

УДК 621.74

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА И МАТЕРИАЛА ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ НА СКОРОСТЬ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК*

*Приходько О.Г.¹, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества
и инноваций (prihodko_og@rambler.ru)*

*Деев В.Б.², д.т.н., ведущий эксперт кафедры обработки металлов
давлением (deev.vb@mail.ru)*

*Прусов Е.С.³, к.т.н., доцент кафедры технологии функциональных и конструкционных
материалов (eprusov@mail.ru)*

*Куценко А.И.¹, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества
и инноваций (aik_mail@mail.ru)*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4)

³ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых
(600000, Россия, Владимир, ул. Горького, 87)

Аннотация. Получение отливок заданного качества является основной задачей литейного производства. Одним из этапов технологии литья является затвердевание расплава в форме. При изучении процесса затвердевания отливок необходимо максимально полно учитывать все особенности теплообмена между отливкой и формой. Рассмотрено влияние различных теплофизических параметров сплава и материала литейной формы на формирование отливки. При анализе использованы оригинальные математические модели для расчета коэффициента и времени полного затвердевания отливок в песчано-глинистой и металлической формах, которые учитывают геометрические параметры отливки, основные теплофизические параметры металла отливки и материала формы, условия теплообмена на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма и на поверхности формы. Проведен анализ зависимости времени и скорости затвердевания отливок от теплофизических параметров: теплоемкости, плотности, теплопроводности материала отливки и формы, удельной теплоты кристаллизации металла. Аккумулирующая способность и процесс аккумуляции тепла достаточно полно характеризуются значением коэффициента аккумуляции тепла. Коэффициент теплоаккумуляции практически определяет интенсивность потери тепла отливкой, что играет решающую роль в процессе формирования ее свойств. Поэтому этот параметр выбран для комплексного анализа характера тепловых процессов, протекающих в отливке и форме. Рассмотрено влияние толщины и коэффициента теплопроводности слоя кокильной краски на затвердевание отливок в металлических формах. Представлены основные расчетные формулы и исходные данные, используемые для расчета. Вычисления проведены для отливок типа бесконечная плита, бесконечный цилиндр, шар. Результаты проведенного моделирования параметров процесса затвердевания приведены в графическом виде. На примере различных сплавов расчетным путем показано, что при изменении состава и свойств материала формы можно изменять время и скорость затвердевания сплавов в широком диапазоне. При этом происходит управление процессами формирования структуры и свойств отливок.

Ключевые слова: отливка, время затвердевания, коэффициент затвердевания, условия теплообмена, коэффициент теплоаккумуляции, песчано-глинистая форма.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-327-334

ВВЕДЕНИЕ

Процессы затвердевания играют ключевую роль в формировании литой структуры и механических свойств изделий [1]. При этом важной технологической характеристикой является скорость затвердевания отливок и слитков. Очевидно, что скорость затвердевания напрямую определяет дисперсность дендритной структуры литых заготовок, а также существенно влияет на распре-

деление и морфологические характеристики различных фазовых составляющих [2 – 5]. Известно, что увеличение скорости затвердевания (или сокращение времени полного затвердевания) уменьшает расстояние между осями вторичных дендритов и количество вторичных фаз между ними [6 – 8]. Варьирование скорости затвердевания также позволяет управлять степенью дендритной сегрегации растворенных легирующих элементов [9].

Для понимания особенностей затвердевания отливок и слитков в различных условиях большое значение имеют исследования тепловых процессов [10]. Обще-

* Исследования проводили в рамках Российского научного фонда (проект № 19-79-30025).

принято, что для учета значимых факторов математическое моделирование затвердевания отливок должно предусматривать моделирование макропроцессов теплопередачи при затвердевании [11 – 13] и моделирование микропроцессов – кинетики затвердевания [14, 15]. Подобный подход позволяет с достаточной точностью прогнозировать усадочные процессы, в том числе формирование различных литейных дефектов, а также особенности макро- и микроструктуры получаемых отливок и, как следствие, уровень их механических свойств [16]. Однако во многих случаях для решения уравнений, лежащих в основе тех или иных математических моделей, требуются различные упрощающие допущения. В результате полученные решения, несмотря на их несомненную теоретическую значимость, зачастую не представляют существенной практической ценности.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК

В настоящей работе представлена расчетная оценка влияния теплоаккумулирующей способности материалов литейной формы и отливки на скорость затвердевания с использованием разработанной математической модели, учитывающей основные теплофизические параметры металла отливки и материала формы, условия теплообмена на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма и на поверхности формы.

