



*The influence of the ingot diameter of alloy AK18 on speed of its hardening and microstructure at flooded-jet cooling is studied.*

В. Ю. СТЕЦЕНКО, Р. В. КОНОВАЛОВ, А. И. РИВКИН, ИТМ НАН Беларуси

УДК 669.715

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРА ОТЛИВКИ НА СКОРОСТЬ ЕЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И МИКРОСТРУКТУРУ ПРИ ЗАТОПЛЕННО-СТРУЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Метод литья закалочным затвердеванием позволяет получать заготовки диаметром от 40 до 150 мм с ультрадисперсной микроструктурой без применения модификаторов [1]. Но влияние диаметра отливки на скорость ее затвердевания и микроструктуру при интенсивном затопленно-струйном охлаждении мало изучено и заслуживает более детального исследования. Для определения

скорости затвердевания отливок различных диаметров необходима разработка одномерной математической модели в квазистационарном приближении, описывающей процесс теплообмена заготовки и охлаждающей жидкости при затопленно-струйном охлаждении.

Распределения температур в затвердевающей отливке из заэвтектического силумина приведены на рис. 1.

Считаем, что тепловой поток вдоль оси отливки пренебрежимо мал по сравнению с радиальным потоком. Теплопроводность для жидкого расплава, двухфазной зоны и твердой корки определяется соответственно по уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\lambda_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), & 0 < r < r_1(t), \\ (c_2 \rho_2 - \rho_3 \mu L) \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), & r_1(t) < r < r_2(t), \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} &= \frac{\lambda_3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right), & r_2(t) < r < r_3, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  и  $\rho_3$  – плотность жидкого расплава, двухфазной зоны и твердой корки;  $c_1, c_2$  и  $c_3$  – удельная теплоемкость жидкого расплава, двухфазной зоны и твердой корки;  $\lambda_1, \lambda_2$  и  $\lambda_3$  – теплопроводность жидкого расплава, двухфазной зоны и твердой корки;  $L$  – удельная теплота кристаллизации расплава;

$\mu = \frac{\partial \Psi}{\partial T_2}$  – темп кристаллизации ( $\Psi$  – относительное количество твердой фазы в объеме двухфазной зоны (найденное из диаграммы состояния системы Al–Si)).

Граничные условия, определяемые из равенства тепловых потоков на границах зон, имеют вид

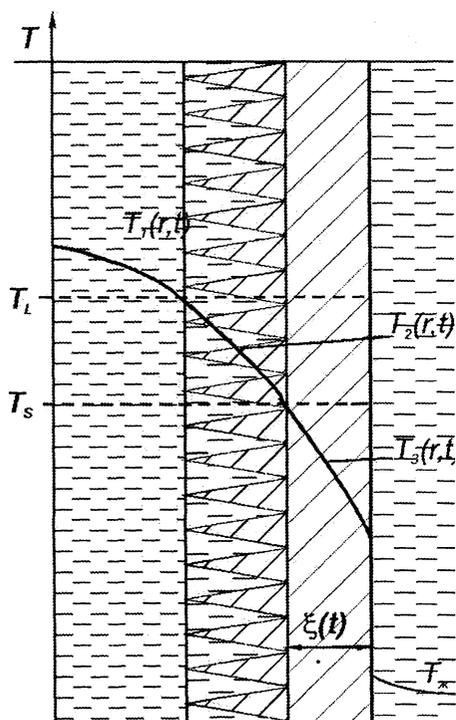


Рис. 1. Распределение температуры в затвердевающей отливке из силумина АК18 в устройстве вторичного охлаждения:  $r_1(t)$  – положение фронта ликвидуса;  $r_2(t)$  – положение фронта солидуса;  $r_3$  – радиус отливки;  $T_1(r, t)$  – распределение температуры в расплаве;  $T_2(r, t)$  – распределение температуры в двухфазной зоне;  $T_3(r, t)$  – распределение температуры в твердой корке;  $T_*$  – температура основного потока охлаждающей жидкости

