный контакт затвердевающих элементов ВМ к рабочей поверхности пресс-формы. При этом чем больше давление запрессовки модельного состава в пресс-форму, тем продолжительнее время полного контакта ВМ с пресс-формой, что следует, например, из аналогии с затвердеванием алюминиевых отливок при литье в кокиль под низким давлением [1].

По окончании затвердевания модельного состава воздействие давления от шприца на ВМ прекращается, температура ВМ начинает понижаться, а вместе с этим начинается процесс линейной усадки ВМ.

Линейная усадка того или иного элемента ВМ рассматриваемой конструкции реализуется с того момента, когда касательные напряжения в том или ином элементе ВМ превысят силу трения модельного состава о стенки пресс-формы. С началом реализации линейной усадки элементы ВМ уменьшаются в размерах, и, соответственно, появляется воздушный зазор между поверхностью ВМ и пресс-формой, ширина которого увеличивается прямо пропорционально величине линейной усадки каждого из элементов ВМ.

В дальнейшем, в момент времени  $\tau_3$ , модельный состав в ребре ВМ достигает температуры перехода из пластического состояния в упругое ( $t_{\text{пв}}$ ). В полке ВМ модельный состав достигает температуры  $t_{\text{пв}}$  позднее – в момент времени  $\tau_4$ . Различия в величинах приведенных толщин полки и ребра ВМ является основной причиной, которая обуславливает различия как в скорости их охлаждения, так и скорости изменения их размеров (линейной усадки). В связи с тем, что до момента времени  $\tau_4$  модельный состав в полке находится в пластическом состоянии, реализацию линейной усадки полки и ребра до момента времени  $\tau_4$  допустимо рассматривать как усадку несвязанных между собой элементов ВМ.

Если бы полка и ребро не были сопрягающимися элементами ВМ, то кинетика изменения их длины в пресс-форме соответствовала бы зависимостям 1 и 2 на рис. 2, а к моменту времени завершения охлаждения ребра ( $\tau_5$ ) и полки ( $\tau_6$ ) их длины составили бы  $l_1$  и  $l_2$  соответственно. Тем не менее, с

момента времени  $\tau_4$  переход модельного состава в полке ВМ в упругое состояние становится причиной того, что с момента времени  $\tau_4$  и до окончания охлаждения ВМ в пресс-форме ( $\tau_6$ ) линейная усадка полки и ребра проходит в затрудненных условиях. Результат затрудненной усадки полки – меньший коэффициент ее линейной усадки. Как следствие, длина полки, охлаждающейся в условиях затрудненной усадки (см. зависимость 1' на рис. 2), к моменту окончания охлаждения ВМ достигает величины не  $l_1$ , а только  $l_1'$ .

Для определения величины  $l_1'$  поступили следующим образом. Исходя из того, что линейная усадка отливки балочного типа пропорциональна ее приведенной толщине или модулю охлаждения [2], приняли следующее соотношение коэффициентов линейной усадки полки и ребра:

$$\frac{l_{\text{пф}} - l_1'}{l_{\text{пф}} - l_2} = \frac{\alpha_1'}{\alpha_2} = 1 + \frac{R_1 - R_2}{R_1};$$

$$R_1 = \frac{F_1}{P_1} = \frac{x_1 b}{2x_1 + 2b - a}; \quad R_2 = \frac{F_2}{P_2} = \frac{x_2 a}{2x_2 + a},$$

где  $l_1'$  – длина полки ВМ, охлажденной до комнатной температуры в условиях затрудненной линейной усадки, м;  $\alpha_1'$  – коэффициент линейной усадки полки ВМ, охлажденной до комнатной температуры в условиях затрудненной линейной усадки;  $P_1, P_2$  – периметры (м) поперечного сечения полки и ребра ВМ без учета поверхности их сопряжения соответственно.

