

10^6 К/с приводит к формированию мелкокристаллического строения α -твердого пересыщенного раствора с размером микрочерны 1...3 мкм.

Образцы из быстрозакаленных материалов были подвергнуты холодному компактированию с последующей горячей экструзией. Предел прочности образца из сплава алюминий—хром—цирконий после экструзии составил 340 МПа.

Таким образом, исследования показали, что применение высоких скоростей охлаждения расплава при закалке из жидкого состояния позволяет получать сплавы алюминия с уровнем легирования переходными металлами, значительно превосходящим уровни традиционных сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jones H. Rapid Solidification of Metals and Alloys. — London. The Institution of Metallurgists. — 1982. — 86 p. 2. Промышленные алюминиевые сплавы / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. — М.: Металлургия, 1984. — 528 с. 3. Morris L.R. Structure of continuously cast entectics used in the manufacture of fine-grained Aluminium Sheet // Solidification and Casting of Metals. — London, 1979. — P. 218–224. 4. Kalinichenko A.S., Bergmann H.W. Gefüge und Eigenschaften kontinuierlich gegossener dünner Aluminiumbänder // Aluminium. — 1984. — V. 60. — N 4. — P. 269–274.

УДК 621.783.224.1

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Э.А. ГУРВИЧ,
И.А. ТРУСОВА, Л.С. ТИМОШПОЛЬСКАЯ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СЛИТКОВ

Для исследования процесса затвердевания и охлаждения в изложнице листового слитка была рассмотрена плоская симметричная относительно оси OY (рис. 1) задача, справедливая для зоны крупных промышленных слитков, находящейся в интервале $1/2...2/3$ высоты изложницы [1].

Температурное поле слитка и изложницы описывается традиционным дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности

$$C_i(T) \rho_i(T) \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_i(T) \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} \right],$$

где для слитка $i = 1$, для изложницы $i = 2$.

При мгновенном заполнении небольшого участка изложницы жидким металлом начальные условия имеют вид

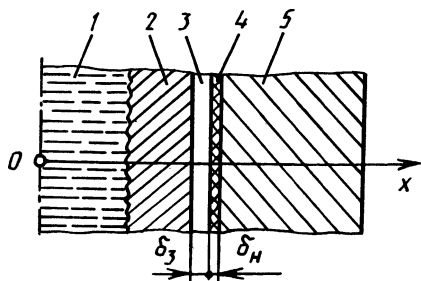
$$T(x, 0) = \begin{cases} T_{1,0}; \\ T_{2,0}. \end{cases}$$

Граничные условия на оси симметрии формулируются как

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0.$$

Рис. 1. Расчетная схема для листового слитка, затвердевающего в чугуниной изложнице:

1 — жидкая фаза; 2 — корка; 3 — газовый зазор; 4 — неметаллическое покрытие изложницы; 5 — изложница



Условия сопряжения полей температур слитка и изложницы с учетом газового зазора и внутреннего покрытия изложницы:

$$-\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x} = \frac{(T_1 - T_n) \left(\frac{\lambda_3}{\delta_3} + a_{п.з} \right) \frac{\lambda_n}{\delta_n}}{\frac{\lambda_n}{\delta_n} + \frac{\lambda_3}{\delta_3} + a_{п.з}} = -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x},$$

где $a_{п.з}$ — лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи от слитка к неметаллическому слою на внутренней поверхности изложницы: $a_{п.з} = \epsilon_{с.н} \sigma_0 (T_1 + T_n) (T_1^2 + T_n^2)$; $\epsilon_{с.н}$ — приведенная степень черноты; σ_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; λ_3 и δ_3 — коэффициент теплопроводности зазора и его величина; λ_n и δ_n — коэффициент теплопроводности неметаллического слоя и его величина.

На противоположной поверхности изложницы осуществляется радиационно-конвективный теплообмен с окружающей средой:

$$-\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=b} = \alpha_k (T_2 - T_0) + \epsilon \sigma_0 (T_2^4 - T_0^4),$$

где α_k — конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи на поверхности изложницы.

Эффект выделения скрытой теплоты кристаллизации в двухфазной зоне кристаллизующегося сплава учитываем введением в уравнение вместо C_i эффективной удельной теплоемкости $C_{эф}$ аналогично [2]:

$$C_{эф} = \begin{cases} C_{ж} & \text{при } T > T_{лик}; \\ C_{сол} - L \frac{dq}{dT} & \text{при } T_{сол} < T < T_{лик}; \\ C_T(T) & \text{при } T < T_{сол}. \end{cases}$$

Индексы "ж" и "т" указывают на жидкое или твердое состояние сплава.

Решение сформулированной задачи выполнено методом сеток с использованием ЭВМ СМ 1600. Построение разностных уравнений осуществлялось по абсолютно устойчивому неявному четырехточечному шаблону [3].

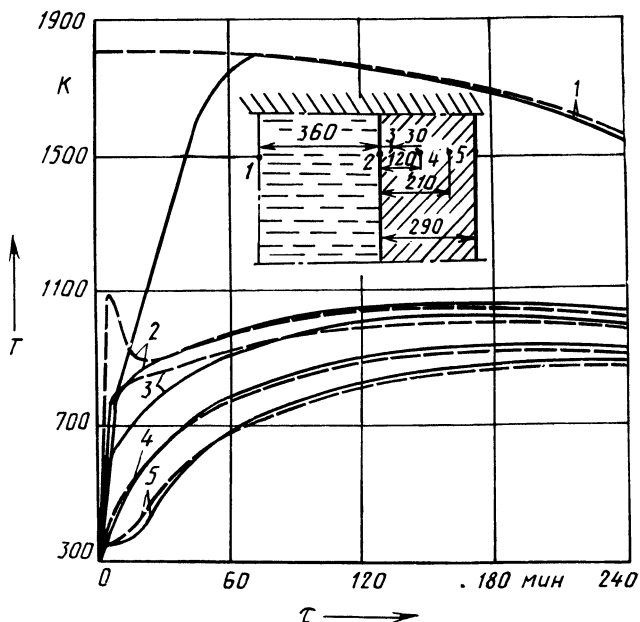


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных (—) и расчетных (---) кривых изменения температур в различных точках слитка и изложницы в процессе затвердевания слитка

На рис. 2 представлены результаты расчета изменения температуры в различных точках сечения изложницы, толщина стенки которой равна 0,29 м, и в центре листового слитка толщиной 0,72 м. Для сравнения даны экспериментальные кривые изменения температуры в тех же точках [4]. Видно, что в начале процесса расчетные и экспериментальные кривые не совпадают (особенно для центра слитка и поверхности изложницы). Это объясняется большой инерционностью термодатчиков, используемых для замера температур в указанных плоскостях. После выхода показаний центральной термопары на измеряемую температуру кривые практически совпадают. Расчетное время затвердевания и охлаждения слитка на 10 мин превышает измеренное, что составляет не более 5%.

Данный метод целесообразно использовать при расчетах процесса охлаждения металлургических листовых слитков массой от 7 до 20 т с целью выявления действительной картины теплового состояния слитков перед последующим нагревом.

ЛИТЕРАТУРА

1. О влиянии некоторых факторов на затвердевание стального слитка / В.Д. Марон, К.А. Черепанов, Е.А. Маклов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1966. — № 6. С. 75–79.
2. Самойлович Ю.А. Формирование слитка. — М.: Металлургия, 1977. 190 с.
3. Самарский А.А. Введение в численные методы. — М.: Наука, 1982. — 271 с.
4. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. — М.: Металлургия, 1967. — 440 с.