



Methods of calculation of binary alloy castings crystallization process are given, which take into account the effect of dissolving admixtures redistribution between solid and liquid phases.

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП "Платан" (Екатеринбург),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, О. Г. ХОПОВА, И. Л. НУМЕРАНОВА, БГПА

РАСЧЕТ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ С УЧЕТОМ ВЫТЕСНЕНИЯ ПРИМЕСИ В ЖИДКУЮ ФАЗУ

УДК 621.746

Процесс кристаллизации реальных отливок и слитков характеризуется значительной неоднородностью поля температур по их сечению. В связи с изменением растворимости компонентов сплава в жидкой и твердой фазах процесс кристаллизации слитков сопровождается непрерывным перераспределением отдельных компонентов сплава и примесей в неоднородном поле температур по сечению. Для учета эффекта перераспределения примеси в неоднородном поле температур необходимо решать уравнение нестационарной теплопроводности для затвердевающего слитка с учетом особенностей диаграммы состояния сплава.

В первом приближении локальную концентрацию примеси в элементе расплава можно выразить через температуру ликвидуса (или солидуса) изучаемого сплава:

$$T_{\text{лик}} = T_0 - \frac{C}{m}, \quad (1)$$

$$T_{\text{сол}} = T_0 - \frac{C}{n}, \quad (2)$$

где $T_{\text{лик}}$, $T_{\text{сол}}$ — температуры ликвидуса и солидуса; T_0 — равновесная температура ликвидуса (солидуса); C — локальная концентрация примеси; коэффициенты m и n определяют углы наклона линий ликвидуса и солидуса.

Приращение твердой фазы ($\Delta\psi$) в локальном микрообъеме сплава вызывает приращение количества растворимой примеси: можно найти связь между изменением концентрации примеси в жидком остатке и приращением твердой фазы за элементарный этап кристаллизации

$$\Delta C = C \frac{1 - k_0}{1 - \phi} \Delta\psi, \quad (3)$$

где k_0 — равновесный коэффициент распределения.

Приращение твердой фазы определим двумя способами.

Способ I. Пусть температура объема T_1 выше температуры ликвидуса $T_{\text{лик}}$ жидкого остатка, занимающего объем $V_1 < V_0$. За счет охлаждения

объема температура снижается до величины $T < T_{\text{лик}}$, тогда по правилу рычага можно вычислить количество образовавшейся твердой фазы по формуле

$$\psi_1 = \frac{\Delta V_{\text{ТВ}}}{V_1} = \frac{m(T_{\text{лик}} - T)}{m(T_{\text{лик}} - T) + n(T - T_{\text{сол}})}$$

или по отношению к начальному объему V_0

$$\Delta\psi = \psi_1(1 - \psi). \quad (4)$$

Способ II. Допустим, что переохлаждение $\Delta T = T_{\text{лик}} - T$, возникающее за время Δt , снимается и температура становится равной $T_{\text{лик}}$ за счет выделения тепла кристаллизации образовавшейся твердой фазы. В этом случае количество твердой фазы определяем по формуле

$$\Delta\psi = \frac{c_m \Delta T}{L}, \quad (5)$$

где c_m — теплоемкость металла (твердой фазы); L — удельная теплота кристаллизации металла.

В обоих способах расчета величины $\Delta\psi$ предполагается, что примесь, вытесненная из твердой фазы, распределяется равномерно в жидком остатке, понижая температуру ликвидуса для следующего этапа кристаллизации. Вытесненные примеси в расплав могут привести к достижению эвтектической концентрации примеси в последних порциях жидкости. В этом случае жидкий остаток затвердевает при постоянной температуре кристаллизации эвтектики, а приращение твердой фазы можно рассчитать по формуле (5). Кристаллизация элементарного объема заканчивается по

достижении величиной $\psi = \sum_{t=0}^{t-t_k} \Delta\psi$ значения ≈ 1 .

