
НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ

УДК 669.715:621.74.043:620.178.15

Ф. М. Котлярский, А. Г. Борисов, И. В. Хвостенко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПРЯМОГО ТЕРМИЧЕСКОГО МЕТОДА РЕОЛИТЬЯ

Выполнен тепловой расчет прямого термического метода реолитья, включающий новый графический способ оперативного определения комплекса взаимосвязанных технологических параметров (температура заливки расплава, толщина стенки и исходная температура кокиля) для обеспечения требуемого содержания твердой фазы в отливке к моменту выравнивания температур отливки и кокиля, что представляет интерес в плане выявления и оптимизации факторов образования недендритной структуры.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, реолитье, недендритная структура, технологические параметры, тепловой расчет, графическое решение.

Виконано тепловий розрахунок прямого термічного методу реолиття, який включає новий графічний спосіб оперативного визначення комплексу взаємопов'язаних технологічних параметрів (температура заливки розплаву, товщина стінки та вихідна температура кокілю) для забезпечення потрібного вмісту твердої фази в виливку на момент вирівнювання температур виливка і кокіля, що може бути цікавим в плані виявлення та оптимізації факторів утворення недендритної структури.

Ключові слова: алюмінієві сплави, реолиття, недендритна структура, технологічні параметри, тепловий розрахунок, графічне рішення.

Thermal calculations for direct thermal method of rheocasting were performed using new graphic method. This method permits quick determination of set of interconnected technological parameters (temperature of pouring, thickness of the wall and started temperature of mould) for provision of necessary portion of solid phase to the moment of temperature equilibrium between casting and mould. Results obtained can be used for optimization of non-dendrite structure.

Keywords: aluminium alloys, rheocasting, non-dendrite structure, technological parameters, heat consideration, graphic solution.

При реализации и исследовании прямого термического метода реолитья в плане выявления и оптимизации факторов образования недендритной структуры представляют интерес определение момента выравнивания температур отливки и кокиля в зависимости от технологических параметров литья и обеспечение к этому моменту заданной концентрации твердой фазы в отливке. Способ решения этой задачи может быть как аналитическим, так и графическим.

Аналитический расчет

Выделяемая отливкой теплота включает несколько составляющих.

1. Теплота перегрева

$$q_1 = m \cdot T_{\text{пер}} \cdot C_{\text{ж}},$$

где m – масса отливки, г; $T_{\text{пер}} = T_{\text{зал}} - T_{\text{лик}}$ – температура перегрева; $T_{\text{зал}}$ и $T_{\text{лик}}$ – температуры заливки и ликвидуса (для сплава АК7 $T_{\text{лик}} = 617 \text{ }^\circ\text{C}$); $C_{\text{ж}}$ – удельная теплоемкость расплава $\approx 1,26 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

2. Теплоту кристаллизации в интервале температур, судя по рис. 1, можно разделить на два участка: а – вертикальный приликвидусный, на котором выделяется около 13 % твердой фазы; б – наклонный прямолинейный, соединяющий окончание приликвидусного участка с началом эвтектической кристаллизации, на котором выделяется около 37 % твердой фазы. Тогда

$$q_{2a} = m \cdot 0,13 \cdot L_2 \text{ Дж},$$

где L_2 – удельная теплота кристаллизации в интервале температур (для АК7 $L_2 = 407 \text{ Дж}/\text{г}$)

$$q_{2б} = m \cdot 0,37 \cdot L_2 \text{ Дж}.$$

Это для всего наклонного интервала температур. Если же понадобится определить $q_{2б}$ для части интервала температур кристаллизации ΔT , отсчитываемой от $T_{\text{лик}}$,

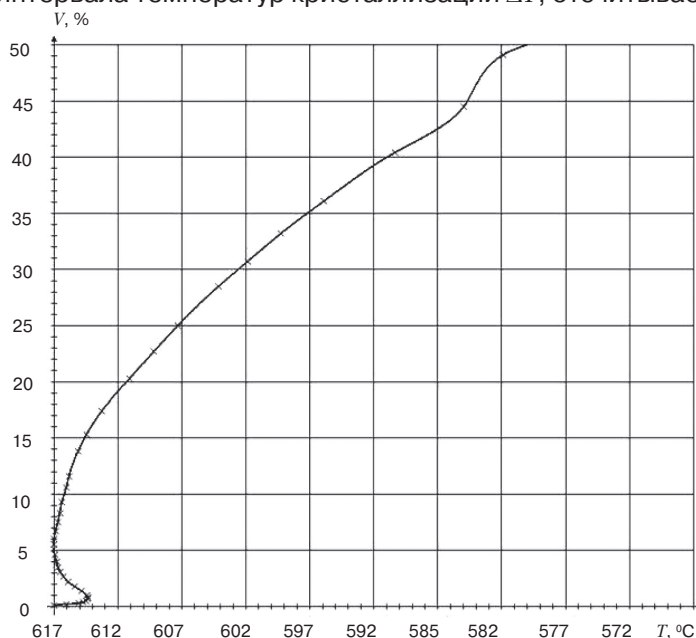


Рис. 1. Кривая изменения содержания твердой фазы в интервале температур кристаллизации α -твердого раствора силумина АК7ч

$$\text{то} \quad q_{26} = m \cdot 0,37 \cdot L_2 \frac{\Delta T}{T_{\text{лик}} - T_3} \text{Дж},$$

где T_3 – эвтектическая температура.

3. Теплота кристаллизации эвтектики

$$q_3 = m \cdot 0,5 \cdot L_3 \text{Дж},$$

где L_3 – удельная теплота кристаллизации эвтектики (для АК7 $L_3 = 462$ Дж/г).

4. Теплота охлаждения отливки

$$q_4 = m \cdot \Delta T_{\text{охл}} \cdot C_{\text{ТВ}},$$

где $\Delta T_{\text{охл}} = T_3 - T_{\text{охл}}$ – интервал температур охлаждения, °С; $T_{\text{охл}}$ – конечная температура охлаждения, °С; $C_{\text{ТВ}}$ – удельная теплоемкость твердого сплава АК7 (~0,97 Дж/(г · °С)).

Поглощаемая кокилем теплота

$$Q = M \cdot (T_2 - T_1) C_{\text{К}},$$

где M – масса кокиля, г; T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры кокиля, °С; $C_{\text{К}}$ – удельная теплоемкость материала кокиля (для чугуна $C_{\text{К}} = 0,546$ Дж/(г · °С); для стали $C_{\text{К}} = 0,55$ Дж/(г · °С)).