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_1}, & T_1(r_1,t) &= T_2(r_1,t) = T_L, \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} &+ \Psi_E L \rho_3 U = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2}, & T_2(r_2,t) &= T_3(r_2,t) = T_S = T_E, \\ -\lambda_3 \frac{\partial T_3(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_3} &= \alpha (T_3(r_3,t) - T_{ж}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\Psi_E L \rho_3 U$  – тепловой поток, обусловленный продвижением фронта кристаллизации;  $\Psi_E$  – относительное количество эвтектики перед фронтом затвердевания (найденное из диаграммы состояния системы Al–Si);  $U = \frac{d\xi}{dt}$  – линейная скорость продвижения фронта затвердевания;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на границе отливка – охлаждающая жидкость, определяется из третьего уравнения системы (2):

$$\alpha = -\frac{\lambda_3}{(T_3(r_3,t) - T_{ж})} \frac{\partial T_3(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_3}. \quad (3)$$

Вследствие относительно высоких скоростей кристаллизации и теплопроводности силумина принимаем, что распределение температуры в затвердевшей корке отливки цилиндрической формы близко к линейному [2]. Тогда выражение  $\frac{\partial T_3(r_3,t)}{\partial r}$  можно представить в следующем образом:

$$\frac{\partial T_3(r_3,t)}{\partial r} = \frac{T_3^2(t) - T_3^1(t)}{l_1}, \quad (4)$$

где  $T_3^1(t)$  и  $T_3^2(t)$  – измеряемые температуры в точках 1 и 2;  $l_1$  – расстояние между термопарами (рис. 2).

Температура на внешней поверхности отливки определяется по уравнению

$$T_3(r_3,t) = \frac{T_3^2(t)(x_1 + l_1) - T_3^1(t)x_1}{l_1}, \quad (5)$$

где  $x_1$  – расстояние от термопары 2 до наружной поверхности отливки.

Подставляя (4) и (5) в (3), получаем

$$\alpha = -\lambda_3 \frac{T_3^2(t) - T_3^1(t)}{T_3^2(t)(x_1 + l_1) - T_3^1(t)x_1 - T_{ж}l_1}. \quad (6)$$

Распределения температур в отливках определяли экспериментально. На опытной установке литья закалочным затвердеванием из сплава АК18 получили заготовки диаметрами 50, 69 и 118 мм и высотой 160 мм. Плавку вели в печи сопротивле-

ния марки «Snol-1300» в графитовом тигле. Температура перегрева металла составляла 850 °С, время выдержки – 2 ч. Модификаторы не применяли. Расплав заливали в кристаллизатор с установленными в нем термопарами. В связи с тем что кристаллизация отливки происходит за весьма короткое время, необходимо использовать термопары с минимально возможной инерционностью. Для этого были выбраны хромель-алюмелевые (ХА) термопары серии ТХА(К)-1199, изготовленные на НПООО «Энергоприбор» (г. Минск). Термопары защищены стальной нержавеющей трубкой диаметром 3 мм, запаянной с одного конца. Внутри трубки располагается термопарный кабель КТМС-ХК с сечением проволок ХА 0,25 мм и диаметром королька не более 1 мм. После извлечения отливки с термопарами из кристаллизатора ее помещали в устройство вторичного затопленно-струйного охлаждения, где давление воды на входе составляло 0,05 МПа. Для кристаллизатора с внутренним диаметром 50 мм  $x_1 = 5$  мм и  $l_1 = 10$  мм, для кристаллизаторов с внутренними диаметрами 69 и 118 мм  $x_1 = 10$  мм и  $l_1 = 15$  мм (рис. 2). Показания термопар в отливках фиксировали при помощи блока регистрации температуры фирмы LG и ноутбука.

