

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ОТЛИВКИ «ШАР» В ОБЛИЦОВАННОМ КОКИЛЕ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫБИВКИ

Пустовалов Д.О.¹, Лабутин В.Н.¹, Белова С.А.¹, Милованов Р.С.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, pustovalov.dmitrii@inbox.ru

Для получения качественных отливок мелющих тел типа «Шар» предложено применять направленную кристаллизацию, используя частично облицованные кокили. С целью получения качественной отливки определен тип кокиля; представлены температурные поля облицованного кокиля в начале заливки и в процессе охлаждения. Произведен расчет нахождения стальной отливки «Шар» в частично облицованном кокиле до температуры выбивки с использованием общепринятых в литейной науке формул, критериев А.И. Вейника, критерия Фурье, критериев Био. Проведено сравнение расчетных данных с расчетами в программном продукте ProCAST. Программное время охлаждения составило 30,86 мин. Разница расчетного значения и полученного при использовании программного продукта ProCAST, составила 5,54 мин. Это объясняется тем, что охлаждение в программном продукте рассчитывалось для отливки, затвердевающей в полностью облицованном кокиле.

Ключевые слова: отливка, кокиль, массивный кокиль, тонкостенный кокиль, температура, теплообмен, интенсивность теплообмена, критерий А.И. Вейника, облицовка, теплопроводность, температуропроводность, приведенный размер.

DETERMINATION RESIDENCE TIME OF THE CAST STEEL «BALL» IN A METAL MOLD TO A TEMPERATURE LINED KNOCKOUT

Pustovalov D.O.¹, Labutin V.N.¹, Belova S.A.¹, Milovanov R.S.¹

¹Permsky National Research Polytechnic University, Russia, 614990, Perm, Komsomolsky av., 29, pustovalov.dmitrii@inbox.ru

To obtain high-quality castings grinding bodies like "Ball" invited to directional solidification using partially lined molds. In order to obtain high-quality castings determined type of mold; shows the temperature of the field at the beginning of the lined mold filling and cooling process. The calculation of finding a cast steel "ball" in a partially lined metal mold to a temperature using conventional knockout in the foundry science formulas, criteria A. Reed, the Fourier, Biot. A comparison of the calculated data with the calculations in the software product ProCAST. Computer cooling time was 30.86 minutes. Difference between the calculated value and the value obtained using the software ProCAST, was 5.54 minutes. This is due to the fact that the cooling in the software product is calculated for the casting solidifies completely lined kokike.

Keywords: casting, gravity die casting, permanent mold a massive, walled chill, temperature, heat transfer, heat transfer rate criterion AI Reed, cladding, thermal conductivity, thermal diffusivity, given the size.

Одним из путей увеличения выпуска отливок с единицы площади цеха является улучшение использования формовочно-сборочно-заливочных площадей. В значительной мере этот вопрос связан с длительностью изготовления отливок, большая часть которых приходится на выдержку их в форме от заливки до выбивки. Особенно это относится к отливкам из легированных сталей, длительность выдержки которых может во много раз превышать продолжительность формовки и сборки.

Для получения качественных мелющих тел «Шар» необходимо обеспечить направленную кристаллизацию, для чего предложено часть кокиля, приходящуюся на половину шаров, покрыть облицовкой толщиной 10 мм. Другая половина шаров (без

облицовки) соприкасается с металлом водоохлаждаемого кокиля, выполняющего роль холодильника. Понятно, что при этом теплоотвод и, как следствие, время охлаждения будут отличаться от тех, когда охлаждение проводится в облицованном полностью или необлицованном кокилях.

Целью данной работы является расчет времени охлаждения отливок мелющих тел «Шар», изготавливаемых в частично облицованных кокилях.

Материалы

Химический состав сплава для отливки «Шар» приведен в табл. 1

Таблица 1

Химический состав исследуемого сплава, % (масс.)

