

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ УСАДКИ МОДЕЛЬНЫХ СОСТАВОВ И МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ВЫПЛАВЛЯЕМАЯ МОДЕЛЬ – ОГНЕУПОРНАЯ КЕРАМИЧЕСКАЯ ФОРМА»

© 2019 г. **К.В. Никитин, В.Н. Дьячков, В.И. Никитин, А.Ю. Баринов**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

*Статья поступила в редакцию 17.06.19 г., доработана 08.07.19 г., подписана в печать 16.07.19 г.*

Выполнено исследование свободной линейной усадки ненаполненных (ПС50-50, МВС3-Т, Romocast 105, Romocast 152) и наполненных (Romocast 252, Romocast 325) модельных составов в зависимости от температуры окружающей среды. Полученные результаты выявили следующие основные особенности в изменении указанного технологического параметра. Установлено, что наибольшей свободной линейной усадкой обладают ненаполненные модельные составы, а наименьшей – наполненные. При этом процессы, связанные со свободной линейной усадкой, протекали в образцах в течение длительного времени (до 24 ч). Это, вероятно, связано с продолжительностью процессов полимеризации и низкой теплопроводностью модельных составов. Изменение температуры окружающей среды в интервале от  $-5$  до  $+35$  °C оказывает существенное влияние на величину изменения линейных размеров образцов из исследованных модельных составов. Изменение длины образцов из ненаполненных модельных составов варьируется в диапазоне от  $+0,3$  до  $-0,4$  %, а из наполненных – от  $+0,2$  до  $-0,15$  %. При охлаждении до  $-5$  °C и последующем нагреве до  $+20$  °C образцов из ненаполненных составов их исходная длина уменьшается в среднем на 0,2 мм, а при нагреве до  $+35$  °C и последующем охлаждении до  $+20$  °C она увеличивается в среднем на 0,2–0,3 мм. При аналогичных изменениях температуры окружающей среды у образцов из наполненных модельных составов изменение размеров составляет не более 0,1 мм. Для устранения растрескивания огнеупорных керамических форм предложено проводить захлаживание системы «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма», что обеспечивает гарантированный зазор между моделью и формой и нивелирует негативное влияние расширяющегося модельного состава.

**Ключевые слова:** литье по выплавляемым моделям, свободная линейная усадка, огнеупорная керамическая форма, система «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма».

**Никитин К.В.** – докт. техн. наук, доцент, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта Самарского государственного технического университета (СамГТУ) (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Дьячков В.Н.** – доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: dyachkow@list.ru

**Никитин В.И.** – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Баринов А.Ю.** – вед. инженер кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Для цитирования:** Никитин К.В., Дьячков В.Н., Никитин В.И., Баринов А.Ю. Исследование линейной усадки модельных составов и механизмов взаимодействия в системе «выплавляемая модель – огнеупорная керамическая форма». *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 6. С. 42–50. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-6-42-50.

*Nikitin K.V., D'yachkov V.N., Nikitin V.I., Barinov A.Yu.*

### Investigation of linear shrinkage of model compounds and interaction mechanisms in the «lost wax pattern – refractory ceramic mold» system

The study covers the free linear shrinkage of non-filled (PS50-50, MVS3-T, Romocast 105, Romocast 152) and filled (Romocast 252, Romocast 325) model compounds depending on the ambient temperature. Research results revealed the following main features in the change of this technological parameter. It is found that the greatest free linear shrinkage is typical for non-filled model compounds, while filled model compounds have a minimum linear shrinkage. At the same time, processes associated with free linear shrinkage occurred in samples for a long time (up to 24 hours). This is probably due to the duration of polymerization processes and low thermal conductivity of model compounds. Changes in the ambient temperature within  $-5...+35$  °C have a significant impact on the degree of changes in linear dimensions of the studied model compound samples. The length of samples changed within  $+0.3...-0.4$  % for non-

filled model compounds and within  $+0.2\ldots-0.15\%$  for filled compounds. At the same time, non-filled compound samples cooled to  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  and then heated to  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  reduce their length by 0.2 mm on average. When non-filled compound samples are heated to  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$  and then cooled to  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the initial length increases by  $0.2\pm 0.3$  mm on average. With similar ambient temperature changes in filled model compound samples, their change in length is not more than 0.1 mm. To eliminate refractory ceramic mould cracking, it is proposed to cool the «lost wax pattern – refractory ceramic mold» system to ensure a guaranteed gap between the pattern and the mold and eliminate the negative impact of the expanding pattern composition.

**Keywords:** investment casting, free linear shrinkage, refractory ceramic mold, «lost wax pattern – refractory ceramic mold» system.

**Nikitin K.V.** – Dr. Sci. (Eng.), Associate prof., Dean of the Faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport, Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244).  
E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**D'yachkov V.N.** – Associate prof., Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: dyachkov@list.ru.

**Nikitin V.I.** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.  
E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Barinov A.Yu.** – Lead engineer, Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Citation:** Nikitin K.V., D'yachkov V.N., Nikitin V.I., Barinov A.Yu. Investigation of linear shrinkage of model compounds and interaction mechanisms in the «lost wax pattern – refractory ceramic mold» system. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 6. P. 42–50 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-6-42-50.