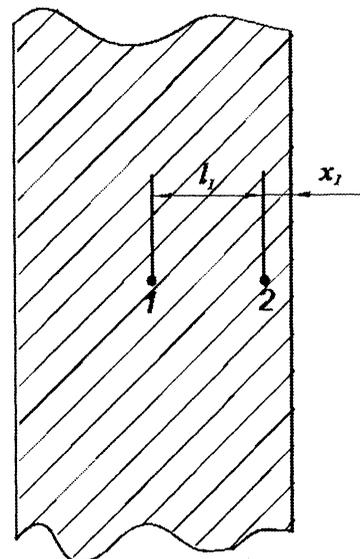


Рис. 2. Схема расположения термопар в отливках

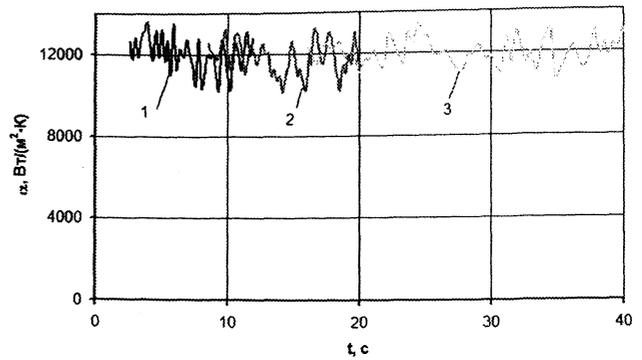
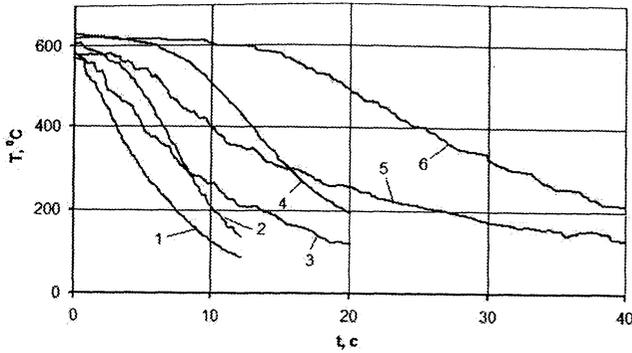


Рис. 3. Зависимость температур в отливках от времени затвердевания в устройстве вторичного охлаждения: 1, 2 – диаметр отливки 50 мм; 3, 4 – 69; 5, 6 – 118 мм; 1, 3, 5 – термопары располагали в точке 1; 2, 4, 6 – в точке 2 (см. рис. 2)

Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи на границе отливка – охлаждающая жидкость от времени затвердевания в устройстве вторичного охлаждения: 1 – диаметр отливки 50 мм; 2 – 69; 3 – 118 мм

Зависимости температуры  $T$  в отливках от времени затвердевания  $t$  в устройстве затопленно-струйного вторичного охлаждения приведены на рис. 3.

$\alpha = 12000 \pm 600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Эти данные говорят о том, что затвердевание отливок разного диаметра определяется условиями охлаждения, которые во всех случаях были одинаковыми.

Ввиду допущения, сделанного для формулы (4), при расчете коэффициента теплоотдачи на границе отливка – охлаждающая жидкость по формуле (6) необходимо брать показания термопар в те моменты времени, когда обе термопары находятся в затвердевшей корке отливки. Из рис. 3 видно, что для заготовки диаметром 50 мм такой промежуток времени составляет от 2,8 до 12 с, диаметром 69 мм – от 8,3 до 20 с, диаметром 118 мм – от 16 до 40 с. Расчеты  $\alpha$  по формуле (6) для отливок диаметрами 50, 69 и 118 мм с использованием показаний термопар (рис. 3) приведены на рис. 4.

Так как время извлечения заготовок из кристаллизатора и помещения их в устройство вторичного охлаждения составляло около 2 с и материал заготовок имеет относительно высокую теплопроводность (104 Вт/(м·К) [1]), то распределение температуры в отливках в момент помещения их в устройство вторичного охлаждения принимаем линейным. Используя данные показаний термопар в начальный момент времени (рис. 3), находим распределение температуры в отливках в момент помещения их в устройство вторичного охлаждения.

Из рисунка видно, что для заготовки диаметром 50 мм  $\alpha = 12000 \pm 900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , диаметром 69 мм  $\alpha = 11800 \pm 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , диаметром 118 мм

Математическую модель решали методом конечных разностей с использованием явной схемы. Итоговая система конечно-разностных уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 \Theta_{1,j+1} &= \Theta_{1j} + \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1 r_3^2} (\Theta_{2j} - \Theta_{1j}), \\
 \Theta_{i,j+1} &= \Theta_{ij} + \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1 r_3^2} \left( \frac{\Theta_{ij} - \Theta_{i-1,j}}{i} + \Theta_{i+1,j} - 2\Theta_{ij} + \Theta_{i-1,j} \right), & 2 < i < p-1, \\
 \Theta_{pj} &= \frac{\lambda_1 \Theta_{p-1,j} + \lambda_2 \Theta_{p+1,j}}{\lambda_1 + \lambda_2}, \\
 \Theta_{i,j+1} &= \Theta_{ij} + \frac{\lambda_2}{r_3^2 (c_2 \rho_2 - \rho_3 \mu L)} \left( \frac{\Theta_{ij} - \Theta_{i-1,j}}{i} + \Theta_{i+1,j} - 2\Theta_{ij} + \Theta_{i-1,j} \right), & p+1 < i < k-1, \\
 \Delta \Xi &= \Delta r \frac{T_S}{r_3^2 L \rho_3 \Psi_E} (\lambda_2 (\Theta_{kj} - \Theta_{k-1,j}) - \lambda_3 (\Theta_{k+1,j} - \Theta_{kj})), \\
 \Theta_{k,j+1} &= 1, \\
 \Theta_{i,j+1} &= \Theta_{ij} + \frac{\lambda_3}{c_3 \rho_3 r_3^2} \left( \frac{\Theta_{ij} - \Theta_{i-1,j}}{i} + \Theta_{i+1,j} - 2\Theta_{ij} + \Theta_{i-1,j} \right), & k+1 < i < n-1, \\
 \Theta_{n,j+1} &= \frac{\lambda_3 \Theta_{n-1,j+1} - \alpha r_3 \Delta r \Theta_{ж}}{\lambda_3 - \alpha r_3 \Delta r},
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