Время полного затвердевания отливок в песчано-глинистой форме можно определить по следующей формуле [17]:

$$\tau = A_1 \varepsilon + A_2 \varepsilon^2 + A_3 \varepsilon^3 + A_4 \varepsilon^4, \quad (1)$$

где τ – время полного затвердевания отливки в песчано-глинистой форме, с; ε – толщина затвердевшей корочки, м; A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты, определяемые по выражениям, приведенным ниже:

– для отливки типа «бесконечная плита»

$$\begin{aligned} A_1 &= Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}; \\ A_2 &= \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right), \text{ с/м}^2; A_3 = 0; A_4 = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

– для отливки типа «бесконечный цилиндр»

$$\begin{aligned} A_1 &= Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}; \\ A_2 &= \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right) - \frac{Bb}{2R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}^2; \\ A_3 &= \frac{Bb}{3R} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right); A_4 = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

– для отливки типа «шар»

$$\begin{aligned} A_1 &= Bb \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}; \\ A_2 &= \frac{Bb}{2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_\phi} \right) - \frac{Bb}{R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ с/м}^2; \\ A_3 &= \frac{Bb}{3R} \left[\frac{1}{R} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - 2 \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right) \right]; \\ A_4 &= \frac{Bb}{4R^2} \left(\frac{1}{\lambda_m} + \frac{b}{\lambda_\phi} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где B – коэффициент, Дж/(м³·К); b – безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз для бесконечной плиты толщина δ_ϕ прогретого слоя формы больше толщины ε затвердевшей корочки металла; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи на фронте кристаллизации, на границе отливка – форма, Вт/(м²·К); λ_ϕ и λ_m – коэффициент теплопроводности формы и металла, Вт/(м·К); $R = V_0/F_0$ – приведенный размер отливки (введение приведенного размера отливки приводит задачу затвердевания отливки к одномерному варианту); V_0 и F_0 – объем и площадь поверхности отливки.

Безразмерный коэффициент можно определить по следующему уравнению:

$$b = \frac{L_{кр} \rho_m + c_m \rho_m (T_3 - \bar{T}_m)}{c_\phi \rho_\phi (\bar{T}_\phi - T_\phi^0)}, \quad (5)$$

где $L_{кр}$ – теплота кристаллизации металла, Дж/кг; ρ_m и ρ_ϕ – плотность сплава и формовочной смеси, кг/м³; c_m и c_ϕ – теплоемкость сплава и формовочной смеси, Дж/(кг·К); T_3 – температура заливки сплава, К; \bar{T}_m и \bar{T}_ϕ – средние значения температур затвердевшей корочки и прогретого слоя формы, К; T_ϕ^0 – начальная температура формы, К.

Коэффициент B определяют по выражению

$$B = c_\phi \rho_\phi \frac{\bar{T}_\phi - T_\phi^0}{T_3 - T_\phi^0}. \quad (6)$$

Коэффициенты теплоаккумуляции формы и металла (b_ϕ, b_m , Вт·с^{0,5}/(м²·К)) определяются по формулам

$$b_\phi = \sqrt{c_\phi \rho_\phi \lambda_\phi}; b_m = \sqrt{c_m \rho_m \lambda_m}. \quad (7)$$

Преобразуя уравнение (1), можно получить выражение для определения толщины затвердевшей корочки при кристаллизации отливок:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{A_1}{\varepsilon} + A_2 + A_3 \varepsilon + A_4 \varepsilon^2 \right)^{-1}} \sqrt{\tau}. \quad (8)$$

Формула (8) эквивалентна закону квадратного корня уравнения (1). Из этого следует, что значение константы затвердевания можно определить по выражению

$$K = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_1}{\varepsilon} + A_2 + A_3\varepsilon + A_4\varepsilon^2\right)}}. \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение для определения времени полного затвердевания отливок в металлических формах имеет вид [18]:

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \frac{F_{пов}}{F_o}(T_{пов} - T_{окр})} \frac{F_{кр}}{F_o} d\varepsilon; \quad (10)$$

– для отливки типа «бесконечная плита»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \frac{F_{пов}}{F_o}(T_{пов} - T_{окр})} d\varepsilon; \quad (11)$$

– для отливки типа «бесконечный цилиндр»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_{\phi}}{R}\right)(T_{пов} - T_{окр})} \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right) d\varepsilon; \quad (12)$$

– для отливки типа «шар»

$$d\tau = \frac{b'c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}{K_T(T_3 - T_{окр}) - \alpha_3 \left(1 + \frac{x_{\phi}}{R}\right)(T_{пов} - T_{окр})} \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{R}\right)^2 d\varepsilon, \quad (13)$$

где \bar{T}_K^{τ} – средняя калориметрическая температура системы отливка – кокиль, К; $T_{пов}$ и $T_{окр}$ – температуры наружной поверхности кокиля и окружающей среды, К; α_3 – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности кокиля в окружающую среду, Вт/(м²·К); x_{ϕ} – толщина стенки кокиля, м; K_T – коэффициент теплопередачи для плоской многослойной стенки, Вт/(м²·К); $L_{кр}$ – теплота кристаллизации сплава, кДж/кг; b' – коэффициент, определяемый по формуле

$$b' = \frac{L_{кр}\rho_M + c_M\rho_M(T_3 - \bar{T}_K^{\tau})}{c_{\phi}\rho_{\phi}(\bar{T}_K^{\tau} - T_{\phi}^o)}. \quad (14)$$

