

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.18.046

В.В. Стулов, А.М. Севастьянов

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТЛИВОК В ФУТЕРОВАННОЙ ФОРМЕ

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре

Выполнена разливка алюминия в футерованную неохлаждаемую форму с установленной по центру неохлаждаемой и охлаждаемой тепловой трубой. Установлено, что время охлаждения полый отливки сокращается более чем в три раза при наличии охлаждаемой трубы. Таким образом, увеличивается более чем в два раза скорость кристаллизации металла.

Ключевые слова: футерованная форма, тепловая труба, алюминий, охлаждение, вода.

В процессе получения полых отливок в футерованных формах и кокилях [1,2], а также в установке литейно-ковочного модуля (ЛКМ) [3] актуальной задачей является уменьшение времени формирования отливки, в первую очередь в результате уменьшения разгара центрального стержня, а также увеличение срока службы форм и стержня. Кроме этого, разработка новых способов охлаждения металла при высоких температурах рабочей среды и высокой эффективности охлаждения является актуальной.

В настоящей работе поставлена цель - выполнить разливку алюминия в футерованную неохлаждаемую форму с установленной по центру высокоэффективно охлаждаемой тепловой трубой и с неохлаждаемой трубой и исследовать влияние отвода тепла от центра отливки на интенсивность затвердевания алюминия, а также на получение мелкозернистой структуры.

Применение разливки алюминия в футерованную неохлаждаемую форму с охлаждаемой трубой исключает недостатки, присущие разливке металла в стальной кокиль с водяным охлаждением [2, 4]: трудности обеспечения начальной температуры формы выше 150°C , разогрев кокиля перед первой разливкой, возможности попадания воды из системы охлаждения стальных стенок кокиля в металл.

Исходные данные

Параметры футерованной формы, мм: высота $H = 400$, диаметр наружный $d_T = 230$, толщина металлической стенки $\delta = 10$, толщина футеровки $\delta_{\Phi} = 20$. Масса стальной стенки формы $m_C = 22,6$ кг, масса футеровки $m_{\Phi} = 4,7$ кг.

Параметры стальной охлаждаемой и неохлаждаемой труб, мм: наружный диаметр $d_C = 55$; длина $L = 1020$; толщина стенки $\delta = 3$ мм. Масса трубы $m_T = 4,1$ кг.

Параметры алюминиевой отливки, мм: максимальный наружный диаметр $d_0 = 165$, высота $H_0 = 300$, диаметр отверстия $d_{01} = 55$; объем отливки $V_0 = 4,23 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Масса отливки $m = 11,445$ кг; площадь поверхности контакта со стержнем $F_K = 5,18 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Теплофизические параметры алюминия [5]: $\rho_1 = 2350 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\rho_2 = 2650 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,
 $r = 0,395 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, $t_K = 660^{\circ}\text{C}$, $C_1 = 1177 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$, $C_2 = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$.

Обозначения: ρ_1, ρ_2 - плотность алюминия в твердом и жидком состоянии соответственно, C_1, C_2 - теплоемкость алюминия в твердом и жидком состоянии соответственно, r - удельная теплота кристаллизации, t_k - температура кристаллизации. Температура разливки алюминия - $t_1 = 730$ °С.

Теплофизические параметры футерованной формы [6]: $\rho_C = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,
 $\rho_\Phi = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $C_C = 460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $C_\Phi = 800 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Обозначения: ρ_C, ρ_Φ - плотность стали и материала футеровки (песок); C_C, C_Φ - теплоемкость стали и материала футеровки.

Теплофизические параметры воды при средней температуре $\bar{t}_B = 50$ °С [6]:
 $\rho = 988 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $C_P = 4177 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Массовый расход воды на охлаждение тепловой трубы: $\dot{m}_B = 12,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Методика измерений

В процессе охлаждения и кристаллизации залитого жидкого алюминия в футерованную форму с установленной по ее центру трубой производились измерения температуры охлаждения и затвердевания алюминия, температуры в зазоре между стальной формой и футеровкой, температуры снаружи металлической формы, температуры поверхности стальной неохлаждаемой трубы и температуры охлаждающей воды на выходе из конденсатора тепловой трубы. Глубина погружения термопар - 30 мм.

