

положительных эффектов влияния ЛВКД на формирование структуры обеспечивает существенное (в 1,5-1,9 раза) повышение прочностных свойств стали без заметного снижения пластических (табл. 2).

Таким образом, установлено, что метод ЛВКД является эффективным способом улучшения структуры и свойств, которые трудно поддаются улучшению обычными методами изменения теплофизических параметров затвердевания при гравитационной заливке.

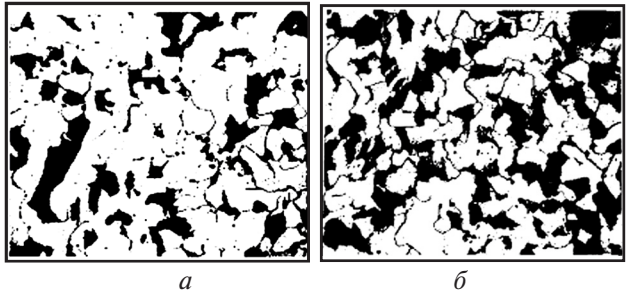


Рис. 2. Микроструктуры стали марки 15Л после нормализации: а - гравитационная заливка; б - ЛВКД, $\times 400$

Таблица 2. Механические свойства стали марки 15Л

Условия заливки	σ_b , МПа	σ_r , МПа	δ , %	Ψ , %
Гравитационная	395	188	30,0	51,7
ЛВКД	575	359	25,1	41,6
ГОСТ 977-88	400	200	24,0	35,0



Список литературы

1. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов. - М.: Машиностроение, 1998. - 360 с.
2. Таранов Е. Д., Бречко Е. Л., Буклан Б. А. Особенности затвердевания стальных отливок в условиях ЛВКД // Процессы литья. - 1995. - № 2. - С. 11-17.
3. Таранов Е. Д., Ефимов В. А., Примак И. Н. Кристаллизация и структурообразование стальных отливок под давлением // Там же. - 1997. - № 1. - С. 34-36.
4. Батышев А. И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. - М.: Metallurgy, 1977. - 152 с.

Поступила 21.01.09

УДК 621.74.04

С. И. Репях, В. Е. Хрычиков*

ООО "ИТЛ-Лассо", Днепропетровск

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

**ПОГРЕШНОСТЬ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ ОТЛИВОК
В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ**

Установлено, что размерную точность отливок особо ответственного назначения из жаропрочных никелевых сплавов в литье по выплавляемым моделям, в основном, определяют стабильность температуры воздуха в модельном отделении и отделении нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок, а также абсолютное значение коэффициента термического линейного расширения модельного состава, используемого для производства моделей отливок, и степень торможения усадки модели и отливки при охлаждении.

Встановлено, що розмірну точність виливків особливо відповідального призначення з жароміцних нікелевих сплавів в литві по моделях, що витоплюються, в основному, зумовлює стабільність температури повітря в модельному відділенні і відділенні нанесення вогнетривкого покриття на модельні блоки, а також абсолютне значення коефіцієнта термічного лінійного розширення модельного складу, що використовується для виробництва моделей виливків, і ступінь гальмування усадки моделі і вилівка при охолодженні.

Size exactness of foundings of the especially responsible setting from heat-proof nickel alloys in casting on the smelted models, mainly, predetermines stability of temperature of air in a model separation and separation of causing of heat-resistant coverage on a model block, and also absolute value of coefficient of thermal linear expansion of model composition, used for the production of models of foundings and degree of braking of pattern maker's contraction of model and founding at cooling.

Ключевые слова: отливка, форма, модель, точность, допуск, размер, коэффициент, усадка, расширитель, температура.

Постановка проблемы и состояние вопроса

Точность отливки - один из основных показателей ее качества, который регламентируется соответствующими государственными и отраслевыми стандартами (ГОСТ 26645-85, ОСТы 1.02571-86, 1.41793-78, 1.41154-86 и т. д.). Поэтому вопрос о точности отливок со временем не теряет своей актуальности, во-первых, из-за неуклонно возрастающих требований к качеству отливок, во-вторых, в связи с использованием в производстве отливок новых материалов и технологий, в-третьих, из-за необходимости обеспечения высокого уровня конкурентоспособности литых деталей.