Элемент	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
Содержание, %	0,77	0,65	0,4	0,2	0,06	0,2	0,05	0,05

Расчет параметров проводился по общепринятым формулам, используемым в литейном производстве.

Результаты и их обсуждение

В свете определяющей роли тепловых явлений в сложном механизме формирования отливки облицованным кокилем следует называть металлическую форму с неметаллическим рабочим слоем (облицовкой) X_2 , соизмеримой (величина одного порядка) с приведенным размером отливки X_1

$$\frac{X_2}{X_1} \approx 1 \quad (1)$$

Толщина облицовки кокиля $X_2 = 10$ мм;

Приведенный размер отливки определяется по формуле

$$X_1 = \frac{V}{F} = \frac{0,524d^3}{\pi d^2} = \frac{0,524 \cdot d}{\pi} = \frac{0,524 \cdot 100}{3,14} = 16,7 \text{ мм}$$

Тогда $\frac{X_2}{X_1} = \frac{10}{16,7} = 0,2 \approx 1$ – условие выполняется.

Прим.: Округлили до «1» в связи с тем, что это цифры одного порядка.

Рассматриваемая форма заливается в условиях естественной гравитации, соответствует определению «кокиль», данному в ГОСТ 17819.

Облицованные кокили в зависимости от толщины стенки кокиля X_3 подразделяются на 2 группы: тонкостенные и толстостенные.

К тонкостенным облицованным кокилям относят формы, которые удовлетворяют условию

$$\frac{X_3}{X_1} \approx 1 \quad (2)$$

Приведенный размер кокиля $X_3 = 70$ мм;

Тогда $\frac{X_3}{X_1} = \frac{70}{16,7} = 4,2 \approx 1$ – толщина стенки тонкостенного кокиля соизмерима с

приведенным размером отливки.

К толстостенным облицованным кокилям относят формы, которые удовлетворяют условию

$$\frac{X_3}{X_1} \gg 1 \quad (3)$$

Условимся, что тепловые расчеты будем вести для тонкостенного облицованного кокиля, принудительно охлаждаемого водой.

Каждое решение задачи теплообмена в системе «отливка–форма» пригодно для анализа процесса формирования отливки в определенных литейных формах.

Для оценки существенных в термическом отношении факторов, Вейником А.И. предложены 2 метода. Первый основан на анализе интенсивности теплообмена между отливкой и формой, второй – на анализе относительной теплоаккумулирующей способности отливки и элементов (слоев) формы.

Математическим выражением интенсивности теплообмена служат критерии А.И. Вейника

$$We_1 = \frac{\beta X_1}{\lambda_1} \quad We_2 = \frac{\beta X_3}{\lambda_3} \quad (4, 5)$$

где β – коэффициент теплопередачи через слой формы, непосредственно примыкающей к отливке; λ_1 и λ_3 – коэффициенты теплопроводности материалов отливки и кокиля соответственно.

Математическим выражением относительной теплоаккумулирующей способности отливки и формы являются параметрические критерии (1) – (3).

Физический смысл критериев (4) и (5) – они выражают меру отношения перепада температур в отливке δT_1 и в кокиле δT_3 соответственно к температурному напору облицовки ΔT_2 .

Физический смысл критериев (1) – (3) можно определить так: они выражают относительную теплоаккумулирующую способность слоев формы.

Первые 2 критерия определяют возможность исключения из описания процесса

теплообмена перепадов температур δT_1 и δT_3 .

Критерии (1) – (3) определяют возможность исключения из описания процесса теплоаккумулирующей способности отдельных элементов формы:

$$\beta = \frac{\lambda_2}{X_2} \quad (6)$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности слоя облицовки, примыкающего непосредственно к отливке; X_2 – толщина облицовки, мм.