Увеличение теплоемкости и плотности металла приводит к увеличению времени полного затвердевания отливки и снижению коэффициента затвердевания. Увеличение плотности, теплоемкости и теплопроводности формовочной смеси приводит к уменьшению времени полного затвердевания и повышению коэффициента затвердевания отливки, что соответствует данным работы [19]. Изменение коэффициента теплопроводности металла приводит к незначительному изменению времени затвердевания, так как при литье в песчаную форму определяющую роль играет коэффициент теплопроводности формовочной смеси.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЛИТОЙ ФОРМЫ И ОТЛИВКИ НА СКОРОСТЬ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

На рис. 1 представлены зависимости времени полного затвердевания (кривая 1) и коэффициента затвердевания (кривая 2) для цилиндрической отливки из алюминиевого сплава с приведенным размером 7,5 мм от коэффициента теплоаккумуляции формы.

При проведении расчетов коэффициент b_{ϕ} теплоаккумуляции формы меняли в пределах от 900 Вт·с^{0,5}/(м²·К) (асбест многослойный [19]) до 14 000 Вт·с^{0,5}/(м²·К) (чугунный кокиль [20]). Характер кривой 1 (рис. 1) аналогичен экспериментальной кривой, полученной в работе [19]. При увеличении коэффициента тепловой аккумуляции формы от 900 до 1100 Вт·с^{0,5}/(м²·К) время полного затвердевания уменьшается примерно на 100 с, а скорость затвердевания увеличивается.

На рис. 2 представлены зависимости времени (кривая 1) и коэффициента затвердевания (кривая 2) для цилиндрической отливки с приведенным размером

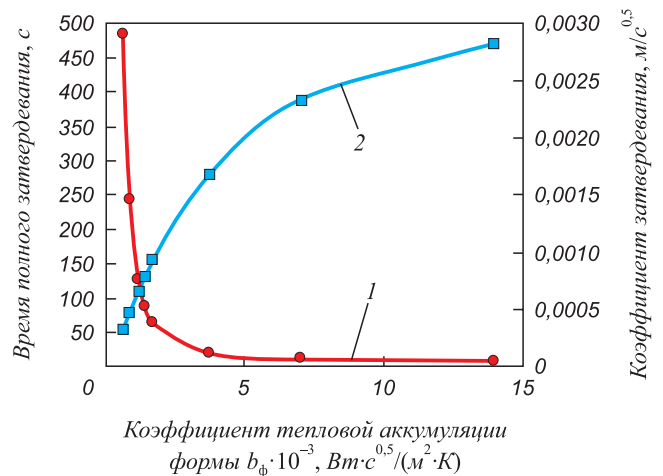


Рис. 1. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливки из алюминиевого сплава от коэффициента тепловой аккумуляции формы

Fig. 1. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of casting from an aluminum alloy on coefficient of thermal storage of the form

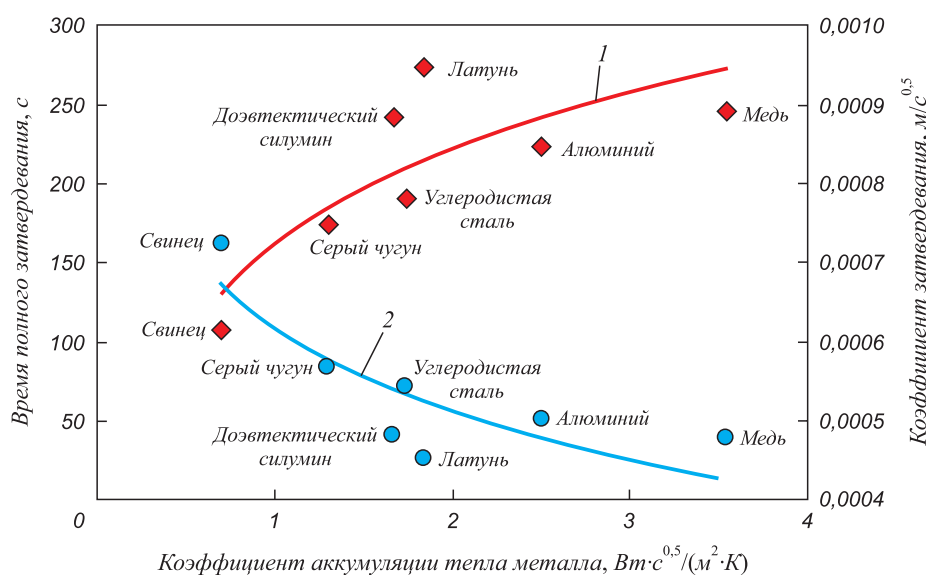


Рис. 2. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливки от коэффициента тепловой аккумуляции металла

Fig. 2. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of the casting on coefficient of thermal storage of the metal

7,5 мм, затвердевающей в песчано-глинистой форме при $b_{\phi} = 950 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{0.5}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, от коэффициента b_m тепловой аккумуляции металла, рассчитанные по разработанной математической модели. Усредненные теплофизические характеристики сплавов, использованные для расчета, представлены в таблице.