Вопросам точности отливок посвящено большое количество работ [1-11 и др.]. Тем не менее, в области получения отливок особо ответственного назначения из жаропрочных никелевых сплавов, изготавливаемых методом литья по выплавляемым моделям, недостаточно полно исследованы закономерности формирования точности отливок, отсутствует надежная методика прогнозирования точности отливок, не четко определены основные факторы, определяющие точность отливок и, в частности, их размерную точность.

Постановка задачи исследования

Задача исследований - выявить наиболее значимые параметры технологии производства отливок особо ответственного назначения из жаропрочных никелевых сплавов, изготавливаемых методом литья по выплавляемым моделям, предопределяющие размерную точность отливок.

Основные результаты исследований

Для определения наиболее значимых параметров технологии изготовления отливок методом литья по выплавляемым моделям, предопределяющих размерную точность отливок, использовали формулу [1, 2]

$$\Delta_i = \Delta_M - \Delta_{КО} + \Delta_o, \quad (1)$$

где Δ_i - припуск на i -й размер рабочей полости пресс-формы; Δ_M - линейная усадка модели отливки по i -му размеру отливки; $\Delta_{КО}$ - линейное расширение керамической оболочки (КО) к моменту ее заливки металлом по i -му размеру отливки; Δ_o - линейная усадка сплава отливки по ее i -му размеру.

Расчет величин усадок и расширений проводили по следующим формулам:

$$\Delta_M = l_{пф} \cdot k_M \cdot [k_y \cdot (t_3 - t_p) + (t_p - t_b)]; \quad (2)$$

$$\Delta_{КО} = k_{КО} \cdot (t - 20) \cdot (l_{пф} - \Delta_M); \quad (3)$$

$$\Delta_o = k_c \cdot (t_y - 20) \cdot (l_{пф} - \Delta_{КО} + \Delta_M) \cdot k_{y_o}, \quad (4)$$

где $l_{пф}$ - размер рабочей полости в пресс-форме по ее i -му размеру, м; t_3 , t_p и t_b - температура модельного состава при запрессовке в пресс-форму, температура модели при извлечении

ее из пресс-формы и температура воздуха в отделении нанесения огнеупорного покрытия на модельные блоки соответственно, $^{\circ}\text{C}$; t – средневзвешенная температура КО в период затвердевания стенки отливки по ее i -му размеру, $^{\circ}\text{C}$; t_y – температура перехода охлаждающегося в форме сплава отливки из пластического состояния в упругое $^{\circ}\text{C}$; k_c , $k_{\text{КО}}$ и k_M – коэффициент термического линейного расширения сплава отливки по ее i -му размеру, КО и модельного состава по i -му размеру отливки соответственно, град $^{-1}$; k_y – коэффициент затрудненности усадки модели отливки по i -му размеру; k_{y_0} – коэффициент, учитывающий степень затрудненности усадки отливки по ее i -му размеру.

Для большинства используемых промышленных модельных составов и литейных сплавов значения коэффициентов k_y и k_{y_0} , как правило, могут изменяться от 1,0 до 0,85, что соответствует абсолютно свободной и затрудненной усадке модели и отливки по ее i -му размеру.

По сути, величина k_y при прочих равных условиях отражает влияние нестабильности температуры модели отливки в момент ее извлечения из пресс-формы, а величина k_{y_0} – стабильность химического и фазового составов сплава отливки, а также свойств используемой КО.

Поскольку линейная усадка затвердевающей отливки начинается в момент срастания между собой ветвей растущих дендритов, а температурный интервал кристаллизации сплавов значительно меньше температурного интервала охлаждения отливки, для расчета допустимо принять температуру t_p , равной температуре солидуса сплава отливки (t_s).

Степень влияния (φ , %) каждого из факторов (модельного состава, КО и сплава отливки) на размерную точность отливки по ее i -му элементу в условиях свободной и затрудненной усадки определяли следующим образом.