## Введение

В настоящее время такие специальные способы литья, как литье в кокиль [1, 2], литье по выплавляемым [3, 4] и газифицируемым [5, 6] моделям, имеют широкое распространение в мировой практике получения отливок с высокой размерной точностью. Однако, несмотря на развитие теоретических и технологических основ для указанных способов литья, остается ряд проблем, связанных с отдельными технологическими этапами.

Так, например, литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) является одним из многостадийных способов получения отливок. Согласно классическому определению, к нему относят метод получения отливок в многослойных, оболочковых, неразъемных разовых формах, которые получают по разовым моделям [7].

Технология ЛВМ широко применяется для изготовления отливок сложной конфигурации, с высокими качеством поверхности и точностью геометрических размеров. Применение данного способа наиболее оправдано в тех случаях, когда другие методы получения деталей (ковка, штамповка, механическая обработка и т.д.) являются слишком трудоемкими или дорогостоящими. Первые упоминания о литье по выплавляемым моделям относятся к 5000 г. до н. э. — с его помощью производили примитивные инструменты [8, 9].

Промышленное освоение ЛВМ в мировой практике относится к 1940-м годам. Это было обусловлено тем, что традиционные технологические приемы уже не могли удовлетворять возросший спрос на ответственные изделия, и потребова-

лись альтернативные промышленные технологии. Литье по выплавляемым моделям стало одной из таких альтернатив для производства готовых деталей ответственного назначения [10], например лопаток авиационных газотурбинных двигателей из жаропрочных труднообрабатываемых сплавов [11].

Качество будущих отливок (шероховатость поверхности, геометрическая точность) во многом зависит от качества выплавляемых моделей, которое, в свою очередь, определяется свойствами используемых модельных составов (МС), сложностью конструкции моделей, технологиями их получения и условиями хранения. Выплавляемую модель, которая получается из жидкого или пастообразного модельного состава, по сути можно считать отливкой. Следовательно, при затвердевании в пресс-форме в ней протекают процессы, сходные с процессами затвердевания отливок из металлов и их сплавов, пластмасс и др. [12, 13].

В связи с вышесказанным к МС предъявляется целый комплекс требований. Наиболее часто упоминаются такие показатели, как число пенетрации, плотность, температура каплепадения, зольность [14, 15]. Модельные составы являются сложными композициями, состоящими из естественных и синтетических восков, специальных наполнителей и даже воды [14]. В связи с этим проводятся интенсивные исследования технологических свойств различных МС, а также влияния технологических параметров их получения на качество выплавляемых моделей [16].

На основании анализа брака при получении отливок ответственного назначения с тонкой стенкой способом ЛВМ сформулированы основные технологические критерии для целенаправленного выбора модельных составов: склонность к короблению, трещиностойчивость, образование утяжин на моделях и др. [12].

В работе [17] исследовано влияние параметров получения выплавляемых моделей на линейную и объемную усадки в зависимости от типа модельного состава. Установлено, что минимальными значениями линейной и объемной усадок (соответственно 1,15 и 2,53 %) обладает модельный состав, включающий, %: парафин — 80; пчелиный воск — 5; пальмовый воск — 5; бурый воск (экстракт из определенных видов бурого угля) — 5; китайский воск (естественный воск, выделяемый в качестве секрета определенными видами насекомых) — 5. Однако при использовании подобных компонентов в других соотношениях снизить различные виды усадки и повысить качество выплавляемых моделей можно за счет оптимального сочетания температур жидкого модельного состава и запрессовки, а также давлением последней и временем выдержки под давлением [18].

Для улучшения ряда технологических свойств известных модельных составов широко используются различные модифицирующие добавки. Так, введение в МС небольших количеств соевой муки обеспечивает повышение их твердости и прочности на растяжение, уменьшение свободной линейной усадки, снижение шероховатости поверхности моделей, улучшение смачиваемости огнеупорной суспензией [19]. Однако из более чем 200 известных видов модельных составов на сегодняшний момент в производстве литья по выплавляемым моделям используется не более 10 [20].

В настоящее время широкое применение находит компьютерное моделирование для исследования процессов, протекающих в МС до и после их запрессовки в пресс-формы. Например, с помощью искусственной нейронной сети были установлены оптимальные значения температуры и давления запрессовки, а также время выдержки и охлаждения модельного состава, при которых обеспечивается необходимое качество выплавляемой модели [21].

Следует отметить, что вышеперечисленные технологические свойства МС целесообразно исследовать в многофакторной и взаимосвязанной системе «модельный состав — огнеупорная керамическая форма (ОКФ)».

Важное значение при удалении модельного состава из полости ОКФ имеет степень адгезии на границе их контакта. На степень адгезии влияют температура выплавления и вид МС [22]. В работе показано, что, как правило, наполненные промышленные модельные составы не проникают в жидком состоянии в поры огнеупорной керамической формы [22].