Можно сделать вывод, что прямой зависимости между временем, коэффициентом затвердевания и коэффициентом аккумуляции тепла нет, но заметна тенденция к увеличению времени полного затвердевания и, следовательно, к уменьшению коэффициента затвердевания при увеличении коэффициента b_m аккумуляции тепла металлом.

Для определения степени влияния теплоты кристаллизации металла, выделяющейся при затвердевании отливок, на время и скорость процесса затвердевания была проведена серия расчетов по разработанной математической модели, при этом значения теплоты кри-

сталлизации варьировали в следующих пределах: для алюминия – от 370 до 410 кДж/кг; для доэвтектического силумина – от 170 до 370 кДж/кг; для меди – от 190 до 230 кДж/кг; для серого чугуна – от 180 до 220 кДж/кг; для углеродистой стали – от 220 до 280 кДж/кг (другие данные для расчета взяты из таблицы). Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Таким образом, время полного затвердевания растет при увеличении теплоты кристаллизации сплава. Например, при затвердевании отливки из доэвтектического силумина в песчано-глинистой форме (рис. 3, кривая 1 – доэвтектический силумин) время полного затвердевания при увеличении теплоты кристаллизации от 170 до 370 кДж/кг увеличивается в 2,7 раза.

На скорость затвердевания отливок в металлических формах большое влияние оказывает краска, наносимая на рабочую поверхность формы. Краска обладает большим термическим сопротивлением по сравнению

Теплофизические характеристики сплавов

Thermophysical characteristics of the alloys

Материал	ρ_m , кг/м ³	c_m , Дж/(кг·К)	λ_m , Вт/(м·К)	b_m , Вт·с ^{0.5} /(м ² ·К)	$L_{кр}$, кДж/кг	$T_{кр}$, К	Перегрев, К
Свинец	11 300	130	33,5	7015	26,5	600	100
Алюминий	2700	1090	213,0	25 037	390,0	933	100
Серый чугун	7200	560	42,0	13 013	215,0	1470	100
Довзвтектический силумин	2500	1080	104,0	16 757	365,0	840	100
Медь	8920	440	320,0	35 439	214,0	1356	100
Углеродистая сталь	7500	750	54,0	17 428	259,0	1740	100
Латунь	8600	390	101,0	18 405	221,0	1305	100

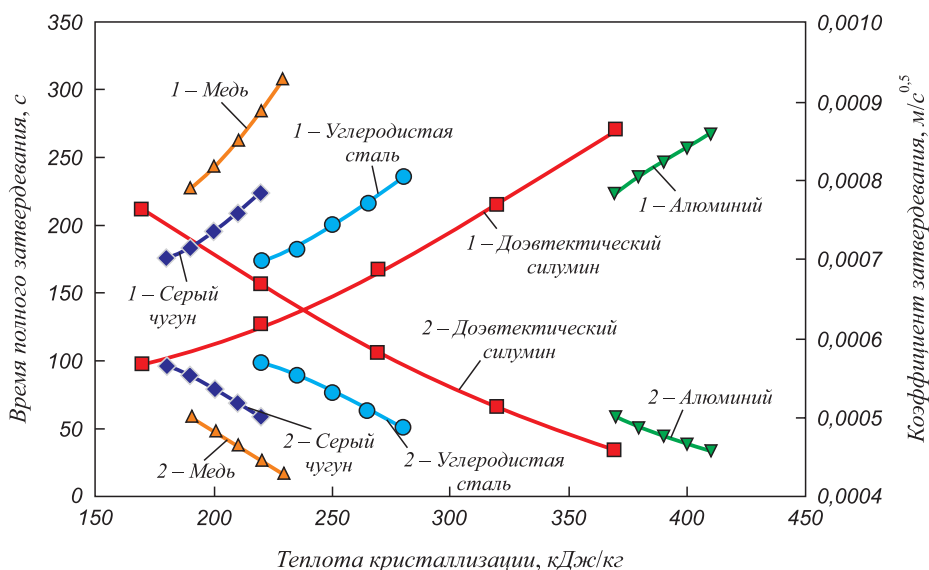


Рис. 3. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания отливки (2) в песчаной форме от удельной теплоты кристаллизации металла

