

УДК 621.78

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ РЯДА АЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ ВОЗДУХОМ**

© 2012 А. С. Горшенин

Самарский государственный технический университет

Рассмотрен вопрос разработки математической модели теплообмена между алюминиевыми слитками, прошедшими термическую обработку, и охлаждающим воздухом. Охлаждение происходит в камере охлаждения, позволяющей автоматически регулировать процесс. Рассмотрены дефекты полуфабрикатов алюминия и способы их устранения. Представлена математическая модель охлаждения ряда алюминиевых слитков.

Гомогенизационный отжиг, охлаждаемый кристаллизатор, скорость охлаждения, термически тонкое тело, математическая модель.

Литьё алюминиевых слитков в охлаждаемый кристаллизатор приводит к появлению неравновесной структуры, т.е. дендритной ликвации, появлению микропор, трещин и неслитин, ликвационных наплывов [1]. Для устранения таких дефектов, ухудшающих качество слитков, проводят термическую обработку. Одним из видов термической обработки является гомогенизационный отжиг. При гомогенизации создаются условия для прохождения выравнивающей диффузии, под действием которой растворяются интерметаллидные включения, выравнивается химический состав и свойства твёрдого раствора по всему объёму зерна. Вследствие этого пластичность литого слитка повышается, что позволяет увеличить степень обжата при горячей обработке давлением, скорость прессования и уменьшить технологические отходы.

На структуру слитка оказывает влияние скорость охлаждения после гомогенизации. При медленном охлаждении слитка после гомогенизации успевают произойти распад твёрдого раствора алюминия с легирующими компонентами. Слиток приобретает повышенную пластичность и может деформироваться при меньших удельных давлениях и с большими скоростями. При быстром охлаждении слитка после гомогенизации выше температуры перехода основных леги-

рующих элементов в твёрдый раствор происходит закалка сплава. Слиток получается более однородным и прочным, что, с одной стороны, способствует получению более высоких механических свойств полуфабрикатов вследствие однородной структуры и повышения температуры рекристаллизации, а с другой – требует значительных усилий деформации. Таким образом, скорость охлаждения слитка после гомогенизации не должна превышать критическую скорость охлаждения [2].

Критическая скорость охлаждения зависит, прежде всего, от системы легирования слитка, а также от технологии производства (литья, гомогенизации, обработки давлением) и структурного состояния (степени рекристаллизации) слитка. Как правило, для обеспечения разных свойств слитков требуется различная скорость охлаждения. Для слитков, не упрочняемых термической обработкой, таких как АМц, АМг, скорость охлаждения до 300 °С не должна превышать 70 °С/ч. После охлаждения ниже 300 °С слиток можно охлаждать с любой скоростью.

Охлаждение слитков можно осуществлять несколькими способами: охлаждение садки алюминия вместе с печью, охлаждение садки на открытом воздухе или в цехе, охлаждение садки в специальной камере охлаждения.

Охлаждение садки вместе с печью обеспечивает равномерную скорость охлаждения, но в то же время снижает выработку продукции. Охлаждение на открытом воздухе или в цехе не требует никаких технических устройств, но приводит к повышению температуры воздуха в рабочей зоне и нагреву строительных конструкций цеха. Охлаждение садки в камере охлаждения позволяет обеспечить автоматическое поддержание и регулирование скорости охлаждения, не снижает объёмов производства.

В связи с этим автором была предложена конструкция камеры охлаждения для алюминиевых слитков. При проектировании камеры появилась необходимость изучить процесс теплообмена между слитками и охлаждающим воздухом.

Математическая модель теплообмена при охлаждении ряда слитков основывается на модели охлаждения одиночного слитка [3]. Рассмотрим охлаждение ряда слитков воздухом. Для первого слитка уравнение, описывающее теплообмен между воздухом и слитком, запишется в виде:

$$\frac{(T_1 - t_B)}{(T_0 - t_B)} = \exp(-Bi \cdot Fo \cdot 4). \quad (1)$$

Здесь $Bi = \frac{a \cdot d}{l_{ал}}$ - критерий Био,

$Fo = \frac{a \cdot t}{d^2}$ - критерий Фурье, a - коэффициент теплоотдачи, d - диаметр слитка, $l_{ал}$ - коэффициент теплопроводности алюминия, a - коэффициент теплопроводности, t - время, T_0 и t_B - соответственно начальные температуры охлаждения слитка и нагрева воздуха, T_1 - температура первого слитка в ряду в процессе охлаждения.