Введение в материал обсыпки при формировании поздних слоев ОКФ до 25 % активированного угля существенно сокращает риск образования трещин при выплавлении МС токами высокой частоты [23]. Сочетание в определенном соотношении пылевидных фракций оксидов циркония, алюминия и кремния при образовании облицовочных слоев существенно улучшает качество рабочей поверхности и повышает прочность огнеупорной керамической формы [24].

В работе [25] на основании разработанной переходной термомеханической нелинейной модели конечных элементов обоснована возможность прогнозирования трещин в ОКФ в зависимости от конструкции выплавляемой модели. Математическим моделированием и экспериментами доказано, что вероятность образования трещин выше в острых углах сопряжения стенок. Радиальное сопряжение существенно снижает брак по растрескиванию оболочковых форм.

Однако следует отметить, что исследований процессов по взаимодействию в многофакторной системе «выплавляемая модель — огнеупорная керамическая форма» недостаточно для повышения эффективности литья по выплавляемым моделям.

Целью настоящей работы являлось исследование<sup>1</sup> механизмов взаимодействия в системе «выплавляемая модель — огнеупорная керамическая форма» при выплавлении модельных составов различных марок. При этом основной упор был сделан на ОКФ, получаемые на основе плавного кварца.

## Материалы и методика экспериментов

Исследуемые модельные составы и их основные свойства представлены в таблице.

Следует отметить, что марки МС ПС50-50 (ТУ 0255-005-23753216-2016) и МВС-3Т (0255-001-71462031-2005) в связи с простотой их изготовления

<sup>1</sup> Исследование выполнено в Центре литейных технологий СамГТУ.

## Свойства исследуемых модельных составов

| МС                                                                                 | Марка        | Наполнитель | Содержание наполнителя, % | Свободная линейная усадка при запрессовке, % | Температура каплепадения, °С | Остаток после прокаливания, (max) % | Вязкость при 100 °С, мПа·с |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|---------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Ненаполненный                                                                      | Romocast 105 | —           | —                         | Не указано                                   | 78–82                        | 0,05                                | 50–100                     |
|                                                                                    | Romocast 152 | —           | —                         | Не указано                                   | 67–71                        | 0,05                                | 120–180                    |
|                                                                                    | ПС50-50      | —           | —                         | 0,8–1,0                                      | 48–53                        | 0,02                                | 438                        |
|                                                                                    | MBC 3-T      | —           | —                         | 1,1–1,5                                      | 76,9                         | 0,02                                | 784                        |
| Наполненный                                                                        | Romocast 252 | PTA         | 35                        | Не указано                                   | 67–72                        | 0,05                                | 300–600                    |
|                                                                                    | Romocast 325 | XLPS        | 30                        | Не указано                                   | 73–82                        |                                     | 200–500                    |
| Примечание. PTA — терефталевая кислота, XLPS — сверхвысокомолекулярный полиэтилен. |              |             |                           |                                              |                              |                                     |                            |

и невысокой стоимостью исходных компонентов производятся в основном непосредственно на российских литейных предприятиях для собственных нужд. Так, в состав ПС50-50 входят парафин (50 %) и стеарин (50 %), а в MBC 3-T — парафин (45 %), церезин (40 %) и полиэтиленовый воск (15 %). Модельные составы серии Romocast производятся компанией «Romonta» (Германия). При этом в сопроводительной документации не указываются их детальный состав и свободная линейная усадка после запрессовки ( $\alpha_{МС}$ , %) в пресс-форму.

Определение свободной усадки при затвердевании и влияние температурных режимов на линейные размеры образцов из исследуемых МС выполняли по следующей методике. Порцию модельного состава массой 400 г при температуре 80 °С расплавляли в сушильном шкафу модели ПС 51.41.52 (РФ). Запрессовку МС при температуре 75 °С производили ручным шприцем в пресс-форму (размер рабочей полости 10×10×150 мм). После затвердевания образец извлекали из пресс-формы и определяли его длину при температуре окружающей среды 20 °С через 1 и 24 ч после затвердевания, используя электронный штангенциркуль модели Qstexpress (точность прибора 0,01 мм). Измерения выполняли на 5 образцах для каждой марки МС после их выдержки при разных температурах окружающей среды: –5, 5, 20, 30 и 35 °С. Охлаждение образцов от комнатной температуры 20 °С до –5 °С осуществляли в морозильной камере модели МЛК-250 (РФ), а до температуры 5 °С — в проточной холодной воде. Температуру контролировали спиртовым термометром. Нагрев образцов до температур от 20 °С и выше производили в сушильном шкафу моде-

ли ПС 51.41.52. С целью стабилизации температурного режима осуществляли изотермическую выдержку в течение 1 ч при каждой температуре испытания.

Свободную линейную усадку образцов определяли по уравнению

$$\alpha_{МС} = [(L_{п} - L)/L_{п}] \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $L_{п}$  = 150 мм — длина полости формы,  $L$  — длина образца, мм.