Выполненными замерами установлено, что цилиндрические вытряхные кокильки с внутренним диаметром 21 мм и толщинами стенок 2; 4; 6; 10 мм имели массу соответственно 61; 132; 218; 430 г, а объем отливок составлял соответственно 13,2; 14,4; 13,8; 13,5 см³. Для сплава АК7 при плотности заливаемого расплава около 2,5 г/см³ масса отливок составила соответственно 33; 36; 34,5; 33,8 г. Для выполнения расчетов можно принять среднюю массу отливки 34,3 г. Тогда на этапе снятия перегрева при температуре заливки расплава 620 °С и толщине кокиля 2 мм с исходной температурой 20 °С

$$q_1 = 34,3 \cdot 3 \cdot 1,26 = 129,7 \text{ Дж}.$$

При этом отливка приобретает температуру $T_{01} = T_{\text{лик}} = 617$ °С.

Поглощаемая кокилем теплота $Q_1 = 61 (T_2 - 20) 0,55 = 33,6 T_2 - 671$.

При $Q_1 = q_1 = 129,7 = 33,6 T_2 - 671$ $T_2 = 23,8$ °С.

На следующих этапах

$$q_{2a} = 34,3 \cdot 0,13 \cdot 407 = 1814,8 \text{ Дж};$$

$$Q_{2a} = 61 (T_2 - 23,8) 0,55 = 33,6 T_2 - 798,5 \text{ Дж}.$$

При $Q_{2a} = q_{2a}$ $T_2 = 77,8$ °С.

$$q_{26} = 34,3 \cdot 0,37 \cdot 407 = 5165,2 \text{ Дж}.$$

При $Q_{26} = q_{26}$ $5165,2 = 61 (T_2 - 77,8) 0,55 = 33,6 T_2 - 2610,2$

$$T_2 = 231,4 \text{ °С};$$

$$q_3 = 34,3 \cdot 0,5 \cdot 462 = 7923,3 \text{ Дж}; T_{03} = T_3 = 580 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\text{При } Q_3 = q_3 \quad 7923,3 = 61 (T_2 - 231,4) 0,55 = 33,6 T_2 - 7763,5$$

$$T_2 = 466,9 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q_4 = 34,3 (580 - T_{04}) 0,97 = 19297,2 - 33,3 T_{04} \text{ Дж}; (T_{04} = T_{\text{охл}});$$

$$Q_4 = 61 (T_{04} - 466,9) 0,55 = 33,6 T_{04} - 15664,5 \text{ Дж}.$$

$$\text{При } Q_4 = q_4 \quad 33,6 T_{04} - 15664,5 = 19297,2 - 33,3 T_{04}$$

$$66,9 T_{04} = 34961,7; \quad T_{04} = 522,6 \text{ }^\circ\text{C} = T_{к4}.$$

Таким образом, расчетное выравнивание температур отливки T_0 и кокиля $T_к$ произошло при $522,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Регулировать положение этой точки ($T_в$) при неизменной толщине стенки кокиля можно температурой заливки расплава, то есть перегревом, и исходной температурой кокиля. Например, для поднятия $T_в$ до температуры, при которой выделится 50 % твердой фазы, то есть до начала эвтектической кристаллизации, кокилю с исходной температурой $20 \text{ }^\circ\text{C}$ нужно передать тепла

$$Q = 61 (580 - 20) 0,55 = 18788 \text{ Дж}.$$

К этому моменту за счет кристаллизации 50 % расплава отливки выделится тепло $q = 34,3 \cdot 0,5 \cdot 407 = 6980 \text{ Дж}$.

Остальное тепло $18788 - 6980 = 11808 \text{ Дж}$ нужно взять за счет перегрева расплава

$$T_{\text{зал}} - T_{\text{лик}} = \frac{11808}{34,3 \cdot 1,26} = 273,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Откуда $T_{\text{зал}} = 617 + 273,2 = 890,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Если оставить температуру заливки прежней ($620 \text{ }^\circ\text{C}$), то того же результата можно достичь за счет нагрева кокиля до температуры T_1 , определяемой из уравнения баланса теплот

$$q_1 + q_{2a} + q_{26} = 61 (580 - T_1) 0,55;$$

$$129,7 + 1814,8 + 5165,2 = 19459 - 33,6 T_1; T_1 = 367,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Расчет выравнивания температур ($T_в$) при $\delta_к = 4 \text{ мм}$, $T_3 = 620 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_к = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$q_1 = 129,7 \text{ Дж}; T_0 = 617 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$Q_1 = 132 (T_2 - 20) 0,55 = 129,7 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{1452 + 129,7}{72,6} = 21,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q_{2a} = 1814,8 \text{ Дж}; Q_{2a} = 132 (T_2 - 21,8) 0,55 = 1814,8 \text{ Дж};$$

$$T_2 = 46,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q_{26} = 5165,2 \text{ Дж}; Q_{26} = 132 (T_2 - 46,8) 0,55 = 5165,2 \text{ Дж};$$

$$T_2 = 117,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$q_3 = 7923,3 \text{ Дж}; T_0 = 580 \text{ } ^\circ\text{C}; Q_3 = 132 (T_2 - 117,9) \cdot 0,55 = 7923,3 \text{ Дж};$$

$$T_2 = 227,0 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$q_4 = 19297,2 - 33,3 T_{04} \text{ Дж}; Q_4 = 132 (T_{04} - 227,0) \cdot 0,55 = 72,6 T_{04} - 16480,2 \text{ Дж};$$

$$19297,2 - 33,3 T_{04} = 72,6 T_{04} - 16480,2 \quad 105,9 T_{04} = 35777,4;$$

$$T_{04} = 337,8 \text{ } ^\circ\text{C} = T_{к4}.$$

Аналогично для $\delta_k = 6 \text{ мм}$, $T_3 = 620 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_k = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_1 = Q_1$ $T_2 = 21,1 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_{2a} = Q_{2a}$ $T_2 = 36,2 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_{26} = Q_{26}$ $T_2 = 79,3 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_3 = Q_3$ $T_2 = 145,4 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_4 = Q_4$ $T_{04} = 239,8 \text{ } ^\circ\text{C} = T_{к4}$.

Аналогично для $\delta_k = 10 \text{ мм}$, $T_3 = 620 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_k = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_1 = Q_1$ $T_2 = 20,55 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_{2a} = Q_{2a}$ $T_2 = 28,2 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_{26} = Q_{26}$ $T_2 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_3 = Q_3$ $T_2 = 83,5 \text{ } ^\circ\text{C}$;

при $q_4 = Q_4$ $T_{04} = 144,7 \text{ } ^\circ\text{C} = T_{к4}$.