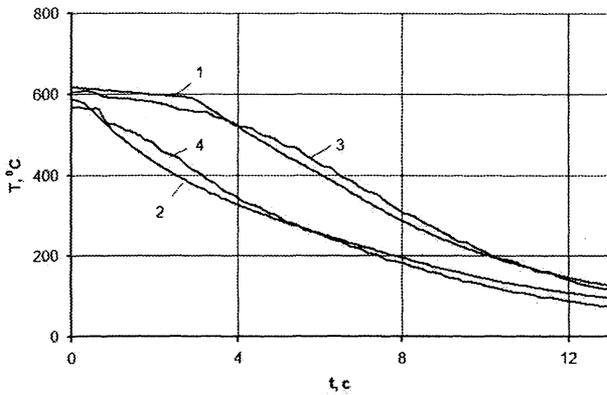


Рис. 5. Зависимость температур в отливке диаметром 50 мм от времени затвердевания в устройстве вторичного охлаждения: 1, 2 – расчетные температуры в точках 1, 2; 3, 4 – показания термопар в точках 1, 2 (см. рис. 2)

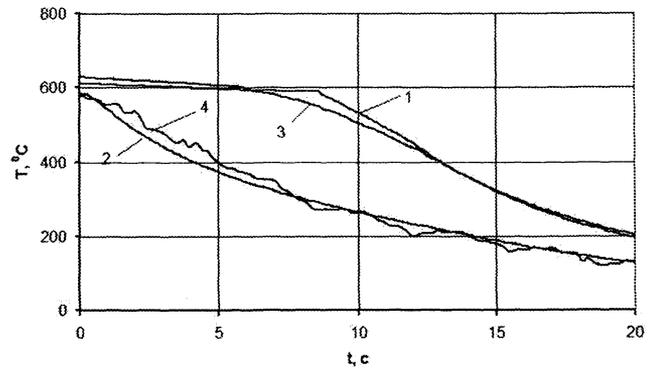


Рис. 6. Зависимость температур в отливке диаметром 69 мм от времени затвердевания в устройстве вторичного охлаждения: 1, 2 – расчетные температуры в точках 1, 2; 3, 4 – показания термопар в точках 1, 2 (см. рис. 2)

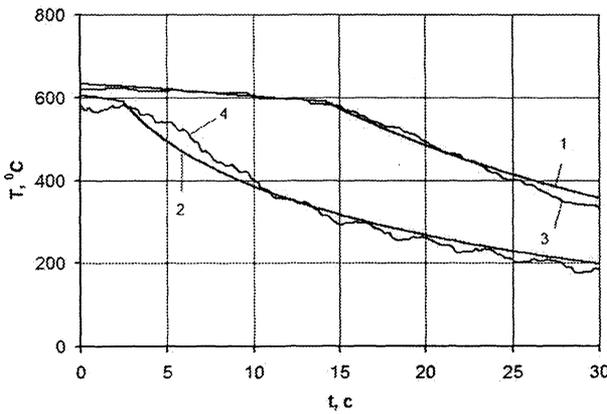


Рис. 7. Зависимость температур в отливке диаметром 118 мм от времени затвердевания в устройстве вторичного охлаждения: 1, 2 – расчетные температуры в точках 1, 2; 3, 4 – показания термопар в точках 1, 2 (см. рис. 2)

где  $\Theta_{ij} = \frac{T(r_i, t_j)}{T_s}$ ;  $p = \frac{nr_1}{r_3}$ ;  $k = \frac{nr_2}{r_3}$  ( $n$  – число узлов сетки).