Следует отметить, что по формуле (1) нельзя оценить величину и характер (уменьшение или увеличение) изменения размеров образцов ( $\Delta L$ , %) при варьировании температурного режима. В связи с этим для определения величины  $\Delta L$  в зависимости от температуры предложено следующее выражение:

$$\Delta L = [(L_1 - L_2)/L_1] \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $L_1$  — длина образца при комнатной температуре (20 °С), а  $L_2$  — при заданной температуре окружающей среды, мм.

Положительные значения  $\Delta L$ , получаемые по формуле (2), означают усадку образцов при их охлаждении ниже 20 °С, а отрицательные — свидетельствуют о тепловом расширении образцов при их нагреве выше 20 °С относительно их исходного размера.

На восковых моделях, выдержанных при температуре окружающей среды (20 °С), послойно формировали огнеупорную керамическую форму. Для ее изготовления применяли плавный кварц «Экосил-Мелур» (ТУ 5931-002-71435339-2004) и в качестве связующего — «Сиалит-20С» (ТУ 2145-003-438/1938-97). При изготовлении ОКФ

на восковые модели наносили 5 слоев покрытия с обсыпкой, 6-й слой (закрепляющий) формировался без обсыпки. Размер фракции огнеупорного материала в первом слое составлял 0,2 мм, во втором и последующих — 0,4 мм. Облицовочный (первый) слой сушили 4 ч, последующие слои подвергали сушке в течение 2 ч при комнатной температуре. Температуру полученной системы «выплавляемая модель — огнеупорная керамическая форма» изменяли в интервале  $-5...+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  с шагом  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Охлаждение системы относительно  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $0$  и  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  осуществляли в морозильной камере, до положительных температур — в холодной воде. Далее для выравнивания температуры по всему объему системы проводили изотермическую выдержку длительностью 30 мин, после чего с использованием программно-аппаратного комплекса СИАМС 700 замеряли зазор между стенкой огнеупорной керамической формы и выплавляемой моделью. Выплавление модельных составов из ОКФ осуществляли в паровом котле КПЭМ 100/9 при температуре воды  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  и оценивали количество целых и разрушенных форм.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

### Влияние температурных режимов на величину свободной линейной усадки модельных составов различных видов

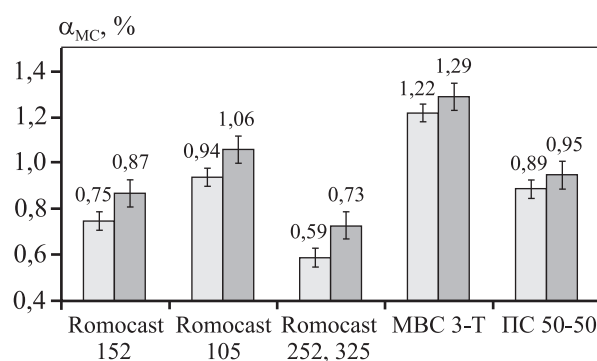
Зависимость свободной линейной усадки образцов из модельных составов различных видов от времени их выдержки при постоянной температуре  $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  представлена на рис. 1. Видно, что наибольшие ее значения показали ненаполненные МС марок Romocast 105 и MBC 3-Т, а наименьшие — наполненные МС Romocast 252 и 325.

Анализ полученных результатов показывает, что усадочные процессы в модельных составах могут протекать до 24 ч. Это, вероятно, связано с низкой теплопроводностью МС и продолжительностью процессов их полимеризации.

Известно, что технологическая усадка модельных составов при затвердевании, определяющая геометрическую точность литого изделия, зависит от комплекса физических свойств МС и размеров испытываемого образца [9]:

$$\alpha_{\text{МС}} = [\alpha_{\text{с}} - \sigma_{\text{тр}}/E_{\text{МС}} (4l/b)^m] \cdot 100\text{ } \%, \quad (3)$$

где  $\alpha_{\text{с}}$  — свободная линейная усадка, %;  $\sigma_{\text{тр}}$  — касательные напряжения, возникающие в восковой