Подставляя выражение (6) в формулы (4) и (5), получаем

$$We_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^{-1} \quad We_2 = \frac{\lambda_2 \cdot X_3}{\lambda_3 \cdot X_1} \cdot \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^{-1} \quad (7, 8)$$

Подставляя в формулы (7) и (8) следующие данные

- для отливки $X_1 = 16,7 \text{ мм} = 0,0167 \text{ м}$ $\lambda_1 = 55 \text{ Вт/(м·К)}$
- для облицовки $X_2 = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$ $\lambda_2 = 0,68 \text{ Вт/(м·К)}$
- для кокиля $X_3 = 70 \text{ мм} = 0,07 \text{ м}$ $\lambda_3 = 42 \text{ Вт/(м·К)}$

получаем

$$We_1 = \frac{0,68}{55} \cdot \left(\frac{0,01}{0,0167} \right)^{-1} = 0,02; \quad We_2 = \frac{0,68 \cdot 0,07}{42 \cdot 0,0167} \cdot \left(\frac{0,01}{0,0167} \right)^{-1} = 0,11$$

Для облицованного кокиля получаем

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{0,68}{55} = 0,012 \ll 1; \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_3} = \frac{0,68}{42} = 0,016 \ll 1$$

Отсюда вывод: отношение толщин слоев формы к толщине стенки отливки определяет не только теплоаккумулирующую способность слоев формы, но и меру интенсивности охлаждения отливки и нагрева формы.

Облицованные кокили образуют класс форм, для которых теплоаккумулирующая способность облицовки соизмерима с теплоаккумулирующей способностью отливки. При этом отливка охлаждается, а металлическая стенка кокиля нагревается с малой интенсивностью.

Отсюда следует, что перепады температур по сечению стенки отливки δT_1 и кокиля δT_3 пренебрежимо малы по сравнению с температурным напором в облицовке ΔT_2 . Поэтому можно представить законы изменения температур отливки и кокиля в виде функций одной переменной – времени τ .

Практическое отсутствие зависимости температурных полей отливки и металлического слоя кокиля от пространственной координаты позволяет абстрагироваться от

конкретных геометрических форм этих тел и учитывать в расчетах только их объемы и площадь поверхности охлаждения.

Возможность расчета охлаждения отливки по стадиям (отвод теплоты перегрева, затвердевания и охлаждения до температуры выбивки) позволяет преодолеть трудности, связанные с тем, что изменение температуры вызывает изменение термофизических свойств материалов отливки и формы. На каждой стадии изменение температуры существенно меньше, чем за весь процесс. Поэтому в пределах одной стадии термофизические свойства тел, участвующих в теплообмене, можно считать с известным приближением постоянными. Таким образом, эти свойства являются кусочно-постоянной функцией температуры. Поэтому процесс теплообмена в системе «отливка–облицованный кокиль» сводится к одномерной задаче теплопроводности при граничных условиях третьего рода (рис. 1), которые являются уравнениями теплового баланса на границах элементов рассматриваемой системы.

На рис. 2 представлена система «отливка – облицованный кокиль», которая была разработана с целью обеспечения направленной кристаллизации.