Для проверки математической модели на адекватность были произведены расчеты зависимости температуры в отливках из сплава АК18 диаметрами 50, 69 и 118 мм в точках 1 и 2 (см. рис. 2) от времени затвердевания с помощью написанного программного обеспечения в среде программирования Delphi 7.0. Программа также позволяет рассчитать зависимость толщины затвердевшей корки отливки в устройстве вторичного охлаждения от времени. При расчетах использовали следующие значения констант:  $\lambda_1 = 83$  Вт/(м·К),  $\lambda_2 = 104$  Вт/(м·К),  $\lambda_3 = 104$  Вт/(м·К),  $\rho_1 = 2200$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 2500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_3 = 2500$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1 = 1275$  Дж/(кг·К)  $L = 3,65 \cdot 10^5$  Дж/кг [3]. Результаты расчетов сравнивали с показаниями термопар для отливок диаметрами 50, 69 и 118 мм (рис. 5–7).

Как видно из рисунков, погрешность расчетов не превышает 12%.

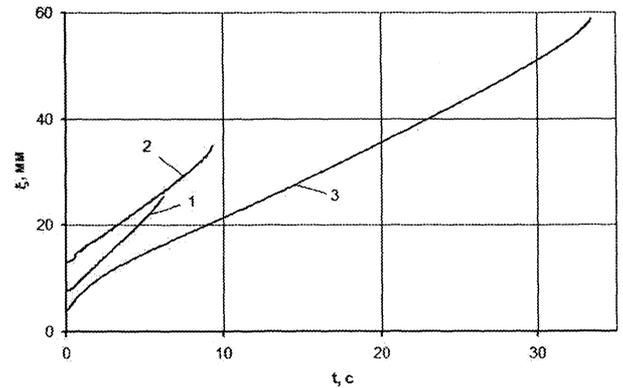


Рис. 8. Зависимость толщины корки отливки от времени затвердевания в устройстве вторичного охлаждения: 1 – диаметр отливки 50 мм; 2 – 69; 3 – 118 мм

С помощью написанного программного обеспечения были произведены расчеты толщины затвердевшей корки отливки в устройстве вторичного охлаждения от времени (рис. 8).

На основании полученных зависимостей толщины затвердевшей корки отливок различных диаметров от времени определяли зависимость средней линейной скорости затвердевания отливки в устройстве вторичного охлаждения от диаметра заготовок (рис. 9).

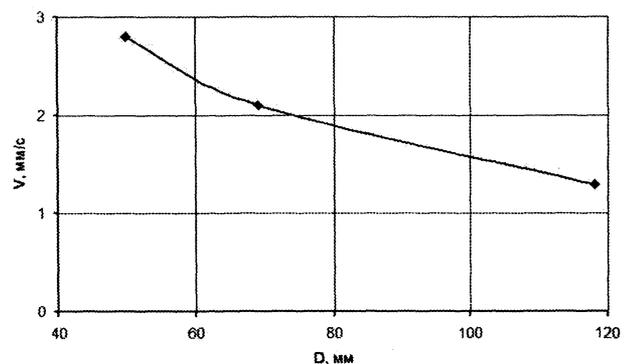


Рис. 9. Зависимость средней линейной скорости затвердевания отливки от диаметра заготовки