Величины максимальной (Δ_i^{max}) и минимальной (Δ_i^{min}) свободной и затрудненной усадок модели, отливки, а также величины расширения КО по i -му размеру отливки рассчитывали по следующим формулам:

$$\Delta_o^{\text{max}} = k_{y_0} \cdot k_c^{\text{max}} \cdot (t_s - 20) \cdot (l_{\text{пф}} - \Delta_{\text{КО}}^{\text{min}} + \Delta_M^{\text{max}}); \quad (5)$$

$$\Delta_o^{\text{min}} = k_{y_0} \cdot k_c^{\text{min}} \cdot (t_s - 20) \cdot (l_{\text{пф}} - \Delta_{\text{КО}}^{\text{max}} + \Delta_M^{\text{min}}); \quad (6)$$

$$\Delta_{\text{КО}}^{\text{max}} = k_{\text{КО}}^{\text{max}} \cdot (t^{\text{max}} - 20) \cdot (l_{\text{пф}} - \Delta_M^{\text{min}}); \quad (7)$$

$$\Delta_{\text{КО}}^{\text{min}} = k_{\text{КО}}^{\text{min}} \cdot (t^{\text{min}} - 20) \cdot (l_{\text{пф}} - \Delta_M^{\text{max}}); \quad (8)$$

$$\Delta_M^{\text{max}} = l_{\text{пф}} \cdot k_M^{\text{max}} \cdot [k_y^{\text{max}} \cdot (t_3^{\text{max}} - t_p^{\text{min}}) + (t_p^{\text{min}} - t_B^{\text{min}})]; \quad (9)$$

$$\Delta_M^{\text{min}} = l_{\text{пф}} \cdot k_M^{\text{min}} \cdot [k_y^{\text{min}} \cdot (t_3^{\text{min}} - t_p^{\text{max}}) + (t_p^{\text{max}} - t_B^{\text{max}})], \quad (10)$$

где Δ_i^{max} , Δ_i^{min} – максимальное и минимальное изменение длины отливки по ее i -му размеру соответственно; $\Delta_{\text{КО}}^{\text{max}}$, $\Delta_{\text{КО}}^{\text{min}}$ – максимальное и минимальное изменение длины КО по i -му размеру отливки соответственно; Δ_M^{max} , Δ_M^{min} – максимальное и минимальное изменение длины модели отливки по ее i -му размеру соответственно; k_c^{max} , k_c^{min} – максимальный и минимальный коэффициенты термического линейного расширения сплава отливки по ее i -му размеру, соответственно; $k_{\text{КО}}^{\text{max}}$, $k_{\text{КО}}^{\text{min}}$ – максимальный и минимальный коэффициенты термического линейного расширения КО по i -му размеру отливки соответственно; k_M^{max} , k_M^{min} – максимальный и минимальный коэффициенты

термического линейного расширения модельного состава по i -му размеру отливки соответственно; k_y^{\max}, k_y^{\min} – максимальный и минимальный коэффициенты затрудненности усадки модели отливки по i -му размеру соответственно; t^{\max}, t^{\min} – максимальное и минимальное изменение средневзвешенной температуры КО в период затвердевания стенки отливки по ее i -му размеру соответственно; t_3^{\max}, t_3^{\min} – максимальная и минимальная температуры модельного состава при его запрессовке в пресс-форму соответственно; t_p^{\max}, t_p^{\min} – максимальная и минимальная температуры модельного состава в i -м элементе в момент извлечения модели отливки из пресс-формы соответственно; t_B^{\max}, t_B^{\min} – максимальная и минимальная температуры воздуха в отделении нанесения огнеупорного покрытия на модельные блоки соответственно

Степень влияния модельного состава на размерную точность отливки по i -му элементу рассчитывали по следующей формуле, %:

$$\Phi_M = 100 \cdot \frac{\Delta_M^{\max} - \Delta_M^{\min}}{\Delta_i}; \tag{11}$$