Отсюда находим

$$\alpha_1' = \alpha_2 \left( 1 + \frac{R_1 - R_2}{R_1} \right); \quad (11)$$

$$l_1' = l_{\text{пф}} (1 - \alpha_1'). \quad (12)$$

Исходя из вышеизложенного, для расчета величины коробления ВМ балочного типа несимметричного таврового сечения зависимость (10) запишем в виде

$$BB' = l_1' = l_{\text{пф}} (1 - \alpha_1'), \quad (13)$$

а выражение (5) – в виде

$$R_C = \frac{x_1 + x_2}{2} \left( \frac{AA'}{AA' - l_1'} - 1 \right) - \frac{x_2 + 2x_1}{2}. \quad (14)$$

Поскольку в рассматриваемых условиях изготовления ВМ ее ребро, по сути, представляет собой балку, практически охлаждающуюся в условиях свободной (условно) линейной усадки, величину этой усадки по длине ребра ВМ рассчитываем по формуле [2]

$$\alpha_2 = \alpha_C - \frac{\sigma_{\text{тр}}}{E_O} \left( \frac{l_{\text{пф}}}{R_2} \right)^m, \quad (15)$$

где  $\alpha_C$  – коэффициент свободной линейной усадки модельного состава;  $\sigma_{\text{тр}}$  – касательные напряжения в ВМ, обусловленные воздействием на нее внешней нагрузки (силы трения);  $E_O$  – модуль упругости модельного состава;  $m$  – показатель степени.

Обобщая изложенное выше, расчет величины

Значения  $\frac{\sigma_{\text{ТР}}}{E_0}$  и  $m$

Таблица 1

Марка модельного состава	$P_{\text{зпс}}$ , МПа	$\alpha_c$	$\sigma_{\text{ТР}}/E_0$	$m$
Paracast FW-352	0,01	0,021	0,00364	0,26
	0,30			0,27
	0,60			0,30
KC-111	0,01	0,011	0,00060	0,42
	0,30			0,44
	0,60			0,50

Примечание:  $P_{\text{зпс}}$  – давление запрессовки пастообразного модельного состава в пресс-форму

коробления ВМ балочного типа несимметричного таврового сечения по предлагаемому методу проводили по следующей формуле:

$$-\Delta_K = \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^n (R_C - \sqrt{R_C^2 - 0,25l_1^2}); \quad (16)$$

$$R_C = \frac{x_1 + x_2}{2} \left( \frac{l_2}{l_2 - l_1} - 1 \right) - \frac{x_2 + 2x_1}{2};$$

$$l_1 = l_{\text{ПФ}}(1 - \alpha_1); \quad l_2 = l_{\text{ПФ}}(1 - \alpha_2);$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 \left( 1 + \frac{R_1 - R_2}{R_1} \right); \quad \alpha_2 = \alpha_c - \frac{\sigma_{\text{ТР}}}{E_0} \left( \frac{l_{\text{ПФ}}}{R_2} \right)^m;$$

$$R_1 = \frac{x_1 b}{2x_1 + 2b - a}; \quad R_2 = \frac{x_2 a}{2x_2 + a}.$$

Для проверки результатов выполненных теоретических исследований рассчитали величины коробления для реальных ВМ, которые изготавливали из модельного состава марки Paracast FW-352 (модельный состав на основе полиолефинов с 30 % по объему твердого наполнителя – пылевидного полистирола) и модельного состава марки KC-111 (на основе смолы нефтеполимерной и церезина).

Для проведения расчетов использовали данные табл. 1, полученные для ВМ, изготовленных в стальных пресс-формах в соответствии с методикой работы [2].

Результаты расчетов (в расчетах  $n = 2,7$ ;  $l_{\text{ПФ}} = 148$  мм) по выражению (16) и экспериментальные данные о величинах коробления испытуемых ВМ приведены в табл. 2.