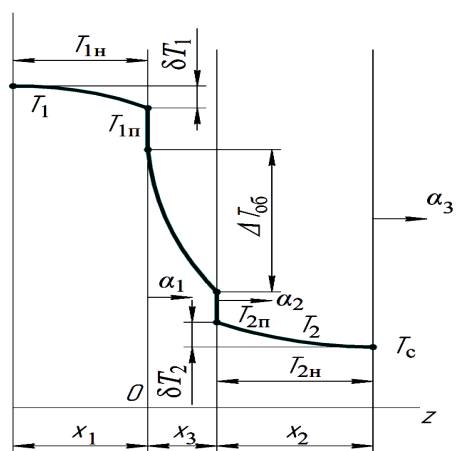


Рис. 1. Температурное поле отливки и облицованного кокиля

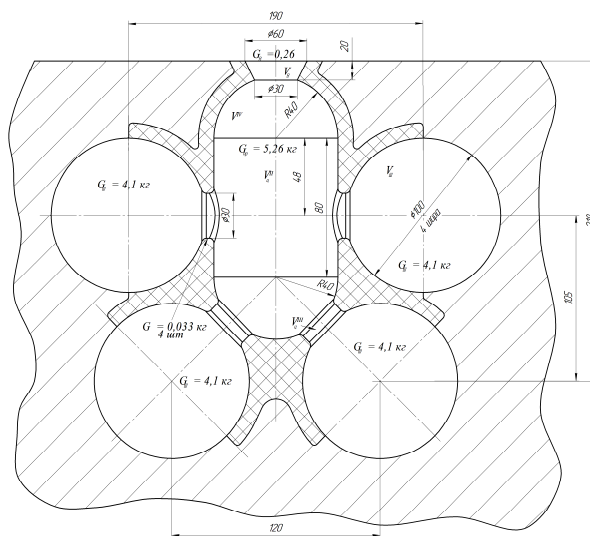


Рис. 2. Система «отливка – облицованный кокиль»

На практике часто необходимо знать не постадийный характер изменения температуры отливки и длительности каждой стадии, а общее время охлаждения отливки до температуры выбивки.

Для тепловых расчетов будем пользоваться не шаровой отливкой, а цилиндрической с приведенным радиусом $R_{\text{цил}} = 2R_{\text{шара}}$.

Следовательно, $R_{\text{цил}} \approx 33$ мм.

В тепловом отношении данные отливки обладают одинаковым временем затвердевания.

Проведем расчет времени затвердевания отливки в частично облицованном кокиле в соответствии с процессами, протекающими при заливке сплава (рис. 3).

Исходные данные для расчета:

- показатель параболы на графике распределения теплоты в теле отливки $n = 1$;
- приведенный размер отливки $R_1 = 0,033$ м;
- толщина облицовки $X_{об} = 0,01$ м;
- плотность материала облицовки $\rho_2 = 1400$ кг/м³;
- скорость заливки $u = 0,042$ м/с (рис. 3);
- температура металла перед заливкой $T_{зал} = 1853$ К;
- температуры ликвидуса и солидуса $T_{л} = 1733$ К; $T_{с} = 1638$ К;
- температура кристаллизации как среднее значение температур ликвидуса и солидуса для данного сплава $T_{кр} = 1686$ К;
- температура выбивки $T_{выб} = 1050$ К;
- температура кокиля $T_{2н} = 423$ К;
- температура окружающей среды $T_c = 293$ К;
- удельная теплоемкость жидкого сплава $C'_1 = 920$ Дж/(кг·К);
- удельная теплоемкость отливки $C_1 = 753$ Дж/(кг·К);
- удельная теплота кристаллизации $r_1 = 251000$ Дж/кг;
- удельная теплоемкость материала облицовки $C_2 = 560$ Дж/(кг·К);
- плотность твердого материала отливки $\rho_1 = 7860$ кг/м³;
- плотность жидкого материала отливки $\rho'_1 = 7400$ кг/м³;
- плотность материала кокиля $\rho_3 = 7000$ кг/м³;
- масса блока отливок $M_1 = 22$ кг;
- масса кокиля $M_3 = 250$ кг;
- коэффициент теплопроводности отливки $\lambda_1 = 54,5$ Вт/(м·К);
- коэффициент теплопроводности материала кокиля $\lambda_3 = 42$ Вт/(м·К);
- теплоаккумулирующая способность отливки $b_1 = 11743$ Вт·с^{1/2}/(м²·К);
- теплоаккумулирующая способность облицовки $b_2 = 954$ Вт·с^{1/2}/(м²·К).