**Рис. 1.** Влияние времени выдержки модельных составов после затвердевания на свободную линейную усадку образцов

Светлые столбцы —  $\tau = 1\text{ ч}$ , темные —  $24\text{ ч}$

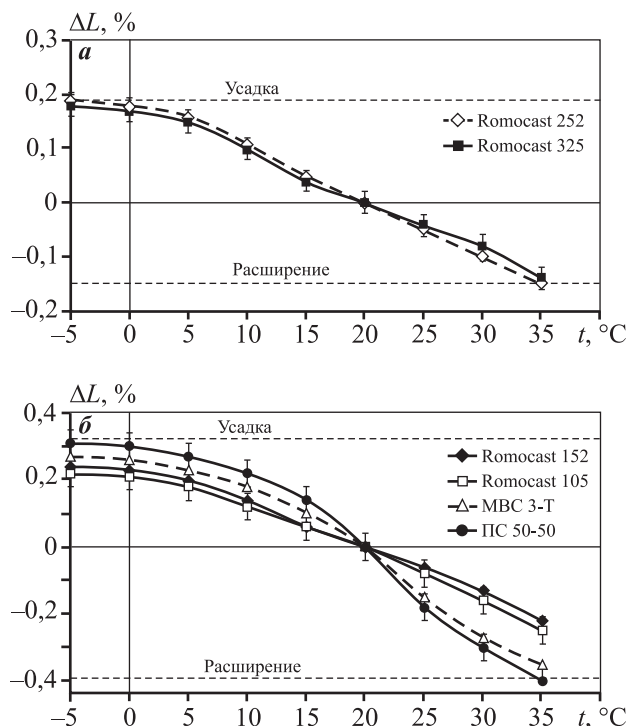
модели при ее усадке, Па;  $E_{\text{МС}}$  — модуль упругости МС при растяжении, МПа;  $l$  — размер восковой модели, см;  $b$  — длина стороны поперечного сечения восковой модели, см;  $m$  — показатель степени, учитывающий влияние давления запрессовки ( $P$ ) МС в пресс-форму на величину усадки восковой модели.

Из выражения (3) следует, что при прочих равных условиях технологическая усадка наиболее существенно зависит от свободной линейной усадки МС определенного вида. В связи с этим и на основании данных рис. 1 можно заключить, что наибольшей технологической усадкой будут характеризоваться модели, полученные из ненаполненных модельных составов марок Romocast 105 и MBC 3-Т.

Влияние температуры окружающей среды на изменение линейных размеров образцов из исследуемых МС представлено на рис. 2.

Видно, что охлаждение ниже  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  вызывает уменьшение  $\Delta L$  из-за усадки, а повышение температуры — увеличение  $\Delta L$  вследствие теплового расширения. Наибольшие изменения в зависимости от температуры установлены для образцов из ненаполненных составов (см. рис. 2, б). Так, изменение длины образца из МС марки ПС50-50 в диапазоне  $t = -5...+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  составило  $\Delta L = +0,34...+0,27\text{ } \%$ . Это означает, что длина образцов уменьшилась со  $148,3\text{ мм}$  (при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) до  $147,8\text{ мм}$  (при  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а при температуре  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  она увеличилась до  $148,9\text{ мм}$ , т.е. величина  $\Delta L = -0,4\text{ } \%$ . Та же картина наблюдалась для образцов из ненаполненного модельного состава марки MBC 3-Т. Обращает на себя внимание, что данные МС характеризовались мак-

симальной свободной линейной усадкой в процессе затвердевания. Диапазон изменения длины образцов для наполненных МС Romocast 252



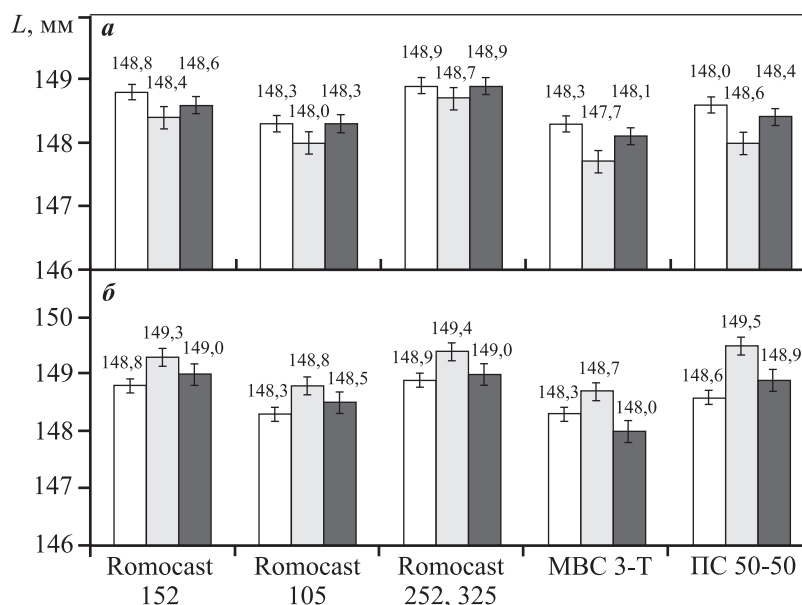
**Рис. 2.** Влияние температуры окружающей среды на изменение размеров образцов из наполненных (а) и ненаполненных (б) модельных составов

и Romocast 325 при исследованных температурах составил +0,19...–0,15 %.

С технологической точки зрения важным параметром является стабильность линейных размеров образцов в зависимости от изменения температуры окружающей среды. С этой целью образцы из различных МС охлаждали до  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  и нагревали до  $35\text{ }^\circ\text{C}$  относительно базовой температуры  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , обеспечивая изотермическую выдержку в течение 24 ч. Далее образцы снова охлаждали до  $20\text{ }^\circ\text{C}$  с изотермической выдержкой в течение 24 ч и измеряли их длины. Анализ результатов (рис. 3) показывает, что после оказанных температурных воздействий возврат к начальным размерам, установленным при комнатной температуре ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ), не происходит. Максимальные отклонения от исходных линейных размеров зафиксированы у образцов из ненаполненных МС — Romocast 105, Romocast 152, PC50-50 и MBC 3-T.