Fig. 3. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification of the casting (2) in sand mold on specific heat of metal crystallization

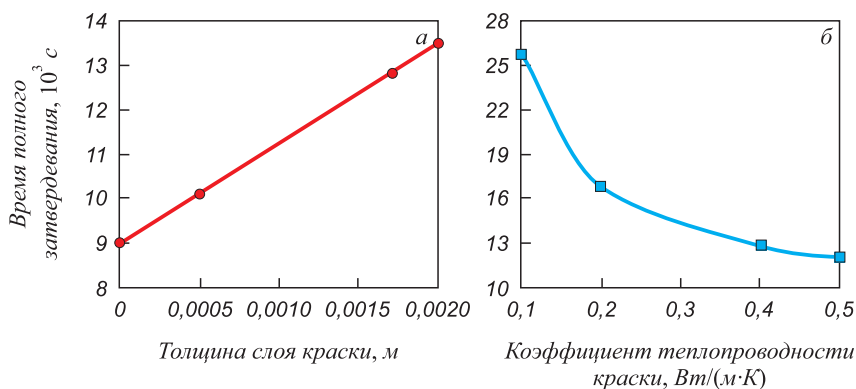


Рис. 4. Зависимость времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки в чугунном кокиле от толщины слоя краски (а) и коэффициента теплопроводности краски (б)

Fig. 4. Dependence of the time of complete solidification of cylindrical cast iron casting in cast iron chill mold on thickness of the paint layer (a) and thermal conductivity of paint (b)

с металлом формы, поэтому изменение толщины и теплофизических характеристик слоя краски приводит к значительному изменению скорости затвердевания отливок в кокиле. На рис. 4, а представлено изменение времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки диам. 1,16 м в чугунном кокиле в зависимости от толщины слоя краски. Изменение толщины слоя краски от 0 до 2 мм приводит к увеличению времени полного затвердевания в 1,5 раза.

На рис. 4, б представлено изменение времени полного затвердевания цилиндрической чугунной отливки диам. 1,16 м в чугунном кокиле от коэффициента теплопроводности краски. При увеличении коэффициента теплопроводности краски от 0,1 до 0,5 Вт/(м·К) время полного затвердевания уменьшается в два раза. Очевидно, что путем варьирования толщины и состава ко-

кильной краски можно влиять на время и скорость затвердевания отливки.

Разработанная математическая модель содержит теплофизические параметры материала формы и отливки, значения которых являются функциями температуры и их точные значения зачастую неизвестны или приводятся в справочниках в виде диапазона значений. Для оценки влияния теплоемкости, теплопроводности и плотности материалов отливки и формы, удельной теплоты кристаллизации на результат определения времени и коэффициента затвердевания по предлагаемой модели была проведена серия расчетов. Характер влияния теплофизических характеристик материала отливки и кокиля на течение процесса затвердевания отливки в металлической форме оказался таким же, как и для песчано-глинистой формы.

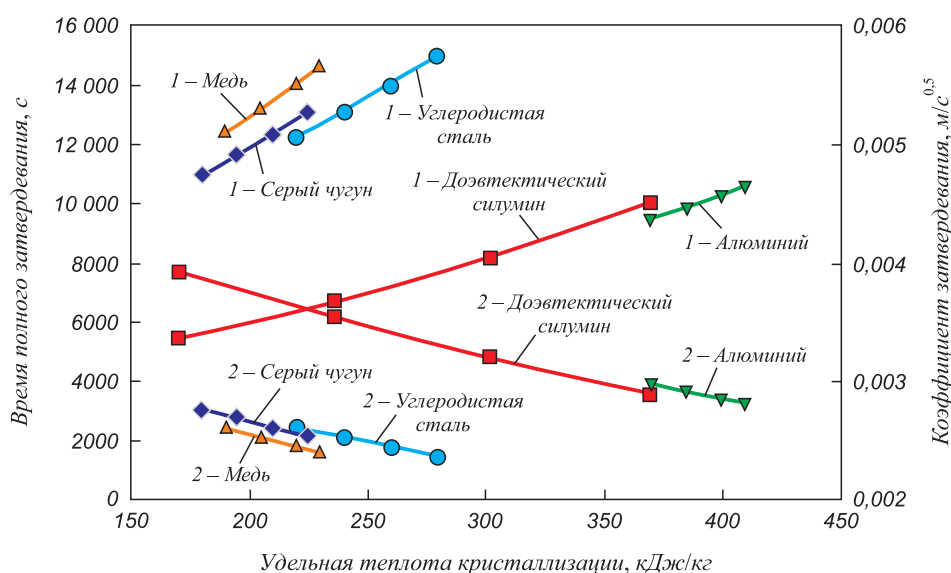


Рис. 5. Зависимость времени полного затвердевания (1) и коэффициента затвердевания (2) отливок в окрашенной металлической форме от удельной теплоты кристаллизации металла

Fig. 5. Dependence of the time of complete solidification (1) and coefficient of solidification (2) of castings in painted metal form on the specific heat of metal crystallization

Влияние теплоты кристаллизации металла, выделяющейся при затвердевании цилиндрических отливок, на время и скорость процесса представлено на рис. 5. Данные для расчета взяты из таблицы. Видно, что время полного затвердевания увеличивается при повышении удельной теплоты кристаллизации сплава, но по сравнению с неметаллической формой теплота кристаллизации оказывает меньшее влияние на скорость процесса затвердевания.