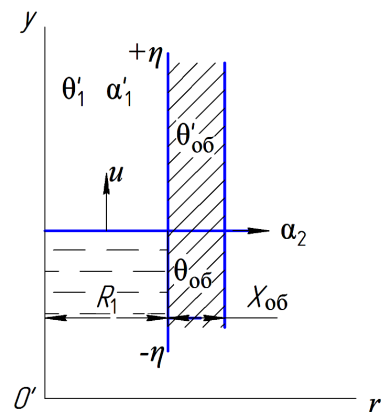


Рис. 3. Схема температурного поля облицованного кокиля на стадии заливки

На стадии затвердевания процесс описывается выражениями:

- для определения объема затвердевшего металла V_1

$$V_1 = D \cdot \frac{N_2}{m_3 \cdot N_1} \cdot \left[\exp\left(-\frac{N_1}{N_2} \cdot F_0\right) - 1 \right] + \frac{N_0}{N_1} \quad (9)$$

где F_0 – критерий Фурье; D , N_1 , N_2 , m_3 – расчетные коэффициенты, определяемые по ниже представленным формулам:

$$D = \frac{\theta_{кр} - \theta_{2н} - m_3 \cdot \frac{N_0}{N_1}}{n \cdot L_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} - L_1} = \frac{1263 - 231242 \cdot \frac{0,008}{4,6}}{0,47 \cdot \frac{4,6}{2,76} - 2,3} = -5,66$$

$$m_3 = \frac{r_1 \cdot \rho_1 \cdot a_{об}}{\lambda_{об} \cdot F_1 \cdot R_1} = \frac{251000 \cdot 7860 \cdot 0,000000409}{0,622 \cdot 0,17 \cdot 0,033} = 231242$$

– время затвердевания отливки можно определить из формулы

$$F_0 = \frac{Q_{об} \cdot t}{R_1^2} = \frac{0,0000004 \cdot t}{0,033^2} = 0,00036t \quad (10)$$

где $Q_{об}$ – коэффициент температуропроводности материала облицовки;

$\theta_{кр}$ и $\theta_{2н}$ – температуры кристаллизации сплава и кокиля, отсчитанные от температуры окружающей среды;

N_0 , N_1 , N_2 , L_1 и L_2 – коэффициенты, рассчитанные по ниже приведенным формулам;

$a_{об}$ – коэффициент температуропроводности материала облицовки;

$\lambda_{об}$ – коэффициент теплопроводности материала облицовки;

F_1 – площадь поверхности охлаждения отливки;

R_1 – половина толщины или радиус стенки отливки;

t – время затвердевания отливок.

$$N_0 = \frac{Bi_2}{m_3} \cdot Q_{кр} = \frac{1,4}{231242} \cdot 1263 = 0,008$$

$$N_1 = 1 + Bi_3 \cdot L_1 = 1 + 1,58 \cdot 2,3 = 4,6$$

$$N_2 = m_2 \cdot L_2 + Bi_3 \cdot nL_2 + n \cdot \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{n}{2} \right) = 2,2 \cdot 0,47 + 1,4 \cdot 0,47 \cdot \frac{1}{1,58} + \frac{1}{2} = 2,76$$

где m_2 – расчетный коэффициент

$$m_2 = \frac{C_2 \cdot M_2}{C_{об} \cdot \rho_{об} \cdot R_1 \cdot F_2} = \frac{560 \cdot 250}{1046 \cdot 1400 \cdot 0,033 \cdot 1,3} = 2,2$$

$$L_1 = \frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + n = \frac{1}{1,58} + \frac{1}{1,4} + 1 = 2,3$$

$$L_2 = \frac{1}{Bi_2} \cdot \left(\frac{1}{Bi_2} + \frac{n}{2} \right) + \frac{n}{2} \cdot \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{n}{3} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{1,58} + \frac{1}{3} \right) = 0,47$$