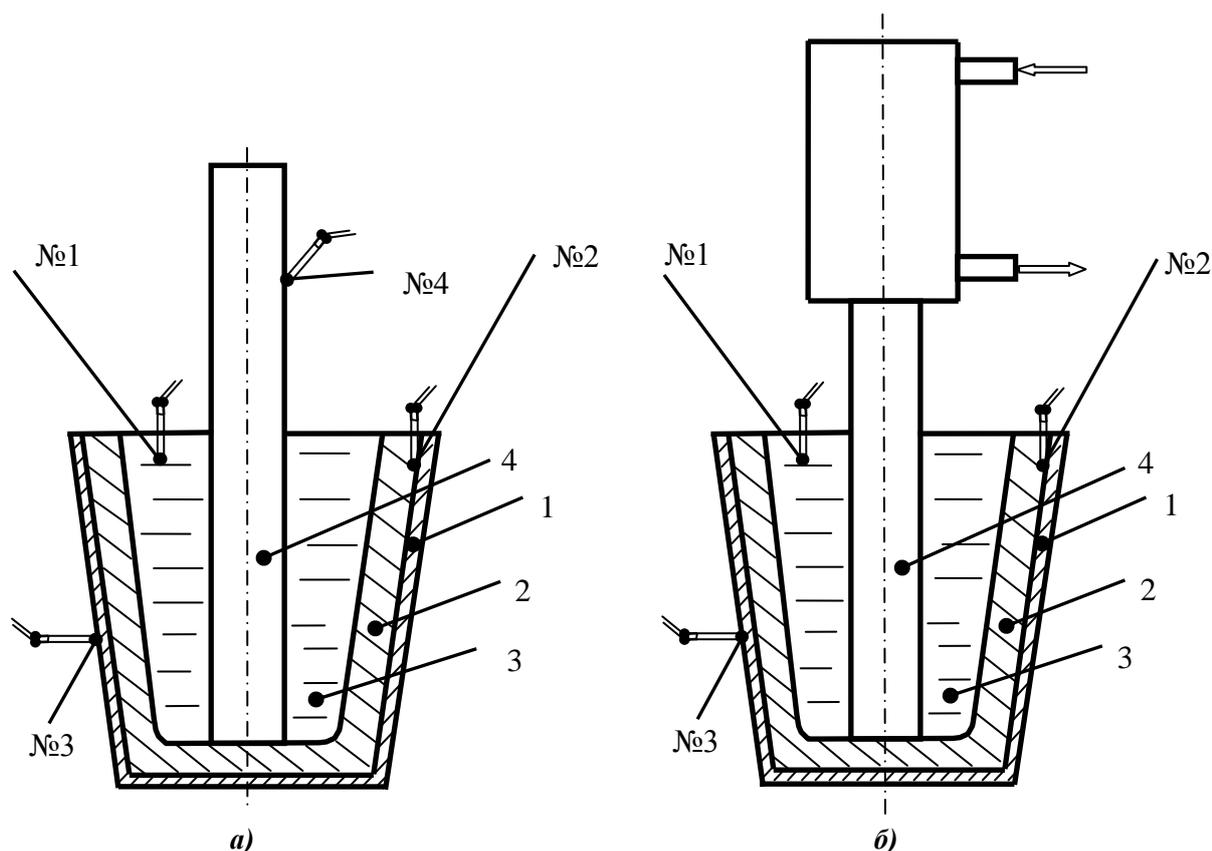


Рис. 1. Схема установки термопар в футерованной форме:
 а - с неохлаждаемой трубой; б - с охлаждаемой тепловой трубой;
 1 - стальная стенка; 2 - футеровка; 3 - алюминий; 4 - труба

Измерение температуры производилось ХК- и WR-термопарами, подключенными к автоматическому потенциометру КСП – 4 и милливольтметру. На рис. 1, а, б приведены схемы установки термопар в футерованной форме с неохлаждаемой трубой (рис. 1, а) и охлаждаемой водой тепловой трубой (рис. 1, б).