Решая уравнение теплопроводности с использованием данной схемы кристаллизации элементарного объема (выражения (3), (4) или (5)) разностным методом, можно рассчитать процесс затвердевания сложных по форме отливок из бинарных сплавов.

Апробация изложенных схем была осуществлена при расчете затвердевания плоской отливки

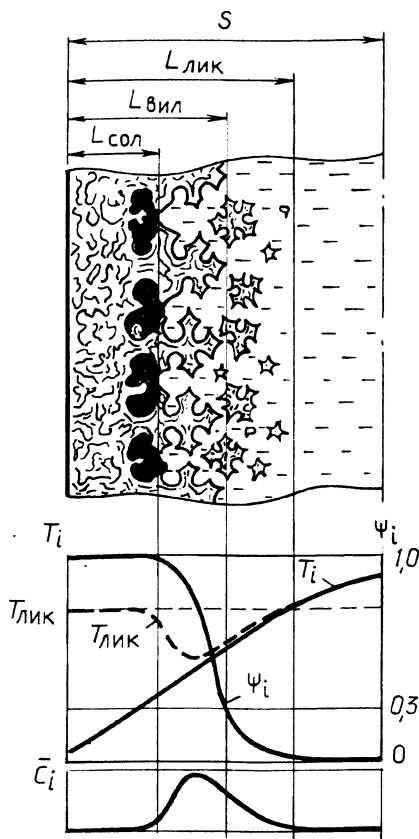


Рис. 1. Схема затвердевания бинарного сплава

(рис. 1) толщиной $2S$, для которой уравнение теплопроводности запишем в виде

$$c_{мр} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - L\rho \frac{\partial \psi}{\partial t}. \quad (6)$$

В случае использования формулы (4) уравнение (6) подстановкой $\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial \psi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}$ преобразуется к виду

$$\rho \left(c_{м} - L \frac{d\psi}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (7)$$

где

$$\frac{d\psi}{dT} = \frac{d\psi_1}{dT} (1 - \psi).$$

Граничные условия для уравнения (6) приняты на поверхности отливки

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_{пов} - T_{ср}), \quad (8)$$

в плоскости симметрии

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

Начальное распределение температуры и концентрации примеси было принято равномерным*. В результате решения задачи для сплава Fe—C

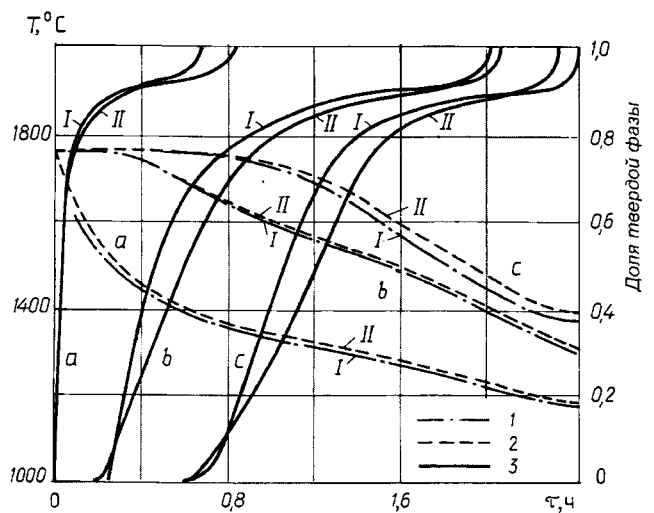


Рис. 2. Изменение во времени (I и II) текущей температуры и доли твердой фазы (3) кристаллизующей отливки толщиной $2S = 0,4$ м из бинарного сплава ($C_0 = 1\%$) в точках, расположенных внутри отливки на расстоянии 0,006 (a), 0,133 (b), 0,200 (c) м от поверхности, рассчитанной по способам I и II

были получены температурные и концентрационные поля внутри затвердевающей отливки; уточнены температура, концентрация и конечное время затвердевания последней порции жидкого металла; получены кривые (начала и конца затвердевания, а также "границы выливаемости", $\psi = 0,3$), характеризующие динамику процесса затвердевания.