где Bi_1 , Bi_2 – критерий Био для отливки и облицовки соответственно

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 \cdot R_1}{\lambda_{об}} = \frac{2610 \cdot 0,033}{54,5} = 1,58;$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha_2 \cdot R_1}{\lambda_{об}} = \frac{1824 \cdot 0,033}{42} = 1,4;$$

$$Bi_3 = \frac{\alpha_3 \cdot F_3 \cdot R_1}{\lambda_{об} \cdot F_2} = 1,58$$

где α_1 , α_2 , α_3 – коэффициенты теплоотдачи на поверхностях отливки, облицовки и кокиля соответственно.

$$\alpha_1 = \frac{b_1}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\frac{y}{u}}} = \frac{11743}{\sqrt{3,14} \cdot \sqrt{\frac{0,26}{0,04}}} = 2610$$

$$\alpha_2 \rightarrow \infty$$

$$\alpha_3 = \frac{b_3}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\frac{y}{u}}} = \frac{8260}{\sqrt{3,14} \cdot \sqrt{\frac{0,26}{0,04}}} = 1824$$

где y – координата, отсчитываемая от фронта потока;

$$b – \text{коэффициент аккумуляции тепла, } b = \sqrt{\lambda \cdot C \cdot \rho}$$

$$– \text{отливки } b_1 = \sqrt{23,3 \cdot 753 \cdot 7860} = 11743;$$

$$– \text{кокиля } b_3 = \sqrt{16,7 \cdot 560 \cdot 7200} = 8260$$

Учитывая расчеты, приведенные выше и формулы (9 и 10) определяем расчетное время охлаждения отливки, проведя поэтапно математические расчеты:

$$0,0028 = -566 \cdot \frac{2,76}{231242 \cdot 4,6} \cdot \left[\exp\left(-\frac{4,6}{2,76} \cdot 0,00036t\right) - 1 \right] + \frac{0,008}{1,6}$$

$$0,0028 = -0,0015 \cdot [\exp(-0,0006t) - 1] + 0,0017$$

$$-0,0004 = -0,0015 \cdot \exp(-0,0006t)$$

$$0,27 = \frac{1}{e^{0,0006t}}$$

$$e^{0,0006t} = 3,7$$

$$0,0006t = \ln 3,7$$

$$0,0006t = 1,31$$

Время затвердевания отливки от момента заливки металла в форму до температуры выбивки

$$t = 2183c = 36,4 \text{ мин}$$

Программное время охлаждения составило 30,86 мин. Разница расчетного значения и полученного при использовании программного продукта *ProCAST*, составила 5,54 мин. Это объясняется тем, что охлаждение в программном продукте рассчитывалось для отливки, затвердевающей в полностью облицованном кокиле.

Выводы

Рассчитали время затвердевания блока отливок, полученного заливкой металла в кокиль, частично облицованный с целью изменения направления кристаллизации и, как следствие, получения бездефектных отливок.

Список литературы

1. Белов В.Д. Теория литейных процессов: учебник / В.Д. Белов [и др.]; под ред. Хосена Ри. – Хабаровск: Изд-во «РИОТИП» краевой типографии, 2008. – 580 с.
2. Бураков С.Л. Литье в кокиль / С.Л. Бураков, А.И. Вейник, Н.П. Дубинин и др. Под ред. А.И. Вейника.– М.: Машиностроение, 1980. – 415 с.
3. Голод В.М. Теория, компьютерный анализ и технология стального литья / В.М. Голод, В.А. Денисов; Под общ. ред. В.М. Голода.– СПб: ИПЦ СПГУТД, 2007.– 610 с.
4. Малевич Ю.А. Теплофизические основы затвердевания отливок и слитков / Ю.А. Малевич, Ю.А. Самойлович.– Мн: Выш. шк., 1989. – 203 с.: ил.
5. Руденко А.Б., Серебро В.С. Литье в облицованный кокиль. – М.: Машиностроение, 1987. – 184 с.

Рецензенты:

Беленький В.Я., д.т.н., профессор, декан МТФ ПНИПУ, г. Пермь;

Сиротенко Л.Д., д.т.н., профессор кафедры МТиКМ ПНИПУ, г. Пермь.