Расчет T_B при $\delta_k = 2 \text{ мм}$, $T_3 = 620 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_k = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$Q_1 = 61 (T_2 - 400) \cdot 0,55 = 33,6 T_2 - 13420 = q_1 = 129,7 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{13420 + 129,7}{33,6} = 403,3 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_{2a} = 61 (T_2 - 403,3) \cdot 0,55 = 33,6 T_2 - 13530,7 = q_{2a} = 1814,8 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{13530,7 + 1814,8}{33,6} = 456,7 \text{ } ^\circ\text{C};$$

Полагая, что выравнивание температур может произойти на участке 26,

$$q_{26} = m \cdot 0,37 \cdot 407 \cdot \frac{\Delta T}{T_{лик} - T_3} = 34,3 \cdot 0,37 \cdot 407 \cdot \frac{\Delta T}{617 - 580} = 139,6 \Delta T \text{ Дж};$$

$$Q_{26} = 61 (T_2 - 456,7) \cdot 0,55 \text{ Дж}.$$

В данном случае $T_2 = T_{лик} - \Delta T$;

$$Q_{26} = 61 (T_{л} - \Delta T - 456,7) \cdot 0,55 = 61 (617 - \Delta T - 456,7) \cdot 0,55 = 61 (160,3 - \Delta T) \times \\ \times 0,55 = 5378,1 - 33,6 \Delta T = 139,6 \Delta T;$$

$$\Delta T = \frac{5378,1}{173,2} = 31,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Следовательно, выравнивание температур произойдет при $617,0 - 31,1 = 585,9 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Поскольку между ликвидусом и эвтектической температурой выделяется около 50 % твердой фазы, то при температуре $585,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ выделится

$$50 \frac{\Delta T}{T_{\text{лик}} - T_{\text{э}}} = 50 \frac{31,1}{37} = 42 \text{ } \%$$

Расчет $T_{\text{в}}$ при $\delta_{\text{к}} = 4 \text{ мм}$, $T_3 = 620 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_{\text{к}} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$$Q_1 = 132 (T_2 - 400) 0,55 = 72,6 T_2 - 29040 = q_1 = 129,7 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{29040 + 129,7}{72,6} = 401,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_{2\text{а}} = 132 (T_2 - 401,8) 0,55 = 72,6 T_2 - 29170,7 = q_{2\text{а}} = 1814,8 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{29170,7 + 1814,8}{72,6} = 426,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_{2\text{б}} = 132 (T_2 - 426,8) 0,55 = q_{2\text{б}} = 5165,2;$$

$$72,6 T_2 - 30985,7 = 5165,2;$$

$$T_2 = \frac{30985,7 + 5165,2}{72,6} = 497,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Полагая, что выравнивание температур может произойти во время эвтектической кристаллизации, $q_3 = 7923,3 \cdot K_3 \text{ Дж}$, где K_3 – часть теплоты эвтектической кристаллизации, ушедшей на выравнивание температур.

$$Q_3 = 132 (T_2 - 497,9) 0,55 \text{ Дж}$$

при $T_2 = T_3 = 580 \text{ } ^\circ\text{C}$ $Q_3 = 132 \cdot 82,1 \cdot 0,55 = 5960,5 \text{ Дж}.$

Тогда $7923,3 \cdot K_3 = 5960,5$; $K_3 = \frac{5960,5}{7923,3} = 0,75$, что составит $0,75 \cdot 50 = 37,5 \text{ } \%$ затвер-

девшей эвтектики или 87,5 % всей твердой фазы, выделившейся в отливке к данному моменту.

Расчет $T_{\text{в}}$ при $\delta_{\text{к}} = 6 \text{ мм}$; $T_3 = 620 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_{\text{к}} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$$Q_1 = 218 (T_2 - 400) 0,55 = 119,9 T_2 - 47960 = q_1 = 129,7 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{47960 + 129,7}{119,9} = 401,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_{2a} = 218 (T_2 - 401,1) 0,55 = 119,9 T_2 - 48091,9 = q_{2a} = 1814,8 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{48091,9 + 1814,8}{119,9} = 416,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_{2b} = 218 (T_2 - 416,2) 0,55 = 119,9 T_2 - 49902,4 = q_{2b} = 5165,2 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{49902,4 + 5165,2}{119,9} = 459,3 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_3 = 218 (T_2 - 459,3) 0,55 = 119,9 T_2 - 55070,1 = q_3 = 7923,3 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{55070,1 + 7923,3}{119,9} = 525,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$q_4 = 19297,2 - 33,3 T_{04} \text{ Дж}; Q_4 = 218 (T_{04} - 525,4) 0,55 = 119,9 T_{04} - 62995,5 \text{ Дж};$$

$$19297,2 - 33,3 T_{04} = 119,9 T_{04} - 62995,5; 153,2 T_{04} = 82292,7;$$

$$T_{04} = \frac{82292,7}{153,2} = 537,2 \text{ } ^\circ\text{C} = T_B.$$

Расчет T_B при $\delta_k = 10 \text{ мм}$, $T_3 = 620 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_k = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$Q_1 = 430 (T_2 - 400) 0,55 = 236,5 T_2 - 94600 = q_1 = 129,7 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{94600 + 129,7}{236,5} = 400,55 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_{2a} = 430 (T_2 - 400,55) 0,55 = 236,5 T_2 - 94730,1 = q_{2a} = 1814,8 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{94730,1 + 1814,8}{236,5} = 408,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_{2b} = 430 (T_2 - 408,2) 0,55 = 236,5 T_2 - 96539,3 = q_{2b} = 5165,2 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{96539,3 + 5165,2}{236,5} = 430 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_3 = 430 (T_2 - 430) 0,55 = 236,5 T_2 - 101695 = q_3 = 7923,3 \text{ Дж};$$

$$T_2 = \frac{101695 + 7923,3}{236,5} = 463,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Q_4 = 430 (T_{04} - 463,5) 0,55 = 236,5T_{04} - 109617,8 = q_4 = 19297,2 - 33,3 T_{04}$$

$$269,8 T_{04} = 128915; T_{04} = 477,8 \text{ } ^\circ\text{C} = T_{\text{в}}$$

Графическое решение

Из аналитической части расчета видно, что температура кокиля выражается линейной зависимостью $T_{\text{к}} = T_{\text{исх}} + KQ$, где $K = \frac{1}{M \cdot C_{\text{к}}}$, то есть расчетные значения