Например, для доэвтектического силумина увеличение теплоты кристаллизации от 170 до 370 кДж/кг приводит к увеличению времени полного затвердевания от 5500 до 10 000 с, то есть в 1,8 раза. Это связано с различием теплофизических характеристик материалов форм: металлическая форма быстрее отводит тепло кристаллизации, выделяющееся при нарастании твердой корочки, чем песчано-глинистая.

Выполненные вычисления показывают, что теплофизические характеристики материалов отливки и литейной формы (в частности, коэффициенты тепловой аккумуляции металла и формы, удельная теплота кристаллизации металла) являются важными факторами управления процессами формирования структуры получаемых литых заготовок и, как следствие, их физико-механических и эксплуатационных свойств. В частности, увеличение коэффициента тепловой аккумуляции формы во всех случаях приводит к уменьшению времени полного затвердевания отливки. Для всех рассмотренных типов сплавов и материалов литейной формы время полного затвердевания отливки растет при увеличении теплоты кристаллизации. При этом использование металлической формы при сохранении общих тенденций по изменению времени полного за-

твердевания снижает влияние теплоты кристаллизации на скорость затвердевания.

Выводы

На примере различных сплавов расчетным путем показано, что при изменении состава и свойств материала формы можно менять время и скорость затвердевания сплавов в широком диапазоне, управляя за счет этого процессами формирования структуры и свойств отливок. При этом использование формовочных смесей с низким коэффициентом тепловой аккумуляции приводит к увеличению времени полного затвердевания отливки и, соответственно, к снижению скорости затвердевания. И напротив, увеличение интенсивности теплоотвода за счет увеличения коэффициента тепловой аккумуляции формы приводит к росту скорости затвердевания отливки и формированию более мелкозернистой структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stefanescu D.M. Science and Engineering of Casting Solidification. 3rd ed. – Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – 559 p.
2. Kostyuzhev A.G., Slater C.D., Marench O.O., Davis C.L. Effect of solidification rate on microstructure evolution in dual phase microalloyed steel // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Article 35715.
3. Cai Z., Zhang C., Wang R., Peng C., Qiu K., Wang N. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al – Si alloy // Progress in Natural Science: Materials International. 2016. Vol. 26. No. 4. P. 391 – 397.
4. Xu C., Du R., Wang X., Hanada S., Yamagata H., Wang W., Ma C. Effect of cooling rate on morphology of primary particles in Al – Sc – Zr master alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 24. No. 7. P. 2420 – 2426.