На рис. 2 приведены примеры расчетов кристаллизации по способам I и II при задании следующих исходных данных: $C = 1\%$, $T_{нач} = 1763$ К, $S = 0,2$ м, $T_{ср} = 1000$ К, $\alpha = 290$ Вт/(м²·К), $\lambda_{ж} = \lambda_{тв} = 29,1$ Вт/(м·К), $c_{ж} = c_{тв} = 690$ Дж/(кг·К), а также представлено изменение во времени границ твердо-жидкой части слитка (сплошная линия) и текущих значений температуры в точках сечения слитка, расположенных на различном расстоянии от охлаждаемой поверхности.

Из рисунка видно, что характер изменения во времени твердой фазы лишь на отдельных участках может быть представлен простейшими соотношениями типа "закона квадратного корня":

$$\varepsilon = K\sqrt{t}.$$

В конце процесса затвердевания наблюдается ускорение, фиксируемое для плоских отливок в ряде детально поставленных экспериментов [2,3].

Разработанная методика (с применением ЭВМ) расчета кристаллизации реальных отливок из бинарных сплавов с учетом конкретных условий их остывания и изменения в ходе затвердевания температур ликвидуса и солидуса расплава позволяет определить поля температур, концентраций, относительного количества твердой фазы по сечению затвердевающей отливки, продвижение границы выливаемости и конечное время затвердевания слитка.

* Процедура численного решения задачи достаточно под-

Изучены две расчетные схемы процесса кристаллизации отливок из бинарного сплава; анализ показал, что результаты расчетов по обеим схемам различаются незначительно.

Предлагаемая математическая модель процесса более адекватно отражает реальные процессы в затвердевающем стальном слитке, учитывая процесс перераспределения растворимых примесей

между твердой и жидкой фазами в процессе кристаллизации стали.

Литература

1. Стальной слиток, Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Под ред. В. И. Тимошпольского и Ю. А. Самойловича. Мн.: Беларуская навука, 2000.
2. Гуляев Б. Б. Литейное производство. М.: Машгиз, 1960.
3. Раддл Р. У. Затвердевание отливок. М.: Машгиз, 1960.



НОВЫЕ ПАТЕНТЫ ПО ЛИТЬЮ И МЕТАЛЛУРГИИ В ПАТЕНТНОМ ФОНДЕ РЕСПУБЛИКАНСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БИБЛИОТЕКИ

• Патент 2166547 РФ, МПК6 C21B 7/14. Желоб для горячего расплава, желобное устройство и способ транспортировки горячего расплава.

Изобретение относится к металлургии, конкретно к желобу для транспортировки, например, расплавленного доменного чугуна и шлака. Желоб содержит износостойкую обшивку, защитную обшивку, износостойкую обшивку и металлическую оболочку.

• Патент 2166550 РФ, МПК6 C21C 7/064. Способ производства низкокремнистой стали.

Изобретение относится к черной металлургии, в частности к производству высококачественной низкокремнистой листовой стали, в том числе для глубокой вытяжки при штамповке.

• Патент 2758338 Франция, МПК6 C21D 8/06. Способ изготовления сверхпрочной детали из никельтитанового сплава.

Способ заключается в получении слитка из смеси никеля и титана, содержащей 55,6 — 0,4 % никеля, который затем подвергают термообработке для формирования мартенситных пластинок при температуре 480—520 °С в течение 5—45 мин. Способ позволяет получить сверхпрочный материал.

Полные описания иностранных патентов публикуются на языке оригиналов!

Ознакомиться с описаниями изобретений и заказать отдельные страницы копий, а также осуществить тематический поиск в INTERNET можно по адресу:

г. Минск, проспект Машерова, 7,
Республиканская научно-техническая библиотека,
читальный зал патентной документации (502 к.)

тел.: 226-65-05.