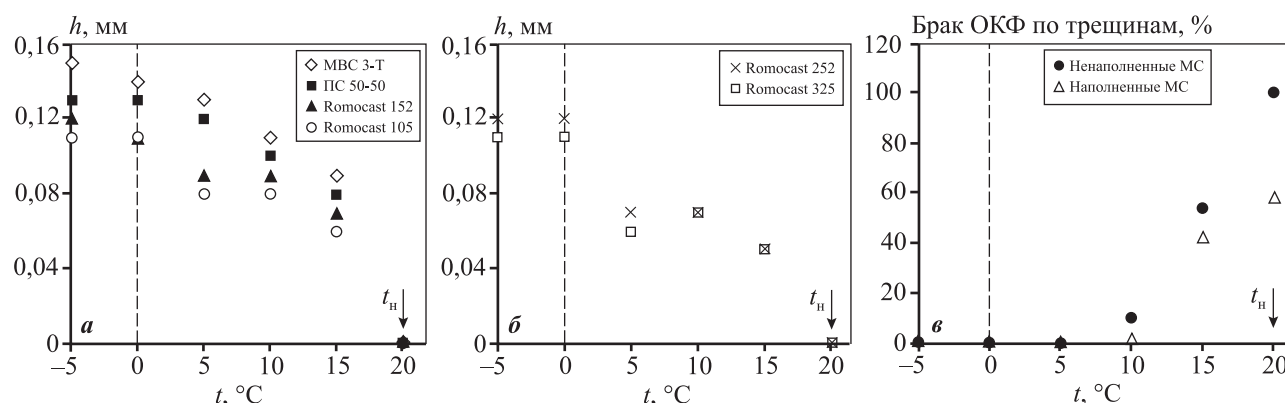
### Взаимодействие в системе «модельный состав — огнеупорная керамическая форма»

На рис. 4 представлены результаты исследования влияния температуры охлаждения системы на величину зазора между внутренней поверхностью ОКФ и модельным составом, а также на долю керамических форм, которые имели брак по трещинам в ходе операции выплавки МС. Видно,



**Рис. 3.** Влияние температуры окружающей среды на стабильность линейных размеров образцов из различных модельных составов после охлаждения до  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  (а) и после нагрева до  $35\text{ }^\circ\text{C}$  (б)

**а:** белые столбцы — эталон при  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ; серые — охлаждение до  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ ; черные — нагрев до  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (измерение через 24 ч);  
**б:** белые столбцы — эталон при  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ; серые — нагрев до  $35\text{ }^\circ\text{C}$ ; черные — охлаждение до  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (измерение через 24 ч)



**Рис. 4.** Влияние температуры охлаждения на величину зазора (*а, б*) и долю треснувших ОКФ (*в*) в системе «выплавляемая модель — огнеупорная керамическая форма»

$t_n$  — начальная температура перед захлаживанием системы

что при охлаждении системы с ненаполненными модельными составами от 20 °C до интервала  $t = -5...+5$  °C формируются зазоры между выплавляемой моделью и внутренней поверхностью ОКФ величиной  $h = 0,15 \div 0,11$  и  $0,13 \div 0,08$  мм соответственно (см. рис. 4, *а*). В случае использования наполненных МС при таких же режимах охлаждения значения  $h = 0,12 \div 0,11$  и  $0,07 \div 0,06$  мм соответственно (рис. 4, *б*). Указанные зазоры гарантированно обеспечивают целостность ОКФ при выплавлении модельных составов (рис. 4, *в*). Влияние вида МС на долю растрескавшихся ОКФ при выплавлении отчетливо проявляется при менее интенсивных режимах охлаждения систем (10÷20 °C). Так, в случае ненаполненных МС доля брака изменяется в интервале 10÷100 %, а при применении наполненных МС — 2÷58 % соответственно.

Зависимость величины зазора в исследованном интервале температур адекватно описывается выражением

$$h = -0,0003t^3 - 0,0008t + 0,1322, \quad (4)$$

где  $h$  — зазор между выплавляемой моделью и стенкой ОКФ, мм;  $t$  — температура системы «выплавляемая модель — огнеупорная керамическая форма» перед выплавлением, °C.

Установленные закономерности обусловлены, прежде всего, следующими основными факторами. Огнеупорные керамические формы, получаемые с применением плавного кварца, имеют минимальные значения коэффициента теплового линейного расширения при нагреве до температур 100—350 °C [7, 10, 26, 27]. Выплавление модельных составов из ОКФ, как правило, производится в ди-

апазоне  $t = 60 \div 95$  °C, в котором указанные формы не испытывает теплового расширения. При нагреве системы сразу до температур выплавления (~95÷100 °C) модельный состав, расширяясь, оказывает давление на стенки ОКФ, что может являться причиной растрескивания и даже разрушения форм при операции выплавления.