коэффициента K в зависимости от толщины стенки кокиля составляют, $^\circ\text{C}/\text{Дж}$: $K_2 = 0,03$; $K_4 = 0,014$; $K_6 = 0,0083$; $K_{10} = 0,0042$, где индексы при K указывают толщину стенки кокиля в мм. Эти линейные зависимости представлены в виде графиков на рис. 2 (линии 2-5). На этом же рисунке в виде ломаной кривой 1 показана графическая зависимость температуры отливки (T_0) от количества переданной ей теплоты

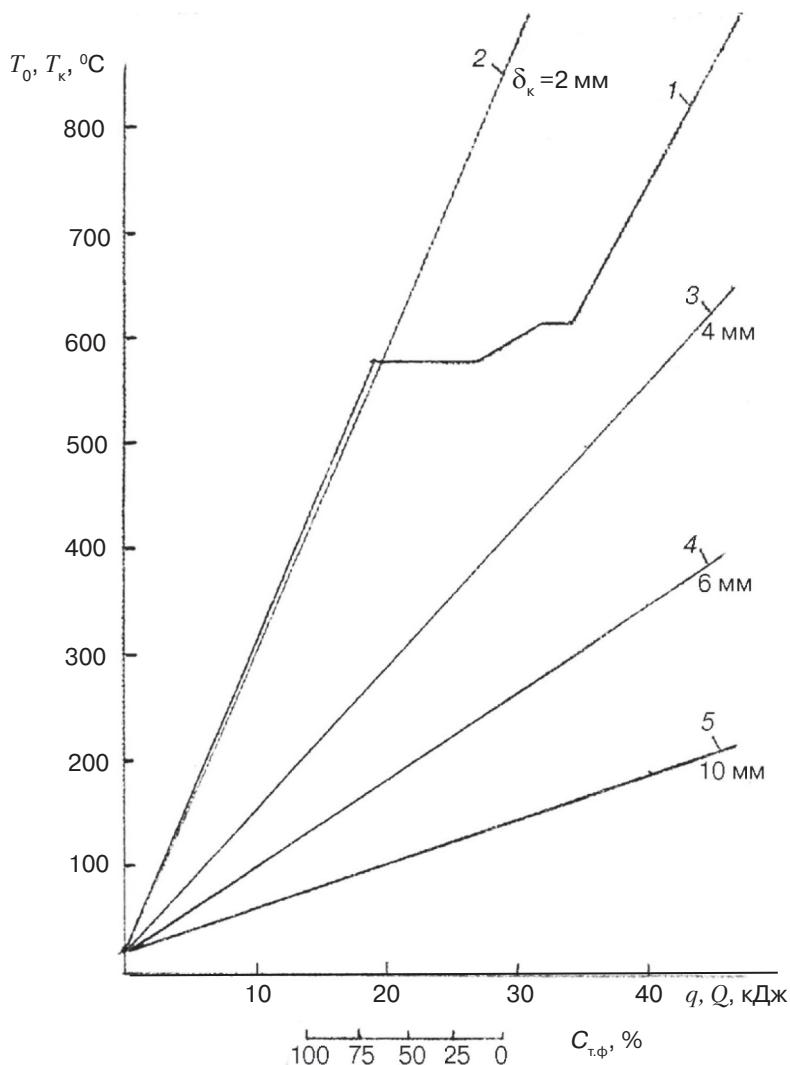


Рис. 2. Температура отливки из сплава АК7 (1) и стального кокиля (2-5) в зависимости от количества переданной им теплоты (q, Q) и толщины стенки кокиля ($\delta_{\text{к}}$) при исходной температуре кокиля $20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Новые методы и прогрессивные технологии литья

(q), построенная по данным аналитической части расчета. Участок этой кривой, отражающий процесс плавления (кристаллизации) в интервале температур 580-617 °С спроектирован вниз (ниже горизонтальной оси теплот) в виде шкалы содержания твердой фазы $C_{т.ф}$, в %. Середина этой шкалы (50 %) соответствует окончанию плавления или началу кристаллизации эвтектики. Точка излома кривой 1 в интервале кристаллизации при температуре ликвидуса соответствует 13 % твердой фазы.

В целом рис. 2 представляет собой скелет дальнейших графических манипуляций для определения ключевой точки выравнивания температур T_B между отливкой и кокилем в зависимости от температуры заливки расплава и исходной температуры кокиля ($T_{исх}$), а также для определения концентрации твердой фазы при T_B , если эта точка окажется в интервале кристаллизации.

На рис. 3 показано, каким образом определяется T_B в зависимости от толщины стенки кокиля при температуре заливки расплава АК7 620 °С и исходной температуре кокиля 20 °С. Методика определения включает несколько операций. Вначале из точки на кривой 1, соответствующей температуре заливки, опускается перпендикуляр (П) на горизонтальную ось. Точка пересечения перпендикуляра с осью