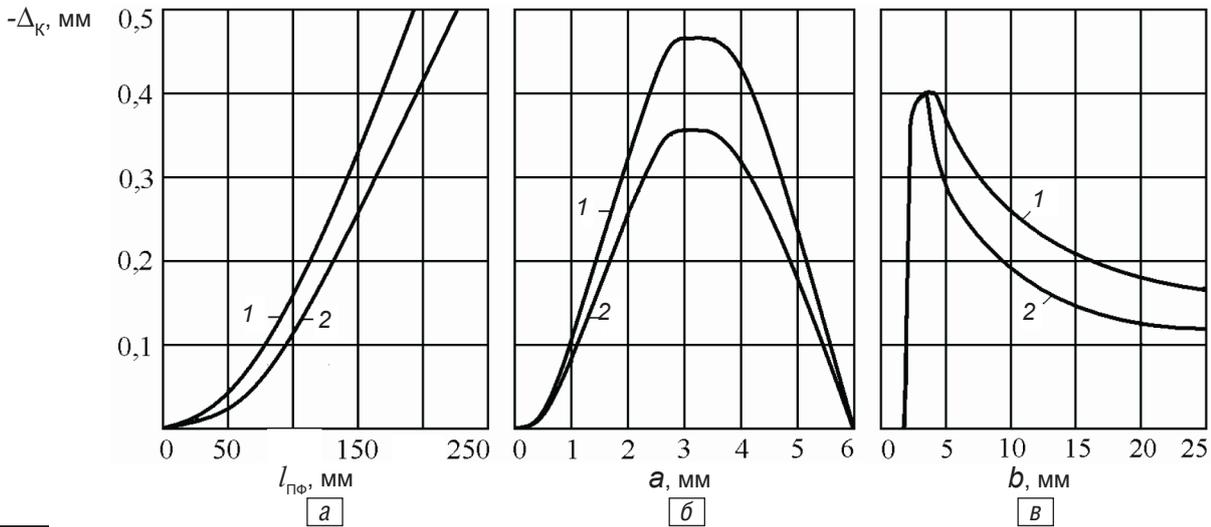
Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных табл. 2 показывает их удовлетворительную сходимость, что позволяет использовать формулу (16) для теоретической оценки влияния размеров ВМ, параметров модельного состава и давления запрессовки модельного состава в пресс-форму на величину коробления ВМ балочного типа несимметричного таврового сечения.

Для проведения анализа влияния размеров ВМ, параметров модельного состава и давления запрессовки модельного состава в пресс-форму на величину коробления ВМ балочного типа несимметричного таврового сечения, используя формулу (16), построили соответствующие зависимости. Расчеты осуществляли для ВМ, у которой (рис. 2, а):  $a = 2$  мм,  $b = x_2 = x_1 = 6$  мм при  $l_{\text{ПФ}} = 150$  и  $P_{\text{зпс}} = 0,3$  МПа. Полученные в результате расчетов графики функций представлены на рис. 3, 4, анализ которых показывает, что величина коробления ВМ балочного типа несимметричного таврового сечения возрастает с увеличением ее длины; при длине ВМ более 75 мм уравнение имеет, практически, линейный характер. Изменение величины коробления от размеров ребра и полки ВМ носит экстремальный характер и становится равной нулю при  $a = 0$  или  $a = b$ . При  $b = x_2$  и величине соотношения  $x_1/a < 1$  меняется характер коробления ВМ, то есть величина коробления меняет свой знак – ВМ переходит из вогнутого состояния ( $-\Delta_K$ ) в выгнутое ( $+\Delta_K$ ), переходя через 0 при  $x_1/a = 1$ . При этом коробление ВМ, изготовленных из модельного состава марки KC-111, несколько меньше коробления аналогичных моделей,