- степень влияния КО - по формуле, %

$$\Phi_{КО} = 100 \cdot \frac{\Delta_{КО}^{\max} - \Delta_{КО}^{\min}}{\Delta_i}; \tag{12}$$

- степень влияния сплава отливки - по формуле, %

$$\Phi_o = 100 - \Phi_M - \Phi_{КО}. \tag{13}$$

Для определения степени влияния основных параметров производства на стабильность i -го размера реальной отливки при заливке расплава в форму из тигля плавильной печи были приняты следующие пределы изменения исследуемых параметров (при величине рабочей полости пресс-формы на i -й размер, равной $l_{пф} = 0,3$ м):

– для модельного состава: $t_3 = 66-68$; $t_p = 28-32$; $t_B = 20-32$ °С; $k_M = (245-255) \cdot 10^{-6}$, $k_M = (97-103) \cdot 10^{-6}$, $k_M = (48-52) \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$;

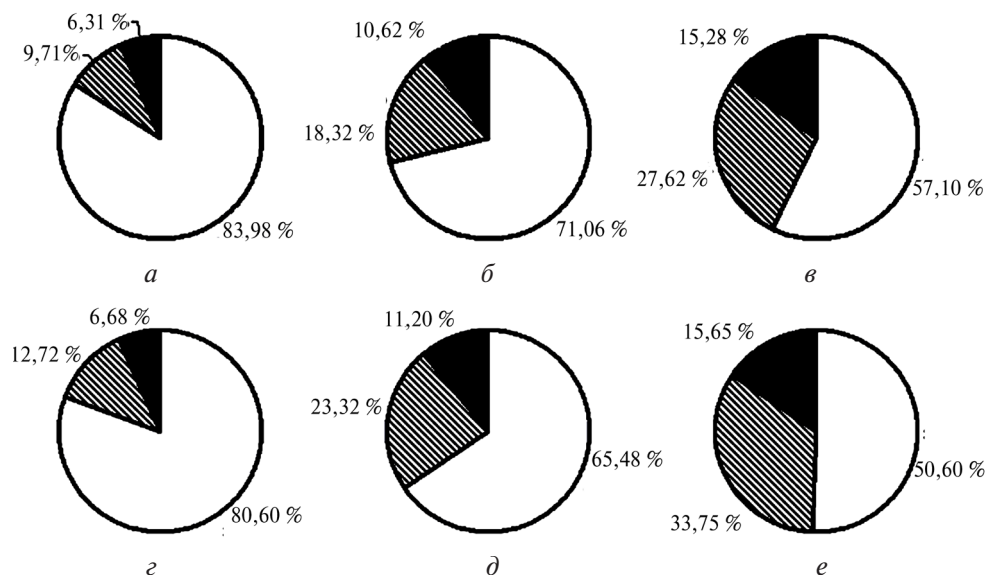


Рис. 1. Степень влияния параметров модельного состава, КО и сплава отливки на ее погрешность по i -му размеру при свободной (а-в) и затрудненной (г-е) усадках модели и отливки в случае использования модельного состава с величиной, в град $^{-1}$: а, г - $k_M=(250\pm 5) \cdot 10^{-6}$; б, д - $k_M=(100\pm 3) \cdot 10^{-6}$; в, е - $k_M=(50\pm 2) \cdot 10^{-6}$ в цахах с плохо контролируемой температурой воздуха в модельном отделении

– для КО, изготовленной на основе гидролизованного раствора этилсиликата или кремнезоля, пылевидного дистен-силлиманита и белого зернистого электрокорунда: $t = 980-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $k_{\text{КО}} = (9,8-10,2) \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$;

– для жаропрочного никелевого сплава отливки: $t_s = 1345\text{ }^{\circ}\text{C}$, $k_o = (16,2-16,4) \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.