С целью устранения растрескивания обычно увеличивают толщину стенки керамической формы (за счет увеличения количества слоев) и используют опорный наполнитель при выплавлении. В качестве дополнительного технологического приема для обеспечения целостности ОКФ на основе плавного кварца используют выплавление модельных составов в среде перегретого пара в специальном устройстве — бойлерклаве. Этот технологический способ успешно применяется для удаления модельных составов с температурой плавления до 100 °C. Существенными недостатками бойлерклава являются его высокая стоимость, дополнительный расход электроэнергии для получения пара с требуемыми давлением ( $P = 0,8$  Па) и температурой ( $t = 170$  °C). Дополнительным негативным фактором является насыщение МС влагой, что требует проведения регенерации для их повторного использования [7, 10, 15]. Все это снижает производительность, повышает энергоемкость, а следовательно, и себестоимость процесса литья по выплавляемым моделям.

На основании вышесказанного для обеспечения целостности ОКФ на основе плавного кварца на практике необходимо соблюдать оптимальный температурный режим перед операцией выплавления модельного состава [28]:

$$\Delta t = (t_{\text{ф1}} - t_{\text{ф2}}) \sim 10 \div 15, \quad (5)$$

где  $\Delta t$  — требуемая величина охлаждения системы «выплавляемая модель — огнеупорная керамическая форма» относительно текущей температуры, °C;  $t_{\text{ф1}}$  и  $t_{\text{ф2}}$  — текущая и требуемая температуры ОКФ, °C.

## Выводы

На основании выполненных исследований установлено следующее.

1. Изменение линейных размеров образцов наблюдается в течение длительного времени после затвердевания модельных составов (до 24 ч). Ненаполненные МС марок Romocast 105, 152, МВС 3-Т и ПС 50-50 характеризуются максимальной величиной свободной линейной усадки.

2. При варьировании температуры в диапазоне  $-5 \dots +35$  °C изменение длин образцов из ненаполненных модельных составов происходит в интервале  $\Delta L = +0,3 \dots -0,4$  %, для наполненных  $+0,2 \dots -0,15$  %. Охлаждение образцов из ненаполненных составов до  $-5$  °C и последующий нагрев до  $20$  °C обуславливают уменьшение их исходной длины в среднем на  $0,2$  мм. Нагрев до  $35$  °C и последующее охлаждение до  $20$  °C вызывают увеличение исходного размера в среднем на  $0,2 \dots 0,3$  мм. В таких же условиях для образцов из наполненных МС изменение длин в сторону как уменьшения, так и увеличения составляет не более  $0,1$  мм. Установленные факты свидетельствуют о большей размерной стабильности образцов из наполненных модельных составов.

3. Для устранения растрескивания огнеупорных керамических форм целесообразно производить охлаждение системы «выплавляемая модель — огнеупорная керамическая форма» на  $10 \dots 15$  °C относительно температуры окружающей среды, что обеспечивает гарантированный зазор  $0,12 \dots 0,14$  мм в системе и нивелирует негативное влияние расширяющегося модельного состава.

*Работа выполнена при финансовой поддержке из средств Министерства высшего образования и науки РФ, выделяемых на программу развития СамГТУ в качестве опорного вуза.*

## Литература/References

1. Chen Q., Li H., Shen H. Transient modeling of grain structure and macrosegregation during direct chill casting of Al—Cu alloy. *Processes*. 2019. Vol. 7. No. 6. P. 1—16.

2. Deev V.B., Degtyar V.A., Kutsenko A.I., Selyanin I.F., Voitkov A.P. Resource-saving technology for the production of cast aluminum alloys. *Steel in Trans.* 2007. Vol. 37. No. 12. P. 991—994.
3. Kumar Nayak R., Venugopal S. Prediction of shrinkage allowance for tool design of aluminium alloy (A356) investment casting. *Mater. Today: Proc.* 2018. Vol. 5. No. 11. P. 24997—25005.
4. Sabau A.S., Viswanathan S. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting. *Mater. Sci. Eng. A*. 2003. Vol. 362. No. 1-2. P. 125—134.
5. Деев В.Б., Пономарева К.В., Приходько О.Г., Сметанюк С.В. Влияние температур перегрева и заливки расплава на качество отливок из алюминиевых сплавов при литье по газифицируемым моделям. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2017. No. 3. С. 65—71. Deev V.D., Ponomareva K.V., Prikhodko O.G., Smetanyuk S.V. Influence of temperatures of melt overheating and pouring on the quality of aluminum alloylost foam castings. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. No. 4. P. 373—377.
6. Деев В.Б., Пономарева К.В., Куценко А.И., Приходько О.Г., Сметанюк С.В. Влияние условий плавки алюминиевых сплавов на свойства и качество отливок, полученных по газифицируемым моделям. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2017. No. 4. С. 39—45. Deev V.D., Ponomareva K.V., Kutsenko A.I., Prikhodko O.G., Smetanyuk S.V. Influence of melting conditions of aluminum alloys on the properties and quality of castings obtained by lost foam casting. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. No. 5. P. 470—474.
7. Ефимов В.А. Специальные способы литья: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. Efimov V.A. Special methods of casting: Handbook. Moscow: Mashinostroyeniye, 1991 (In Russ.).
8. Pattnaik S., Karunakar D.B., Jha P.K. Developments in investment casting process: Review. *J. Mater. Process. Technol.* 2012. No. 212. P. 2332—2348.
9. Singh R., Singh S., Hashmi M.S.J. Investment casting. *Ref. Modul. in Mater. Sci. and Mater. Eng.* 2016. P. 1—18.
10. Barnett S.O. Investment casting — the multi-process technology. *Foundry Trade J.* 1988. No. 11. P. 33—37.
11. Иванов В.Н. Литье по выплавляемым моделям: 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. Ivanov V.N. Investment casting. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984 (In Russ.).
12. Репях С.И. Требования к модельным составам отливок ответственного назначения. *Металлы и литье Украины*. 2010. No. 11. С. 10—16. Repyakh S.I. Requirements for modeling composition of