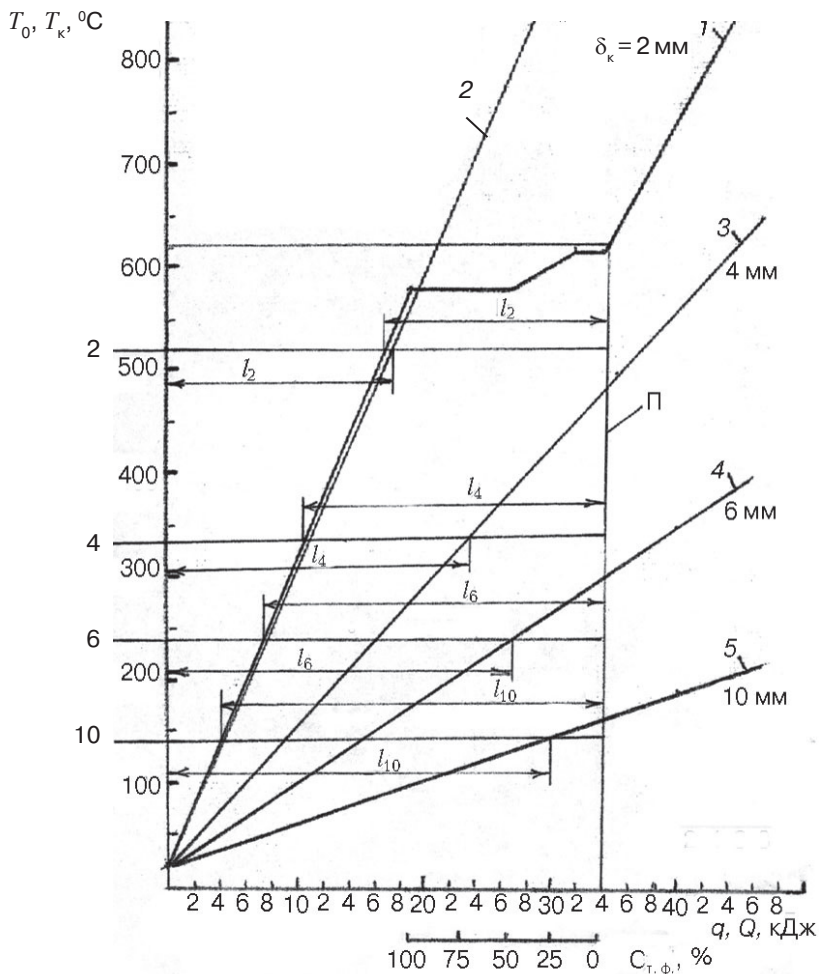


Рис. 3. Выравнивание температур между отливкой и кокилем в зависимости от толщины стенки кокиля при температуре заливки расплава АК7 620 °С и исходной температуре кокиля 20 °С

показывает, какое количество теплоты вобрала в себя отливка при температуре заливки, если ее начальная температура составляла 20 °С. Количество теплоты отливки при любой другой температуре между температурой заливки (620 °С) и 20 °С будет определяться расстоянием между П и кривой 1 при заданной температуре. При этой же заданной температуре можно определить и теплосодержание кокиля, например, при толщине стенки 2 мм оно будет соответствовать расстоянию между вертикальной осью температур и наклонной линией 2. Не составляет труда найти такую температуру, при которой теплосодержание отливки и кокиля уравнивается, то есть когда l_2 между П и кривой 1 будет равно l_2 между осью температур и наклонной линией 2. Это и будет искомая температура T_B , в данном случае она будет равна ~520 °С. По мере увеличения толщины стенки угол между температурной осью и линиями температурной зависимости кокилей от теплосодержания будет увеличиваться, а следовательно, увеличивается и расстояние между ними, поэтому температуру T_B нужно искать на более низких уровнях. В итоге для толщин стенок кокиля 4; 6; 10 мм эта температура составит соответственно около 335 ($l_4 = l_4$); 240 ($l_6 = l_6$); и 140 °С ($l_{10} = l_{10}$). Уровни этих температур вынесены за пределы температурной оси и обозначены цифрами, соответствующими толщинам стенок кокилей.

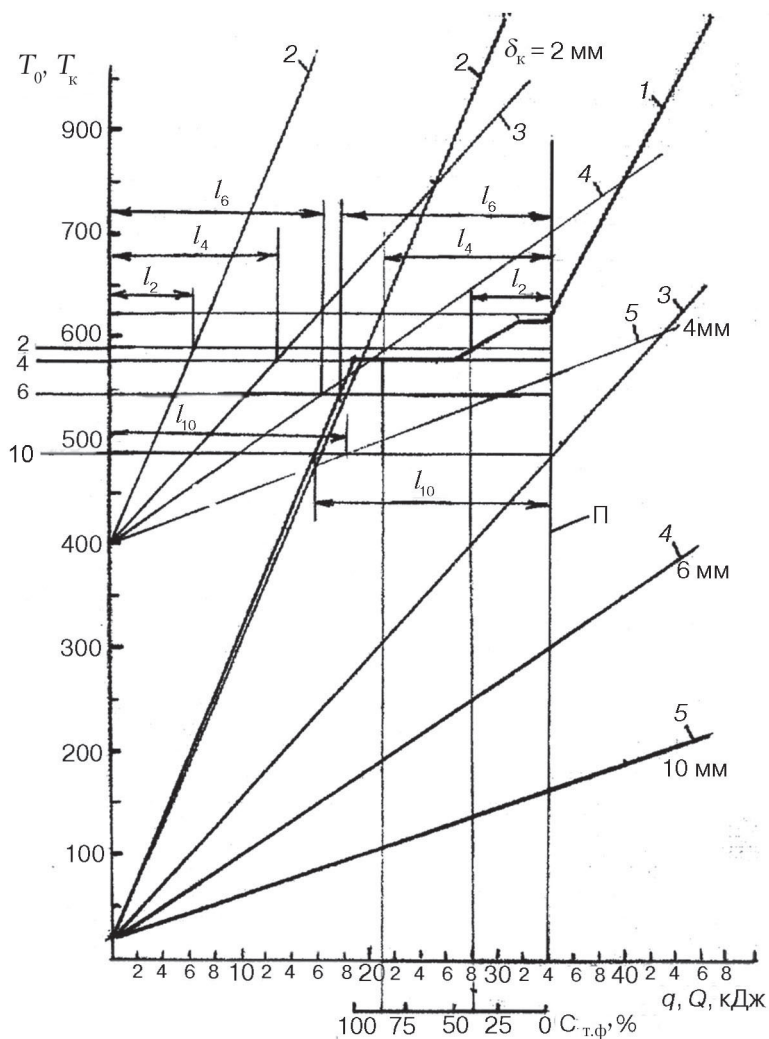


Рис. 4. Выравнивание температур между отливкой и кокилем в зависимости от толщины стенки кокиля при температуре заливки расплава АК7 620 °С и исходной температуре кокиля 400 °С

Как видно, полученные графическим методом значения T_B достаточно близки к значениям, определенным аналитическим путем (522,6; 337,8; 239,8 и 144,7 °С), что подтверждает их адекватность. С повышением точности графических построений отклонения будут уменьшаться.

На рис. 4 проделано то же самое, что и на рис. 3, только при исходной температуре кокиля 400 °С. Соответственно линии температурной зависимости кокилей от теплосодержания выходят из этой температуры, но сохраняют параллельность аналогичным линиям, выходящим из температуры 20 °С. После тех же графических манипуляций для толщин стенок кокилей 2; 4; 6; 10 мм значения T_B оказались равными соответственно 590; 580; 545 и 480 °С (полученные аналитическим путем значения T_B : 585,9; 580; 537,2; 477,8 °С).