Результаты исследований

На рис. 2 приведены зависимости температуры алюминия, разлитого в футерованную форму со стальной неохлаждаемой (кривая 1) и охлаждаемой водой (кривая 2) тепловой трубой от времени. Из рис. 2 следует, что применение охлаждаемой тепловой трубы, по сравнению с неохлаждаемой трубой, уменьшает время охлаждения алюминия до 200°C со 135 (кривая 1) до 35 минут (кривая 2), т.е. в 3,9 раза. Наиболее крутой характер кривых 1 и 2 (рис. 1) наблюдается в интервале первых 20–35 минут охлаждения, что связано с наибольшей интенсивностью охлаждения алюминия. При этом максимальное значение tg угла наклона касательных к кривым 1 и 2 (рис. 2) равняется соответственно $\text{tg}\varphi_1^{\text{max}} = 1,19$ и $\text{tg}\varphi_2^{\text{max}} = 3,23$, а минимальные значения - $\text{tg}\varphi_1^{\text{min}} = 0,4$ и $\text{tg}\varphi_2^{\text{min}} = 1,036$.

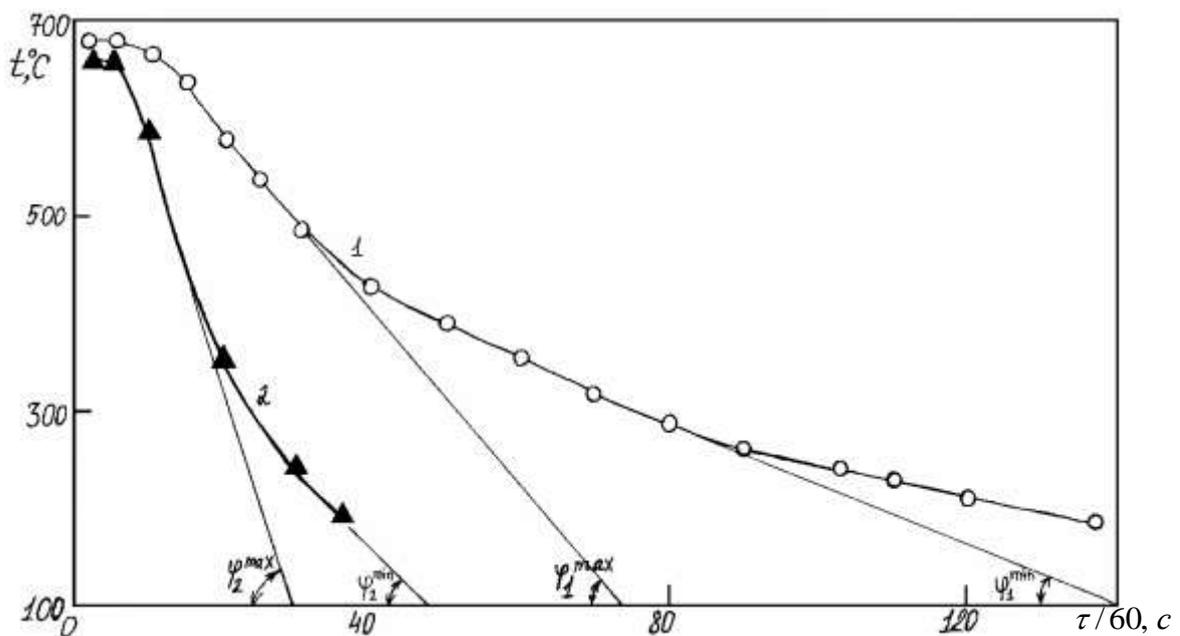


Рис. 2. Зависимости температуры алюминия, разлитого в футерованную форму со стальной трубой от времени:

1 – при неохлаждаемой трубе; 2 – с охлаждаемой водой тепловой трубой

В результате получаем соотношения: $\frac{\text{tg}\varphi_2^{\text{max}}}{\text{tg}\varphi_1^{\text{max}}} = 2,71$ и $\frac{\text{tg}\varphi_2^{\text{min}}}{\text{tg}\varphi_1^{\text{min}}} = 2,59$. То есть применение

охлаждаемой тепловой трубы, по сравнению с неохлаждаемой трубой, повышает интенсивность затвердевания алюминия в футерованной форме в 2,59 – 2,71 раза.