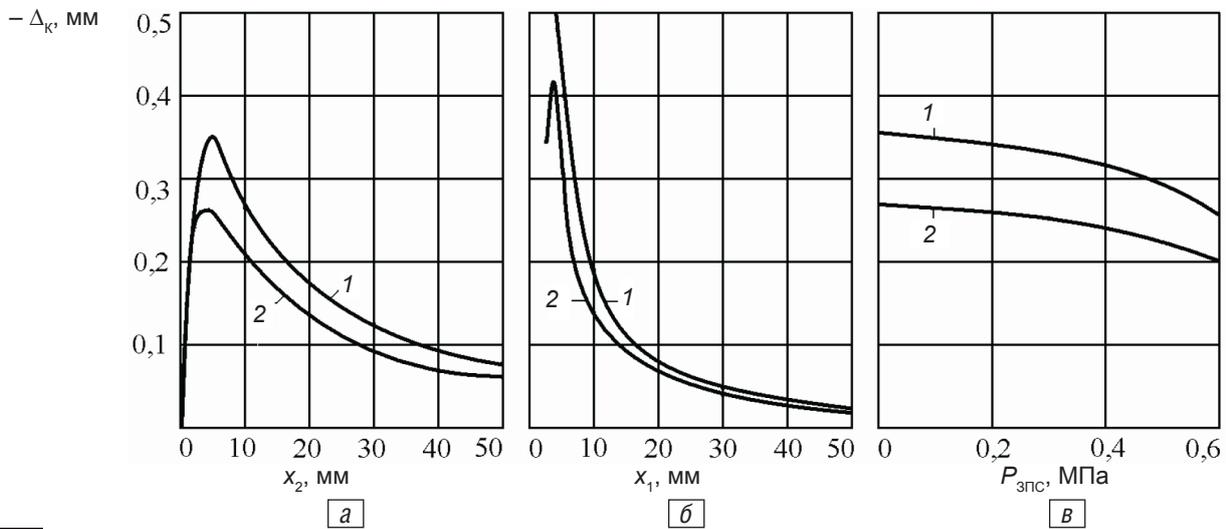
Таблица 2

### Величины коробления МО

Материал МО	$P_{\text{зпс}}$ , МПа	Размеры рабочих полостей пресс-формы, мм				$-\Delta_K$ , мм	
		$a$	$x_2$	$b$	$x_1$	расчетные	экспериментальные
Paracast FW-352	0,01	2,5	6	6,4	6,1	0,424	0,43 ± 0,03
		2,5	6	6,4	12,0	0,205	0,21 ± 0,03
		2,5	15	6,4	6,1	0,270	0,27 ± 0,03
	0,30	2,5	6	6,4	6,1	0,400	0,41 ± 0,02
		2,5	6	6,4	12,0	0,196	0,20 ± 0,02
		2,5	15	6,4	6,1	0,255	0,24 ± 0,03
	0,60	2,5	6	6,4	6,1	0,323	0,34 ± 0,04
		2,5	6	6,4	12,0	0,166	0,16 ± 0,02
		2,5	15	6,4	6,1	0,206	0,19 ± 0,03
KC-111	0,01	2,5	6	6,4	6,1	0,320	0,31 ± 0,02
		2,5	6	6,4	12,0	0,152	0,15 ± 0,02
		2,5	15	6,4	6,1	0,204	0,22 ± 0,03
	0,30	2,5	6	6,4	6,1	0,304	0,32 ± 0,02
		2,5	6	6,4	12,0	0,223	0,20 ± 0,02
		2,5	15	6,4	6,1	0,194	0,20 ± 0,03
	0,60	2,5	6	6,4	6,1	0,245	0,23 ± 0,03
		2,5	6	6,4	12,0	0,180	0,17 ± 0,03
		2,5	15	6,4	6,1	0,157	0,17 ± 0,02



**Рис. 3.** Изменение величины коробления ВМ от длины рабочей полости в пресс-форме (а), толщины ее ребра (б) и полки (в): 1 – Paracast FW-352; 2 – КС-111



**Рис. 4.** Изменение величины коробления ВМ от длины ее ребра (а) и полки (б), давления запрессовки пастообразного модельного состава в пресс-форму (в): 1 – Paracast FW-352; 2 – КС-111

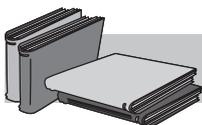
изготовленных из модельного состава марки Paracast FW-352, что объясняется меньшей величиной коэффициента линейной усадки у модельного состава марки КС-111.