Выравнивание температур между отливкой и кокилями с толщинами стенок 2 и 4 мм произошло в интервале температур кристаллизации. Для таких случаев графический метод позволяет определить содержание твердой фазы в отливке, устанавливающееся к данному моменту. Для этого достаточно из точек кривой 1, удаленных от линии П на расстояние l_2 (кокиль с толщиной стенки 2 мм) и l_4 (кокиль с толщиной

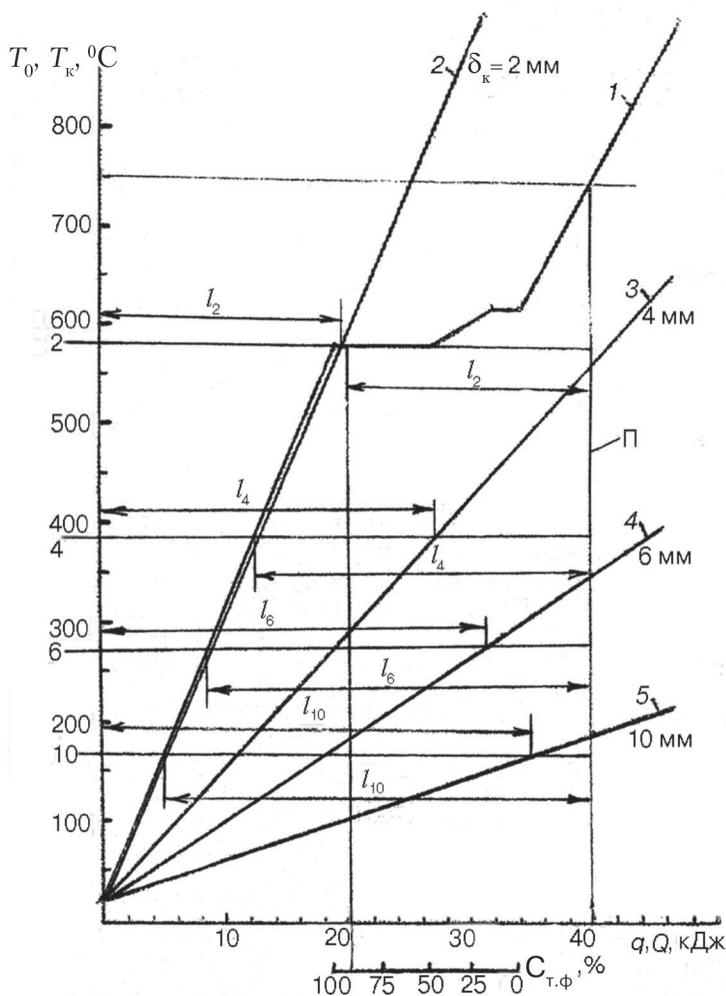


Рис. 5. Влияние повышения температуры заливки расплава АК7 (до 750 °С) на выравнивание температур между отливкой и кокилем в зависимости от толщины стенки кокиля при исходной температуре кокиля 20 °С

стенки 4 мм), опустить перпендикуляры к горизонтальной оси до пересечения с расположенной ниже этой оси шкалой содержания твердой фазы. В результате для первого случая это содержание составило 38,5 %, для второго – 87,5 % (при аналитическом расчете эти значения составили 42 и 87,5 %).

Влияние повышения температуры заливки до 750 °С при исходной температуре кокиля 20 °С на T_B рассмотрено на рис. 5. Здесь представляет интерес кокиль с толщиной стенки 2 мм. Если при $T_3 = 620$ $T_B = 520$ °С (см. рис. 3), то в данном случае значение T_B повысилось до 580 °С и оказалось в интервале эвтектической кристаллизации с концентрацией твердой фазы в отливке около 90 %. В графическом плане эти изменения вызваны смещением линии П вправо. Наглядно видно, что дальнейшее повышение T_3 до определенной величины не будет влиять на протяженность l_2 , а, следовательно, и на температуру T_B отливки и кокиля, произойдет только уменьшение концентрации твердой фазы. Смещающаяся вправо линия П будет как бы тянуть за собой неизменяющийся по длине отрезок l_2 со стороны кривой 1, пока его левый конец не выйдет за пределы эвтектической площадки.

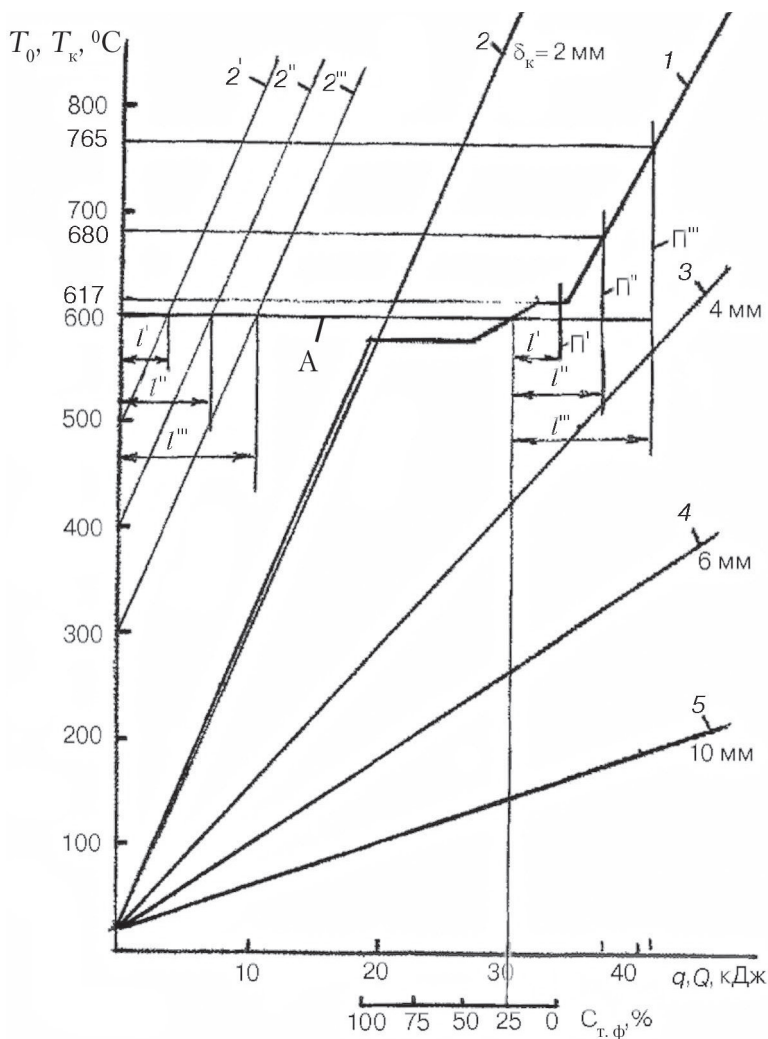


Рис. 6. Обеспечение требуемой концентрации твердой фазы к моменту выравнивания температур отливки и кокиля путем определенных сочетаний температуры заливки расплава и исходной температуры кокиля при данной толщине стенки кокиля

На рис. 6 решается задача обеспечения требуемой концентрации твердой фазы (25 %) к моменту выравнивания температур отливки и кокиля путем подбора нужных для этого сочетаний температуры заливки расплава и исходной температуры кокиля при данной толщине стенки кокиля (2 мм).