На рис. 3 приведены зависимости температур наружной поверхности стальной стенки футерованной формы от времени охлаждения в ней алюминия. Из рис. 3 видно, что с использованием неохлаждаемой стальной трубы максимальная температура наружной поверхности стальной стенки формы достигает 240°C (кривая 1), а с использованием охлаждаемой тепловой трубы – всего 155°C (кривая 2), то есть уменьшается на 85°C . Максимальная температура наружной поверхности стальной стенки формы достигается через время 20 мин с момента разлива алюминия.

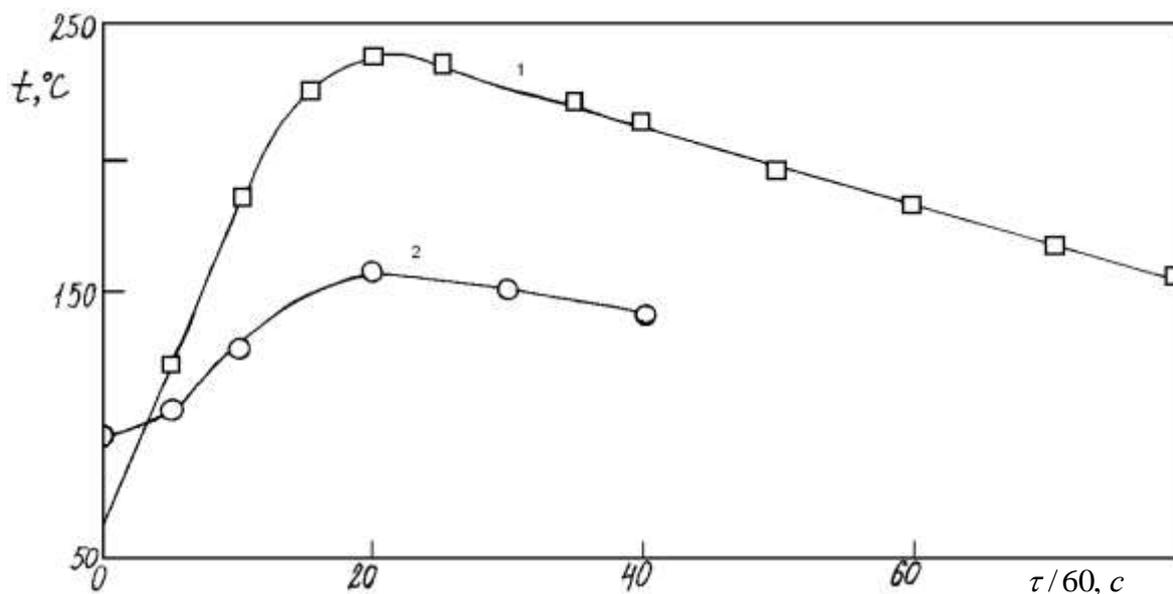


Рис. 3. Зависимости температур наружной поверхности стальной стенки футерованной формы с установленной в ней трубой от времени охлаждения алюминия:

- 1 – при использовании стальной неохлаждаемой трубы;
2 – при использовании охлаждаемой водой тепловой трубы

На рис. 4 приведена зависимость температуры поверхности стальной неохлаждаемой трубы за пределами футерованной формы от времени охлаждения алюминия. Из рис. 4 видно, что максимального значения температура поверхности стальной неохлаждаемой трубы достигает всего 135°C через время 25 мин с момента разливки алюминия в форму. При этом температура поверхности стальной трубы, находящейся вместе с алюминием в форме, через это время может достигать $450 - 500^{\circ}\text{C}$ (рис. 2), то есть перепад температур наружной поверхности по длине трубы достигает $315 - 365^{\circ}\text{C}$.