С увеличением давления запрессовки пастообразного модельного состава в пресс-форму величина коробления ВМ уменьшается и при определенном значении  $P_{\text{зпс}}$  становится равной нулю. Если экстраполировать зависимости, представленные на рис. 4, в, до их пересечения с осью абсцисс, то для ВМ с принятыми базовыми размерами  $\Delta_k = 0$  при  $P_{\text{зпс}} \approx 1 \text{ МПа}$  для модельного состава марки КС-111

и при  $P_{\text{зпс}} \approx 0,92 \text{ МПа}$  для модельного состава марки Paracast FW-352.

### Выводы

Проведенные исследования показывают, что величина коробления ВМ несимметричного таврового сечения балочного типа снижается с повышением давления запрессовки модельного состава в пресс-форму, уменьшением коэффициента свободной линейной усадки (коэффициента термического линейного расширения) применяемого модельного состава и длины ВМ, а также зависит от соотношения ширины и толщины элементов ВМ.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Г. П., Беленький Д. М. Контакт отливки с формой при воздействии низкого давления // Литейн. пр-во. – 1986. – № 3. – С. 23.
2. Релях С. И. О равноточности размеров отливок // Metallurgical and Mining Industry. – 2009. – № 1. – С. 60-65.

## Ключові слова

викривлення, модельний склад, виливок, модель, температура, тиск

## Анотація

Реп'ях С. І.

### Жолоблення виплавлюваних моделей виливків

Наведено опис механізму жолоблення виплавлюваних моделей виливків балочного типу несиметричного таврового перерізу та новий метод розрахунку величини їх жолоблення. Встановлено, що величина жолоблення виплавлюваних моделей виливків знижується з підвищенням тиску запресовування модельного складу в прес-форму, зменшенням коефіцієнта термічного лінійного розширення застосовуваного модельного складу, зменшенням довжини виплавлюваних моделей і залежить від співвідношення ширини і товщини їх стінок.

## Summary

Репуах S.

### Warping of smelt casting models

Description of warping mechanism of smelt casting models of asymmetrical T-shaped beam type and new method of their warping size calculation is brought. It is stated that warping size of smelt casting models goes down with increase of pressure while pressing in of model composition in a press-form, also with diminishing of coefficient of thermal linear expansion of chosen model composition, reducing of smelt casting models length and depends on correlations of their walls width and thickness.

## Keywords

warping, composition model, founding, model, temperature, pressure

Поступила 29.10.10

УДК 621.744

## В. С. Дорошенко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Получение по ледяным моделям оболочковых форм с кристаллогидратами\*

При изготовлении оболочковых песчаных форм по одноразовым ледяным моделям (с использованием жидкости от таяния моделей для гидратации и твердения этих связующих) в качестве связующих предложено использовать такие кристаллогидраты, как цемент, гипс и металлофосфаты. Для этой цели, как показали исследования, наиболее подходит быстротвердеющий цемент, который позволяет в течение 5-7 мин образовать твердую корку из сухой песчаной смеси вокруг моделей в контейнерной форме. Приведены примеры оболочковых форм.

**Ключевые слова:** песчаная форма, лед, ледяные модели, криотехнология, формовка, оболочковая форма, кристаллогидраты

В цикле исследований по созданию экологически чистой технологии производства металл-отливок по одноразовым моделям из льда как конструктивного или матричного материала с добавками или примесями (разновидность evaporative pattern casting process, а также одна из криотехнологий литейного производства) разработаны способы

получения песчаных форм по ледяным моделям, новизна которых состоит в том, что продукты таяния модели частично или полностью впитываются в поровое пространство сухого песка формы [1, 2]. При этом в сухую песчаную формовочную смесь предварительно вводят связующее в порошкообразном виде, способствующее созданию прочной песчаной

\* Работа выполнена под руководством проф. О. И. Шинского при участии Ю. Н. Иванова и А. Г. Черныша