С помощью шкалы $C_{т.ф.}$ на кривой 1 находим точку, соответствующую 25 % твердой фазы, и соединяем ее перпендикуляром А с вертикальной температурной осью. Поскольку решение задачи строится на двух неизвестных, одним из них, например, исходной температурой кокиля, задаемся – 500 °С. Из точки этой температуры на вертикальной оси проводим наклонную линию 2', параллельную линии 2, – это будет графическое изображение температурно-тепловой зависимости кокиля с толщиной стенки 2 мм. Точка пересечения линий 2' и А, удаленная от температурной оси на расстояние l' , показывает, какое количество теплоты нужно передать кокилю, чтобы его температура поднялась до уровня линии А. Это количество теплоты нужно отобрать от отливки, чтобы она после этого также опустилась до уровня линии А.

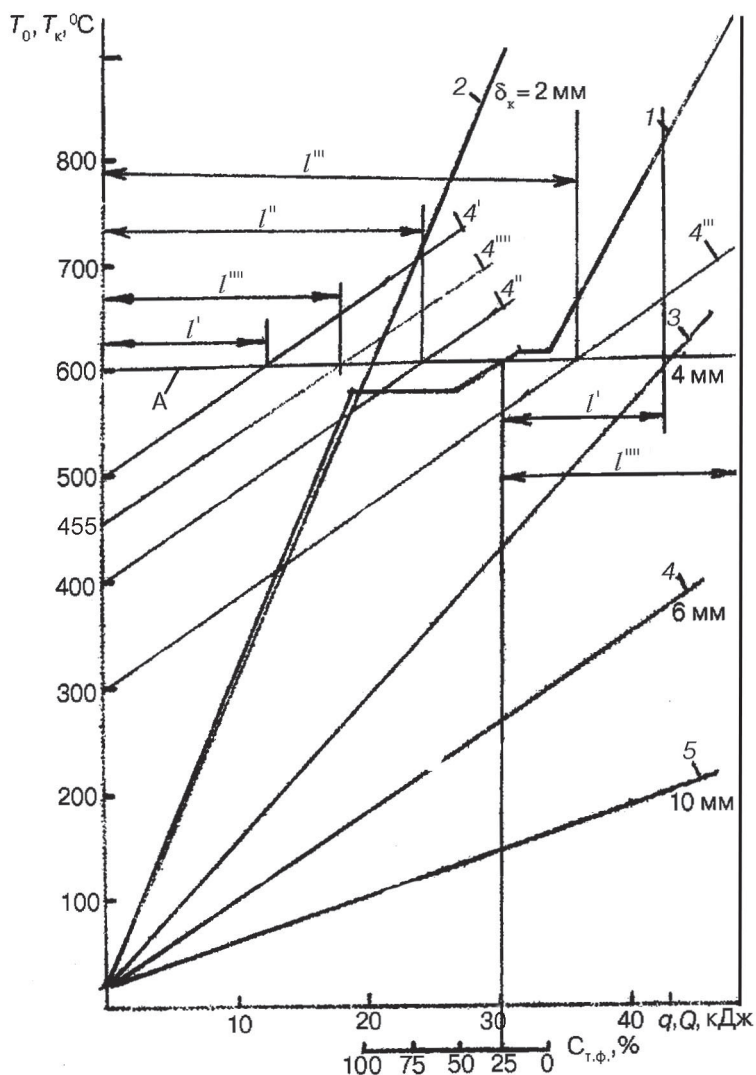


Рис. 7. Влияние толщины стенки кокиля для обеспечения требуемой концентрации твердой фазы к моменту выравнивания температур отливки и кокиля путем определенных сочетаний температуры заливки расплава и исходной температуры кокиля

Для этого на пересекающей кривую 1 продолжении линии А направо откладываем отрезок l' и из правого конца этого отрезка проводим перпендикуляр к горизонтальной тепловой оси П'. Точка пересечения этого перпендикуляра с кривой 1 обозначит нужную температуру заливки, поскольку при охлаждении отливки от этой температуры до пересечения кривой 1 с линией А выделится количество теплоты, равное l' . Искомая температура заливки оказалась равной 617 °С с концентрацией твердой фазы в расплаве 3 %.

Аналогичным образом выполнены решения с исходной температурой того же кокиля 400 и 300 °С. Как видно, соответствующие температуры заливки расплава составили 680 и 765 °С.

Рис.7 можно считать продолжением рис. 6 в том плане, что на нем проделано все то же самое, но по отношению к кокилю с толщиной стенки 6 мм. Оказалось, что для такого кокиля даже при его исходной температуре 500 °С выравнивание температур (T_B) при концентрации твердой фазы в отливке 25 % возможно при температуре заливки ~800 °С. На температурной оси рассматриваемого графика максимальная температура равна 945 °С. Для решения поставленной задачи ис-