В расчете принято: $k_y = 0,85$, $k_{y_0} = 1$ – для свободной усадки и $k_{y_0} = 0,85$ – для затрудненной усадки элемента отливки по его i -му размеру. Принятые для расчета значения температуры воздуха в отделении нанесения огнеупорного покрытия на модельные блоки соответствуют цехам с плохо управляемой температурой воздуха в течение года. Для литейных цехов с хорошо контролируемой температурой воздуха в отделении нанесения огнеупорного покрытия на модельные блоки пределы изменения t_B приняли равными $t_B^{\text{min}} = 24$ и $t_B^{\text{max}} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Результаты вычислений представлены в виде гистограмм на рис. 1 и 2, где белым цветом обозначена степень влияния на величину погрешности i -го размера отливки модельного состава, штриховкой (серым цветом) – КО, черным цветом – сплава отливки.

Анализ гистограмм, представленных на рис. 1 и 2, показывает, что при свободной и затрудненной усадках отливки по i -му размеру основным фактором, определяющим размерную точность отливки, является модельный состав. При этом с уменьшением величины коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) модельного состава, используемого для изготовления модели отливки, степень его влияния на величину отклонения размеров отливки понижается.

О значительном влиянии величины КТЛР модельного состава на величину отклонений отливок свидетельствуют и зависимости, рассчитанные с помощью формулы (1) для рабочей полости пресс-формы на i -й размер $l_{\text{нф}} = 0,3\text{ м}$ и представленные на рис. 3.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, также свидетельствует в пользу того, что абсолютная величина отклонений размеров отливок, модели и модельные блоки которых изготавливают в цехах с хорошо контролируемой температурой воздуха в модельном отделении, значительно меньше, чем у отливок, изготавливаемых в цехах с плохо контролируемой температурой воздуха в модельном отделении.

Проведенный теоретический анализ свидетельствует о том, что при прочих равных условиях размерная точность отливок особо ответственного назначения из жаропрочных никелевых сплавов, изготавливаемых методом литья по выплавляемым моделям, в основном, предопределяется размерной точностью моделей отливок. В

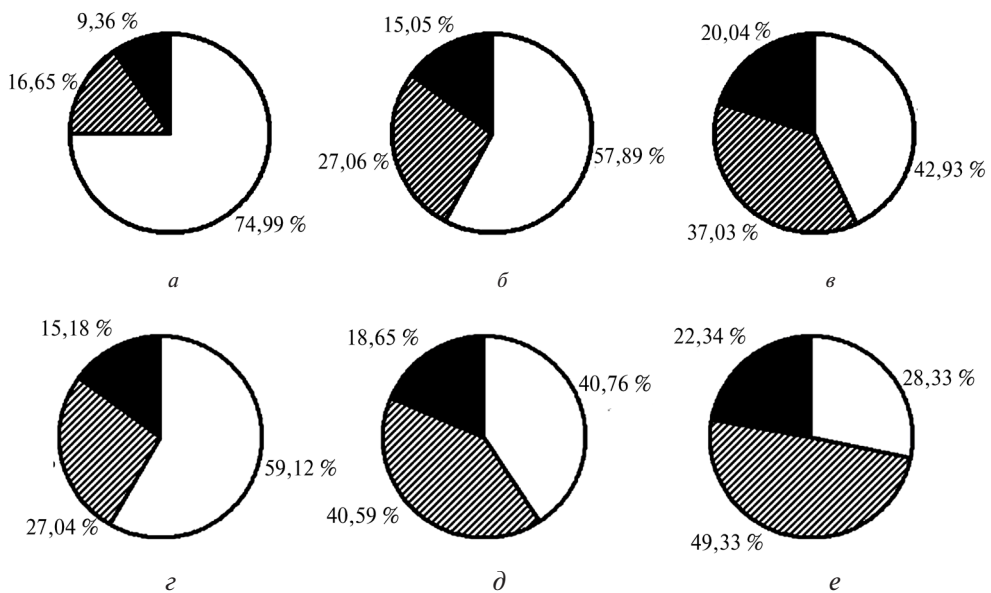


Рис. 2. Степень влияния параметров модельного состава, КО и сплава отливки на ее погрешность по i -му размеру при свободной (а-в) и затрудненной (г-е) усадках модели и отливки в случае использования модельного состава с величиной, в град⁻¹: а, г - $k_{\text{м}} = (250 \pm 5) \cdot 10^{-6}$; б, д - $k_{\text{м}} = (100 \pm 3) \cdot 10^{-6}$; в, е - $k_{\text{м}} = (50 \pm 2) \cdot 10^{-6}$ в цехах с хорошо контролируемой температурой воздуха в модельном отделении