5. Deev V.B., Prusov E.S., Shunqi M., Ri E.H., Bazlova T.A., Temlyantsev M.V., Smetanyuk S.V., Ponomareva S.V., Vdovin K.N. The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. No. 2. Article 022080.
6. Jabbari M., Davami P., Varahram N. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron // Materials Science and Engineering: A. 2010. Vol. 528. No. 2. P. 583 – 588.
7. Brionne G, Loucif A, Zhang CP, Lapierre-Boire LP, Jahazi M. 3D FEM simulation of the effect of cooling rate on SDAS and macrosegregation of a high strength steel // Materials Science Forum. 2018. No. 941. P. 2360 – 2364.
8. Ali M., Porter D., Kömi J., Eissa M., El Faramawy H., Mattar T. Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels // Journal of Iron and Steel Research International. 2019. No. 26. P. 1350 – 1365.
9. Jia L., Yu L., Sun W., Zhang W., Fang L., Feng Q., Guo S., Hu Z. Effect of solidification rates on microstructures and segregation of IN718 alloy // Chinese Journal of Materials Research. 2010. Vol. 24. No. 2. P. 118 – 122.
10. Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification. Taylor & Francis Group, CRS Press, 2009. – 621 p.
11. Ciesielski M., Mochnecki B. Comparison of approaches to the numerical modelling of pure metals solidification using the control volume method // International Journal of Cast Metals Research. 2019. Vol. 32. No. 4. P. 213 – 220.
12. Shahane S., Aluru N., Ferreira P., Kapoor S.G., Vanka S.P. Finite volume simulation framework for die casting with uncertainty quantification // Applied Mathematical Modelling. 2019. Vol. 74. P. 132 – 150.
13. Hirata N., Anzai K. Heat transfer and solidification analysis using adaptive resolution particle method // Materials Transactions. 2019. Vol. 60. No. 1. P. 33 – 40.
14. Wang H., Liu F., Yang G., Zhou Y. Modeling the overall solidification kinetics for undercooled single-phase solid-solution alloys. I. Model derivation // Acta Materialia. 2010. Vol. 58. No. 16. P. 5402 – 5410.
15. Zhu M., Zhang L., Zhao H., Stefanescu D.M. Modeling of microstructural evolution during divorced eutectic solidification of spherical graphite irons // Acta Materialia. 2015. Vol. 84. P. 413 – 425.
16. Wang T., Wei J., Wang X., Yao M. Progress and Application of Microstructure simulation of alloy solidification // Acta Metallurgica Sinica. 2018. Vol. 54. No. 2. P. 193 – 203.
17. Разработка методики расчета времени и коэффициента затвердевания отливок в песчано-глинистых формах / В.Б. Деев, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, А.И. Куценко, Меi Shunqi, Э.Х. Ри, С.В. Сметанюк, К.В. Пonomарева, Г.Н. Гаврилов. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2019: Труды XXI Международной научно-практической конференции, 23-24 октября 2019 г. Ч. 1.* – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 139 – 146.
18. Разработка методики расчета времени затвердевания отливок и слитков в металлической форме / В.Б. Деев, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, А.И. Куценко, Меi Shunqi, Э.Х. Ри, Т.А. Базлова, С.В. Сметанюк, А.А. Соколев. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2019: Труды XXI Международной научно-практической конференции, 23-24 октября 2019 г. Ч. 1.* – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 146 – 151.
19. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. – М.: Машгиз, 1960. – 436 с.
20. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. 1. Тепловые основы теории литья. Затвердевание и охлаждение отливки. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.

Поступила в редакцию 13 февраля 2020 г.

После доработки 17 марта 2020 г.

Принята к публикации 18 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 5, pp. 327–334.

INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF ALLOY AND MOLD MATERIAL ON CASTINGS SOLIDIFICATION RATE

O.G. Prikhod'ko¹, V.B. Deev², E.S. Prusov³, A.I. Kutsenko¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

³ Vladimir State University named after Alexandr Grigor'evich and Nikolai Grigor'evich Stoletov, Vladimir, Russia

Abstract. Obtaining castings of given quality is the main task of foundry production. One of the stages of casting technology is solidification of melt in the mold. When studying the process of castings solidification, it is necessary to fully take into account all the features of heat transfer between casting and mold. Influence of various thermophysical parameters of alloy and mold material on casting formation is considered. In the analysis, original mathematical models were used to calculate the coefficient and time of complete solidification of castings in sand-clay and metal forms. These models take into account geometric parameters of casting, main thermophysical parameters of casting metal and mold material, heat transfer conditions at crystallization front, on casting-mold boundary and on the mold surface. Analysis of dependence of time and rate of castings solidification on thermophysical parameters (heat capacity, density, heat conductivity of casting material and mold, specific heat of metal crystallization) was carried out. Storage capacity and process of heat storage are quite fully characterized by the value of heat storage coefficient. This coefficient

practically determines the rate of heat loss by the casting which plays a decisive role in its properties forming. Therefore, this parameter is selected for a comprehensive analysis of thermal processes occurring in casting and mold. The influence of thickness and thermal conductivity of chill paint layer on solidification of castings in metal molds is considered. The basic calculation formulas and initial data are presented. Calculations were carried out for castings of the following types: endless plate, endless cylinder, ball. The results of simulation of solidification process parameters are presented in graphic form. Using various alloys as an example, it has been shown by calculation that when changing composition and properties of mold material, it is possible to change time and speed of alloys solidification in a wide range. In this case, processes of forming the structure and properties of castings are controlled.

Keywords: casting, solidification time, solidification coefficient, heat transfer conditions, heat storage coefficient, sand-clay form.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-327-334

REFERENCES

1. Stefanescu D.M. *Science and Engineering of Casting Solidification*. 3rd ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2015, 559 p.
2. Kostryzhev A.G., Slater C.D., Marenych O.O., Davis C.L. Effect of solidification rate on microstructure evolution in dual phase microalloyed steel. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, article 35715.