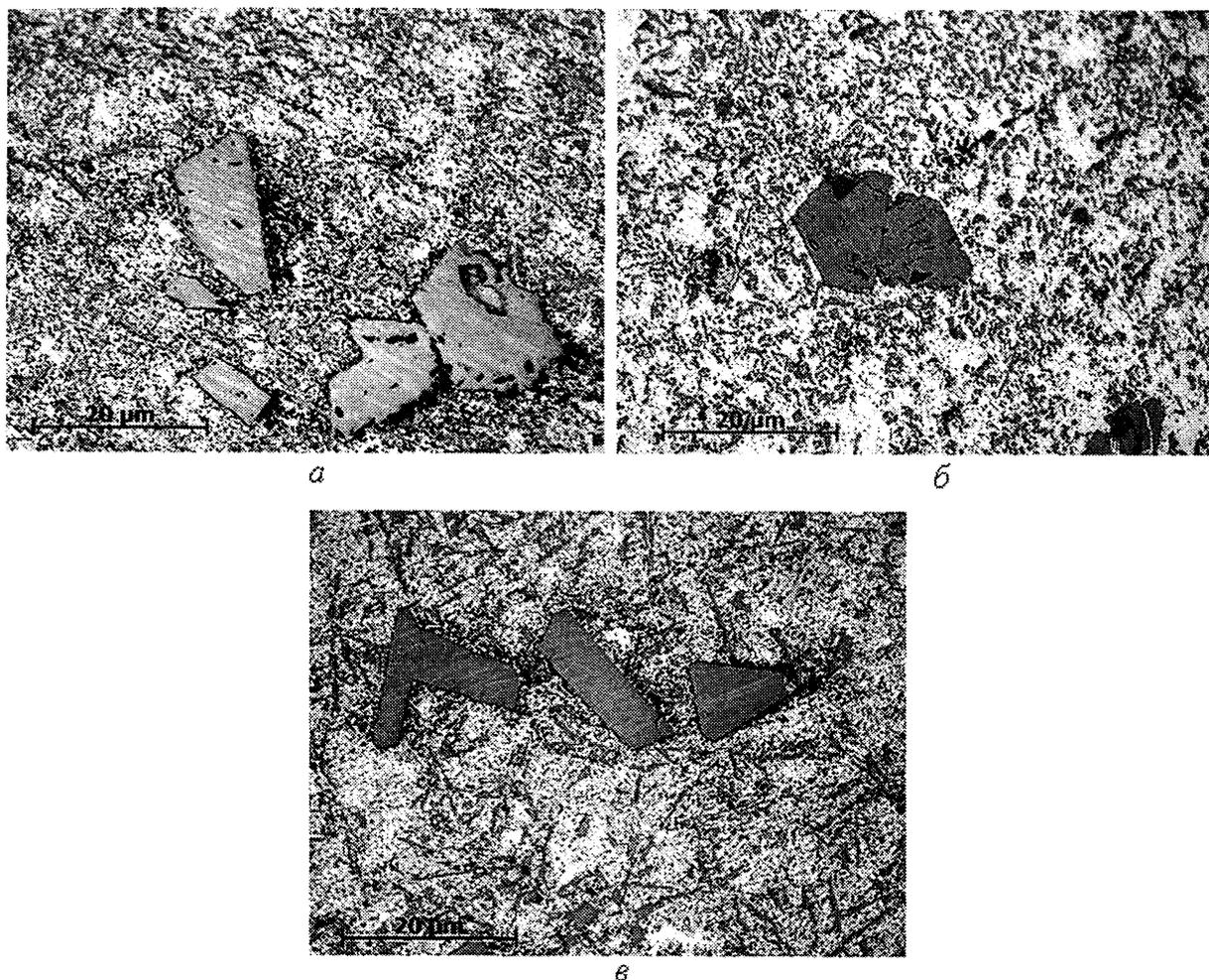


Рис. 10. Микроструктура заготовок, полученных методом литья закалочным затвердеванием из сплава АК18, диаметром 50 мм (а); 69 мм (б); 70 мм (в)

Из средней части полученных отливок были вырезаны поперечные шлифы. После их шлифовки, полировки и химического травления раствором кислот ( $2\% \text{HCl} + 3\% \text{HNO}_3 + 1\% \text{HF}$ ) микроструктуру образцов анализировали с помощью аппаратно-программного комплекса на базе микроскопа «Carl Zeiss Axiotech 100 vario». Методом металлографического анализа было установлено, что уменьшение диаметра заготовки почти не оказывало влияния на дисперсность кристаллов первичного кремния. При уменьшении диаметра отливки с 118 до

50 мм кристаллы эвтектического кремния диспергировались от 1,2 до 0,6 мкм (рис. 10). Следовательно, уменьшение диаметра заготовки из сплава АК18 позволяет диспергировать в основном кристаллы эвтектического кремния.

Таким образом, разработана и проверена на адекватность математическая модель процесса затвердевания отливки при ее струйном охлаждении водой, позволяющая определить линейную скорость затвердевания в зависимости от диаметра заготовки.

### Литература

1. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Получение отливок из эвтектического силумина методом литья закалочным затвердеванием // *Литье и металлургия*. 2005. № 2. С. 142–144.
2. Вейник А. И. Расчет отливки. М.: Машиностроение, 1964.
3. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. I. М.: Машиностроение, 1979.