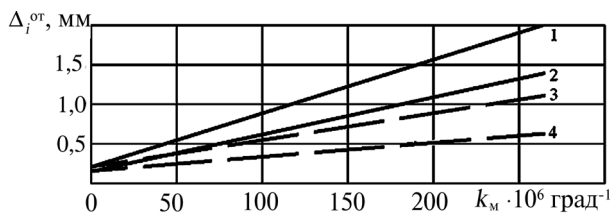


Рис. 3. Зависимость абсолютной величины интервала отклонений i -го размера отливки ($\Delta_i^{от}$) от КТЛП модельного состава при свободной (1, 3) и затрудненной (2, 4) усадках модели и отливки в цехах с плохо (1, 2) и хорошо (3, 4) контролируемой температурой воздуха в модельном отделении в течение года

значений большое влияние оказывают коэффициент термического линейного расширения модельного состава, температура воздуха в модельном отделении и отделении нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок, степень торможения усадки модели и отливки при охлаждении.

- Чем ниже величина коэффициента термического линейного расширения модельного состава и стабильнее температура воздуха в отделении нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок, тем стабильнее размеры отливок и меньше величины отклонений их размеров от их номинальных величин.

- Для повышения и стабилизации размерной точности отливок в литье по выплавляемым моделям модели отливок следует изготавливать из модельных составов с коэффициентом термического линейного расширения, равным или близким к нулю.

свою очередь, размерная точность моделей отливок в основном зависит от изменения температуры воздуха в модельном отделении (t_b), коэффициента термического линейного расширения используемого модельного состава (k_m) и степени торможения усадки модели по ее i -му размеру.

Выводы

- На величину отклонения размеров отливки от их номинальных



Список литературы

1. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. - Днепропетровск: Лира, 2006. - 1056 с.
2. Репях С. И., Котяхов Л. А., Педаш А. А. Формирование точности турбинных лопаток // Литье Украины. - 2004. - № 1. - С. 4-13; № 2. - С. 5-14.
3. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. - М.: МИСИС, 2001. - 632 с.
4. Волкомич А. А., Трухов А. П., Сорокин Ю. А. Формирование точности отливок: Учебное пособие. - М.: АО "Литаформ", 1996. - 82 с.
5. Производство высокотемпературных литых лопаток авиационных ГТД / Под ред. С. И. Яцыка. - М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.
6. Леушин И. О. Автоматизированное проектирование металлической литейной оснастки на ПЭВМ. - М.: Металлургия, 1994. - 94 с.
7. Рыбкин В. А., Голенков Ю. В. Расчет на ЭВМ размеров пресс-форм // Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям. - М.: МДНТП, 1989. - С. 17-22.
8. Косицын. Е. М. Повышение точности размеров выплавляемых моделей // Там же. - М.: МДНТП 1986. - С. 53-57.
9. Рыбкин В. А. Повышение точности отливок и эффективность процесса литья по выплавляемым моделям // Там же. - М.: МДНТП, 1986. - С. 58-61.
10. Марков Н. М. Исследование влияния шероховатости поверхности турбинных лопаток (к вопросу о требованиях к чистоте поверхности турбинных лопаток при их изготовлении) // Изв. вузов. Энергетика. -1960. - № 5. - С. 108-117.
11. Марков Н. М. Теоретическое обоснование выбора допустимой шероховатости поверхности турбинных лопаток при их изготовлении // Энергомашиностроение. - 1959. - № 7. - С. 18-22.
12. Репях С. И. О размерах рабочих полостей пресс-форм в литье по выплавляемым моделям // Литье Украины. - 2007. - № 12. - С. 6-8.

Поступила 25.09.2008