- castings for critical applications. *Metally i lit'e Ukrainy*. 2010. No. 11. P. 10—16 (In Russ.).
13. Herman A., Česal M., Mikeš P. The deformation of wax patterns and castings in investment casting technology. *Arch. Foundry Eng.* 2012. Vol. 12. No. 1. P. 37—42.
14. Tascyoglu S., Inem B., Akar N. Conversion of an investment casting sprue wax to a pattern wax by the modification of its properties. *Mater. Design*. 2004. Vol. 25. P. 499—505.
15. Пенях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. Ropyakh S.I. Technological basis of investment casting. Dnepropetrovsk: Lira, 2006 (In Russ.).
16. Adrian S. Sabau, Viswanathan Srinath. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting. *Mater. Sci. Eng. A*. 2003. Vol. 362. P. 125—134
17. Er. Charanjeetsingh Sandhu, Er. Ajay Sharma. Investigation of optimize wax pattern in the investment casting by using the different form of waxes. *J. Mechan. Civil Eng.* 2012. Vol. 3. No. 4. P. 1—6.
18. Bemblage O., Karunakar D.B. A study on the blended wax patterns in investment casting process. In: *Proc. of the World Congress on Engineering* (London, UK, July 6—8, 2011). London: WSE, 2011. Vol. I. P. 721—727.
19. Tascioglu S., Akar N. A novel alternative to the additives in investment casting pattern wax compositions. *Mater. Design*. 2003. No. 24. P. 693—698.
20. Оспенникова О.Г., Шутов А.Н., Пикулина Л.В., Душкин А.М. Модельные композиции на основе синтетических материалов для литья лопаток ГТД. *Литейное производство*. 2003. No. 1. С. 21—23. Ospennikova O.G., Shutov A.N., Pikulina L.V., Dushkin A.M. Model compositions based on synthetic materials for GTE blades casting. *Liteinoe proizvodstvo*. 2003. No. 1. P. 21—23 (In Russ.).
21. Hamed M., Farzaneh A. Optimization of dimensional deviations in wax patterns for investment casting. *J. Comput. Appl. Mech.* 2014. Vol. 45. No. 1. P. 23—28.
22. Yahaya B., Izman S., Idris M.H., Dambatta M.S. Effects of activated charcoal on physical and mechanical properties of microwave dewaxed investment casting moulds. *J. Manufact. Sci. Technol.* 2016. No. 13. P. 97—103.
23. Lee K., Blackburn S., Welch Stewart T. Adhesion tension force between mould and pattern wax in investment castings. *J. Mater. Process. Technol.* 2015. No. 225. P. 369—374.
24. Dave I.B., Kaila V.N. Optimization of ceramic shell mold materials in investment casting. *Int. J. Res. Eng. Technol.* 2014. Vol. 3. No. 10. P. 30—33.
25. Lia H., Chandrashekharaa K., Komaragiri S., Lekakhb S.N., Richards V.L. Crack prediction using nonlinear finite element analysis during pattern removal in investment casting process. *J. Mater. Process. Technol.* 2014. No. 214. P. 1418—1426.
26. Никитин К.В., Соколов А.В., Никитин В.И., Дьячков В.Н. Инновации в литье по выплавляемым моделям. Самара: СамНЦ РАН, 2017. Nikitin K.V., Sokolov A.V., Nikitin V.I., D'yachkov V.N. Innovations in investment casting. Samara: SamNTs RAN, 2017 (In Russ.).
27. Никитин К.В., Соколов А.В., Никитин В.И., Дьячков В.Н. Применение продуктов рециклинга алюминиевых шлаков в технологиях литья по выплавляемым моделям. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2018. No. 6. С. 58—71. Nikitin K.V., Sokolov A.V., Nikitin V.I., D'yachkov V.N. The use of aluminum slag recycling products in investment casting technologies. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2019. Vol. 60. No. 1. P. 41—51.
28. Дьячков В.Н., Парамонов А.М. Способ изготовления оболочковой огнеупорной формы: Пат. 2509622 (РФ). 2014. D'yachkov V.N., Paramonov A.M. A method of making a shell of refractory forms: Pat. 2509622 (RF). 2014 (In Russ.).