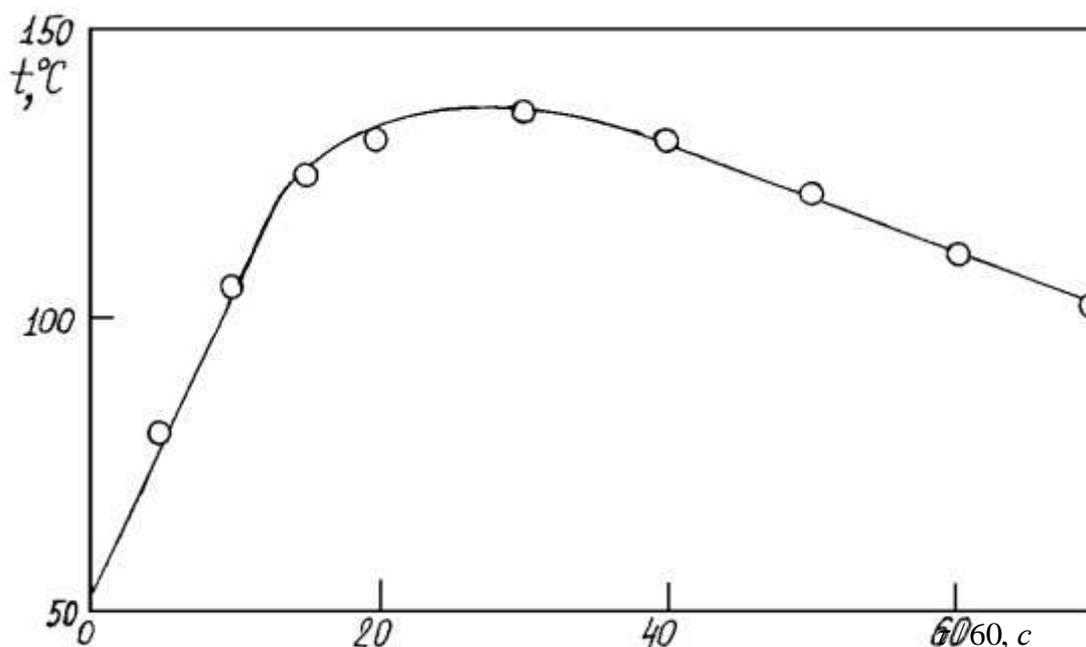


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности стальной неохлаждаемой трубы, установленной в футерованной форме с охлаждаемым алюминием, от времени

На рис. 5 приведена зависимость температуры охлаждающей воды на выходе из конденсатора тепловой трубы от времени охлаждения алюминия в форме. Из рис. 5 видно, что максимальное значение температуры охлаждающей воды, равное 90°C на выходе из конденсатора тепловой трубы, наблюдается через 8 мин с момента разливки алюминия в футерованную форму.