3. Cai Z., Zhang C., Wang R., Peng C., Qiu K., Wang N. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al–Si alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2016, vol. 26, no. 4, pp. 391–397.
4. Xu C., Du R., Wang X., Hanada S., Yamagata H., Wang W., Ma C. Effect of cooling rate on morphology of primary particles in Al–Sc–Zr master alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014, vol. 24, no. 7, pp. 2420–2426.
5. Deev V.B., Prusov E.S., Shunqi M., Ri E.H., Bazlova T.A., Temyantsev M.V., Smetanyuk S.V., Ponomareva S.V., Vdovin K.N. The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 537, no. 2, article 022080.
6. Jabbari M., Davami P., Varahram N. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron. *Materials Science and Engineering: A*. 2010, vol. 528, no. 2, pp. 583–588.
7. Brionne G, Loucif A, Zhang CP, Lapierre-Boire LP, Jahazi M. 3D FEM simulation of the effect of cooling rate on SDAS and macrosegregation of a high strength steel. *Materials Science Forum*. 2018, no. 941, pp. 2360–2364.
8. Ali M., Porter D., Kömi J., Eissa M., El Faramawy H., Mattar T. Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2019, no. 26, pp. 1350–1365.
9. Jia L., Yu L., Sun W., Zhang W., Fang L., Feng Q., Guo S., Hu Z. Effect of solidification rates on microstructures and segregation of IN718 alloy. *Chinese Journal of Materials Research*. 2010, vol. 24, no. 2, pp. 118–122.
10. Dantzig J.A., Rappaz M. *Solidification*. Taylor & Francis Group, CRS Press, 2009, 621 p.
11. Ciesielski M., Mochnacki B. Comparison of approaches to the numerical modelling of pure metals solidification using the control volume method. *International Journal of Cast Metals Research*. 2019, vol. 32, no. 4, pp. 213–220.
12. Shahane S., Aluru N., Ferreira P., Kapoor S.G., Vanka S.P. Finite volume simulation framework for die casting with uncertainty quantification. *Applied Mathematical Modelling*. 2019, vol. 74, pp. 132–150.
13. Hirata N., Anzai K. Heat transfer and solidification analysis using adaptive resolution particle method. *Materials Transactions*. 2019, vol. 60, no. 1, pp. 33–40.
14. Wang H., Liu F., Yang G., Zhou Y. Modeling the overall solidification kinetics for undercooled single-phase solid-solution alloys. I. Model derivation. *Acta Materialia*. 2010, vol. 58, no. 16, pp. 5402–5410.
15. Zhu M., Zhang L., Zhao H., Stefanescu D.M. Modeling of microstructural evolution during divorced eutectic solidification of spherical graphite irons. *Acta Materialia*. 2015, vol. 84, pp. 413–425.
16. Wang T., Wei J., Wang X., Yao M. Progress and application of microstructure simulation of alloy solidification. *Acta Metallurgica Sinica*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 193–203.
17. Deev V.B., Prikhod'ko O.G., Prusov E.S., Protodopov E.V., Temyantsev M.V., Kutsenko A.I., Mei Shunqi, Ri E.Kh., Smetanyuk S.V., Ponomareva K.V., Gavrilov G.N. Development of methodology for calculating time and solidification coefficient of castings in sandy-clay forms. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Metallurgiya – 2019: Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 23-24 oktyabrya 2019 g. Ch. 1* [Metallurgy: Technology, Innovation, Quality. Metallurgy – 2019: Proceedings of the XXI Int. Sci. and Pract. Conf., October 23-24, 2019. Part 1]. Novokuznetsk: ITs SiBGIU, 2019, pp. 139–146. (In Russ.).
18. Deev V.B., Prikhod'ko O.G., Prusov E.S., Protodopov E.V., Temyantsev M.V., Kutsenko A.I., Mei Shunqi, Ri E.Kh., Bazlova T.A., Smetanyuk S.V., Sokorev A.A. Development of methodology for calculating solidification time of castings and ingots in metal form. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Metallurgiya – 2019: Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 23-24 oktyabrya 2019 g. Ch. 1* [Metallurgy: Technology, Innovation, Quality. Metallurgy – 2019: Proceedings of the XXI Int. Sci. and Pract. Conf., October 23-24, 2019. Part 1]. Novokuznetsk: ITs SiBGIU, 2019, pp. 146–151. (In Russ.).
19. Veinik A.I. *Teoriya zatverdevaniya otlivki* [Theory of casting solidification]. Moscow: Mashgiz, 1960, 436 p. (In Russ.).
20. Balandin G.F. *Osnovy teorii formirovaniya otlivki. Ch. 1. Teplovyie osnovy teorii lit'ya. Zatverdevanie i okhlazhdenie otlivki* [Fundamentals of the theory of casting formation. Part 1. Thermal foundations of casting theory. Solidification and cooling of casting]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 328 p. (In Russ.).

Funding. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-79-30025).

Information about the authors:

O.G. Prikhod'ko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Quality Management and Innovation (prikhodko_og@rambler.ru)

V.B. Deev, Dr. Sci. (Eng.), Leading Expert of the Chair of Metal Forming (deev.vb@mail.ru)

E.S. Prusov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Functional and Structural Materials Technology (eprusov@mail.ru)

A.I. Kutsenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Quality Management and Innovation (aik_mail@mail.ru)

Received February 13, 2020

Revised March 17, 2020

Accepted March 18, 2020