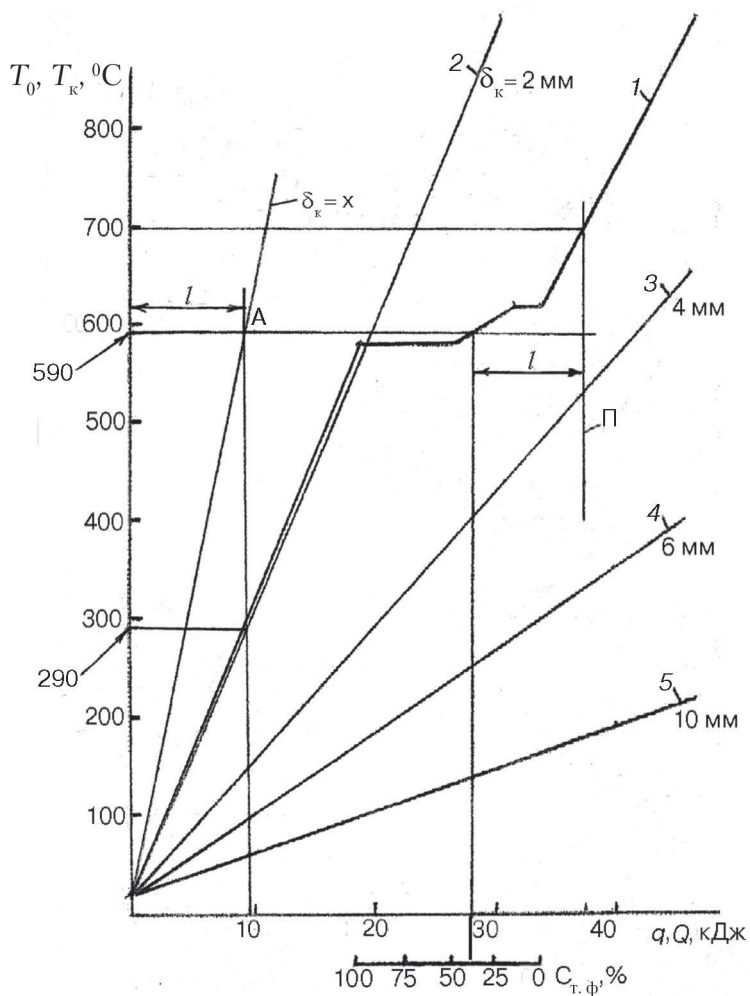


Рис. 8. Определение толщины стенки кокиля для обеспечения требуемого содержания твердой фазы в отливке (40 %) к моменту выравнивания температур отливки и кокиля при заданных температуре заливки расплава (700 °С) и исходной температуре кокиля (20 °С)

Новые методы и прогрессивные технологии литья

ходная температура кокиля при такой температуре заливки должна быть ~455 °С. Поэтому начатые решения с исходной температурой кокиля 400 и 300 °С остались незавершенными из-за отсутствия нужных температур заливки в рамках графиков.

На рис. 8 представлено решение задачи по определению толщины стенки кокиля для обеспечения требуемого содержания твердой фазы в отливке (40 %) к моменту выравнивания температур отливки и кокиля при заданных температуре заливки расплава (700 °С) и исходной температуре кокиля (20 °С). Сначала с помощью горизонтали от температурной оси на кривой 1 находим температуру заливки 700 °С и опускаем из нее вертикаль П. Затем с помощью вертикали от шкалы $C_{т.ф}$ на кривой 1 находим точку, соответствующую 40 % твердой фазы, и проводим из нее горизонталь до пересечения с температурной осью (590 °С) и линией П, удаленной от этой точки на расстояние l . Такое же расстояние откладываем от температурной оси по линии концентрации твердой фазы и через отмеренную точку А, и температуру 20 °С на температурной оси проводим линию $\delta_k = x$. Эта линия отражает температурную зависимость искомого кокиля от переданной ему теплоты. В точке А это количество теплоты будет равно количеству теплоты, переданной кокилю отливкой при ее охлаждении от температуры заливки до выделения 40 % твердой фазы ($l = l$). Через точку А проводим вертикаль до пересечения с линией 2 ($\delta_k = 2$ мм) и осью абсцисс. Как видно, при передаче равного количества теплоты кокилю с толщиной стенки 2 мм и искомому кокилю первый прогреется от 20 до 290 °С, а второй – от 20 до 590 °С. Понятно, что во сколько раз сильнее прогреется искомый кокиль, во столько раз будет тоньше его стенка. Поэтому искомая толщина стенки x будет равна

Морфология структуры отливок в зависимости от условий заливки

Температура заливки, °С	Температура кокиля, °С	Толщина стенки кокиля, мм			
		2	4	6	10
620	20	н 515/100	н 335/100	н 245/100	н 150/100
620	220	н 580/81	н 485/100	н 400/100	н 325/100
620	400	н 587/42	н 580/87,5	Д 540/100	Д 480/100
620	580	н 616/7	Д 616/13	н 610/18,5	н 600/31
630	20	н 520/100	н 340/100	н 247/100	н 152/100
630	220	н 580/79	н 485/100	н 405/100	н 327/100
630	400	н 590/39	н 580/85	н 545/100	Д 482/100
630	580	н 616/5,5	Д 616/12	Д 615/16	Д 602/30
660	20	н 540/100	Д 355/100	Д 250/100	Д 155/100
660	220	Д 580/71	Д 495/100	Д 410/100	Д 330/100
660	400	н 600/27,5	Д 580/74,5	Д 550/100	Д 485/100
660	580	Д 625/0	Д 616/4	Д 616/13	Д 605/23,5
750	20	Д 580/90	Д 390/100	Д	Д 165/100
750	220	585/46	530/100	–	345/100
750	400	616/11	580/50	–	500/100
750	580	680/0	–	–	616/13
950	580	Д	Д	Д	Д

Примечание: Д – дендритная структура; н – недендритная структура; в числителе – выравнивание температур отливки и кокиля, °С; в знаменателе – концентрация твердой фазы в этот момент, %

$$x = 2 : \frac{590 - 20}{290 - 20} = 0,95 \text{ мм} \approx 1 \text{ мм.}$$

В заключение следует отметить, что выполненный расчет не учитывает теплового взаимодействия кокиля с окружающей средой, то есть он адекватен при наличии теплоизоляции, окружающей кокиль. Если же такой изоляции нет, то рост температуры кокиля будет несколько замедлен, и выравнивание температур отливки и кокиля произойдет соответственно позже.

С использованием графического метода определены моменты выравнивания температур отливок и кокилей, а также образовавшиеся к этим моментам концентрации твердой фазы в конкретных экспериментальных условиях работ [2, 3] (таблица). Судя по полученным результатам, концентрация твердой фазы к моменту выравнивания температур отливки и кокиля не является определяющим фактором в плане получения недендритной структуры.



Список литературы

1. Отчет по теме НИР III-26-07.556. Исследование закономерностей теплосилового влияния на процессы формирования отливок из частично закристиллизованных алюминиевых сплавов. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2010. – 524 с.
2. Борисов А. Г. Розеткова та дендритна морфологія первинної фази при литті алюмінієвого сплаву у металевий кокиль // *Металознавство та обробка металів*. – 2010. – № 4. – С. 13-18.
3. Прогнозирование характера структуры слитков алюминиевого сплава, получаемого в тонкостенном металлическом кокиле / А. Г. Борисов, Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец и др. // *Процессы литья*. – 2012. – № 6. – С. 25-29.

Поступила 15.09.2013

**К сведению читателей
и подписчиков!**
**Телефон редакции
журнала «Процессы литья»:**
(044) 424-04-10