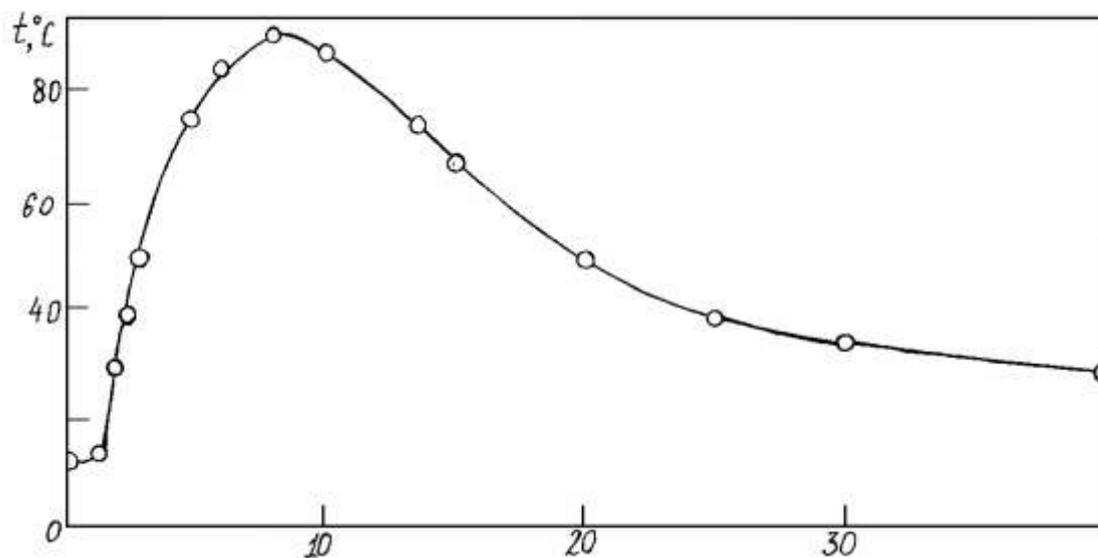


Рис. 5. Зависимость температуры охлаждающей воды на выходе из конденсатора тепловой трубы от времени охлаждения алюминия в форме

$\tau/60, \text{с}$

Максимальные значения температур в зазоре между футеровкой и стальной стенкой формы равняются соответственно для двух вариантов охлаждения металла 270 и 148°C через 20 мин с момента разливки алюминия. То есть использование для охлаждения алюминия в форме тепловой трубы позволяет уменьшить температуру в зазоре между футеровкой и стальной стенкой формы на 122°C .

С учетом приведенных зависимостей определим значения составляющих теплового баланса футерованной формы с разлитым алюминием.

Теплосодержание алюминия определим по формуле

$$Q_0 = mr + m(C_1\Delta t_1 + C_2\Delta t_2), \quad (1)$$

где $\Delta t_1 = t_1 - t_k$ - температура перегрева жидкого алюминия, $\Delta t_2 = t_k - t_2$ - перепад температур в алюминии в твердом состоянии; $t_2 = 60^{\circ}\text{C}$ - конечное значение охлажденного алюминия.

После подстановки в выражение (1) исходных данных получаем значение $Q_0 = 12,33 \cdot 10^6$ Дж. В полученном значении на теплоту кристаллизации алюминия приходится $4,52 \cdot 10^6$ Дж, что составляет $36,7\%$ от его общего теплосодержания.

Тепло, затраченное на нагрев стальной стенки формы, определим по формуле

$$Q_C = C_C m_C (t_{C2} - t_{C1}), \quad (2)$$

где $t_{C2} = 150^{\circ}\text{C}$ - максимальное значение температуры стальной стенки разогретой формы (по рис. 3); $t_{C1} = 25^{\circ}\text{C}$ - начальное значение температуры стальной стенки. После подстановки в выражение (2) исходных данных получаем $Q_C = 1,3 \cdot 10^6$ Дж.

Тепло, затраченное на нагрев футеровки формы Q_{Φ} , определим также по формуле (2) при соответствующих значениях C_{Φ} , m_{Φ} и $t_{\Phi 2} = 325^{\circ}\text{C}$ - максимальном значении температуры футеровки. После подстановки в формулу (2) исходных данных получаем

$Q_{\Phi} = 1,12 \cdot 10^6$ Дж. Общее тепло, затраченное на нагрев футерованной формы $Q_{C\Phi} = Q_C + Q_{\Phi}$, равняется $Q_{C\Phi} = 2,42 \cdot 10^6$ Дж.

Тепло, отданное конвекцией воздуху от стенки формы, определим по формуле

$$Q_K = \alpha F_{\Phi} \Delta t \bar{\tau}, \quad (3)$$

где $\alpha = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ - коэффициент теплоотдачи естественной конвекцией воздуху со стенки формы [6]; $F_{\Phi} = 0,29 \text{ м}^2$ - площадь наружной поверхности формы; $\Delta t = 100^{\circ}\text{C}$ - перепад температур между стенкой формы и окружающим воздухом; $\bar{\tau} = 1800 \text{ с}$ - среднее время охлаждения формы (по рис. 3). После подстановки в формулу (3) исходных данных получаем $Q_K = 0,104 \cdot 10^6$ Дж.

Тепло, затраченное на разогрев стальной тепловой трубы до средней температуры $\bar{t}_T = 250^{\circ}\text{C}$, определим по формуле (2). После подстановки в формулу (2) исходных данных получаем $Q_T = 0,426 \cdot 10^6$ Дж.

Тепло, отведенное охлаждающей водой за время $\tau = 2400 \text{ с}$, определим с учетом рис. 5 при среднем перепаде температур охлаждающей воды $\Delta t_B = 57^{\circ}\text{C}$ по формуле

$$Q_B = C_B \dot{m}_B \Delta t_B \tau. \quad (4)$$

После подстановки в формулу (4) исходных данных получаем $Q_B = 7,2 \cdot 10^6$ Дж.

Общее количество теплоты, отданное алюминием в футерованной форме, $Q_0' = 10,15 \cdot 10^6$ Дж. При этом доля тепла, отведенного водой при охлаждении тепловой трубы, составляет 71%. Сравнение полученного значения $Q_0' = 10,15 \cdot 10^6$ Дж с теплосодержанием разливаемого алюминия $Q_0 = 12,33 \cdot 10^6$ Дж показывает, что расхождение составляет 17,7% и объясняется неучтенными потерями тепла с поверхности футерованной формы, конвекцией воздухом с поверхности разогретой тепловой трубы, погрешностями определения составляющих баланса тепла в форме.

Таблица 1

Площади зерен алюминия в зависимости от наличия охлаждения

Без тепловой трубы		С тепловой трубой	
№	Площадь (усл. ед)	№	Площадь (усл. ед)
1	19068,5	1	4303,5
2	9335,5	2	3947
3	22425	3	7397
4	13832,5	4	5238
5	8465	5	6210,5
6	17327	6	6563,5
7	18681,5	7	5762,5
8	10653,5	8	3392
9	17253,5	9	6573,5
10	14076,5	10	5862
11	15696,5	11	4555
12	14868	12	2707
13	8426,5	13	5319
Среднее значение площади	14623,81		5217,731

При небольших степенях переохлаждения, когда велик зародыш критического размера, а скорость образования зародышей мала, при затвердевании формируется крупнокристаллическая структура. При быстром охлаждении расплава достигается его затвердевание в состоянии переохлаждения, при этом скорость образования зародышей увеличивается более интенсивно, чем скорость их роста, соответственно получают более мелкие зерна. В табл. 1 приведены площади зерен (в условных единицах), определенные по фотографиям шлифов. Как видно из таблицы, быстрый отвод тепла от центра отливки способствует измельчению зерен алюминия и увеличению их общего количества.

Отсюда уменьшение площади зерен:

$$k = \frac{14623,81}{5217,731} \approx 2,8 .$$

Выводы

Разливка алюминия в футерованную форму с установленной по центру высокоэффективно охлаждаемой тепловой трубой уменьшает время формирования заготовки в форме со 135 до 35 мин, то есть в 3,9 раза. Также быстрый отвод тепла от центра отливки способствует измельчению площади зерен в 2,8 раза.

Библиографический список

1. Пат. на ПМ № 38651 RU. Кокильная машина с тепловой трубой / В.В. Стулов; опубл. 10.07.04. Бюл. № 19.
2. **Петриченко, А.М.** Теория и технология кокильного литья / А.М. Петриченко. – К.: Техніка, 1967. – 250 с.
3. **Одинокоев, В.И.** Литейно-ковочный модуль (литье и деформация) / В.И. Одинокоев, В.В. Стулов. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 150 с.
4. Специальные способы литья: справочник / В.А. Ефимов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 736 с.
5. **Зиновьев, В.Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. изд. / В.Е. Зиновьев. – М.: Metallurgy, 1989. – 384 с.
6. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е.В. Аметистов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с.

*Дата поступления
в редакцию 20.05.2010*

V.V. Stulov, A.M. Sevastyanov

GETTING HOLLOW ALUMINUM CASTINGS IN LINED FORM

Completed casting aluminum lined with uncooled form centered on the non-cooled and heat pipe cooling. Established that the cooling time of hollow casting is reduced by more than 3 times in the presence of cooling pipes. Thus, increasing more than twice the velocity of crystallization of the metal.

Key words: lined shape, heat pipe, aluminum, cooling, water.