Проведя математические преобразования, получим зависимость, описывающую падение температуры первого слитка при охлаждении воздухом:

$$\Delta t_1 = (T_0 - t_B) - (T_0 - t_B) \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo),$$

где Δt_1 - разность между начальной температурой слитка T_0 и температурой слитка после охлаждения T_1 .

Количество теплоты, которое отдаст первый слиток при охлаждении, составит величину

$$\begin{aligned} \Delta Q_{СЛ1} &= c_{Pал} \cdot m_{ал} \cdot \Delta t_1 = \\ &= c_{Pал} \cdot m_{ал} (T_0 - t_B) (1 - \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo)). \end{aligned}$$

Воздух при охлаждении первого слитка нагреется на величину

$$\Delta Q_{B1} = c_{Pв} \cdot G_B \cdot (t_{B1} - t_B).$$

Это количество теплоты тождественно равно количеству теплоты, отданному первым слитком

$$\Delta Q_{B1} = c_{Pв} \cdot G_B \cdot (t_{B1} - t_B) = \Delta Q_{СЛ1}.$$

Запишем выражение для температуры воздуха после прохождения первого слитка

$$\begin{aligned} t_{B1} - t_B &= \frac{\Delta Q_{СЛ1}}{c_{Pв} \cdot G_B} = \frac{c_{Pал} \cdot m_{ал}}{c_{Pв} \cdot G_B} \times \\ &\times (T_0 - t_B) (1 - \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{B1} &= t_B + \frac{c_{Pал} \cdot m_{ал}}{c_{Pв} \cdot G_B} \times \\ &\times ((T_0 - t_B) - (T_0 - t_B) \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo)). \quad (2) \end{aligned}$$

Температуру слитка после охлаждения найдём из (1):

$$T_1 = t_B + (T_0 - t_B) \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo).$$

Аналогично рассматривая второй и последующие слитки, можно получить обобщённую математическую модель теплообмена для ряда алюминиевых слитков:

$$\begin{cases} t_{B_N} = t_{B_{(N-1)}} + \frac{c_{Pал} \cdot m_{ал}}{c_{Pв} \cdot G_B} \times [(T_{(N-1)} - t_{B_{(N-1)}}) - \\ - (T_0 - t_{B1}) \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo)] \\ T_N = t_{B_{N-1}} + (T_0 - t_{B_{N-1}}) \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo) \\ \frac{T}{t} \leq 70^\circ C / ч \text{ на отрезке } 300 \dots 500^\circ C. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь N – номер слитка в ряду, t_{B_N} – температура воздуха после охлаждения слитка, T_N – температура алюминиевого слитка, $\frac{T}{t}$ – заданная скорость охлаждения слитков, $c_{Pал}, c_{Pв}$ – соответственно теплоёмкость алюминиевого слитка и воздуха соответственно, $m_{ал}$ – масса алюминиевых слитков, G_B – расход воздуха.

Из рассмотрения системы уравнений (3) можно сделать выводы:

1. Каждый слиток начинает охлаждаться с одной и той же температуры T_0 .

2. У первого слитка скорость охлаждения будет самая большая, так как к следующим слиткам воздух, будет поступать более горячим.

3. Регулирование процесса охлаждения во времени необходимо вести поэтапно по каждому слитку: после охлаждения первого слитка до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ с заданной скоростью воздуха можно переходить на регулирование по второму слитку и т.д.

Полученная модель позволяет исследовать закономерности теплообмена при охлаждении слитков в зависимости от режимных и конструктивных факторов.

Режимным фактором, влияющим на скорость и время охлаждения, является только скорость охлаждающего воздуха. Конструктивными факторами являются диаметр слитка d и ширина канала d .

Используя (3), исследуем характера теплообмена при охлаждении ряда слитков при неизменных конструктивных и режимных факторах: скорость охлаждающего воздуха $W = 1,1\text{ м/с}$ диаметр слитка $d = 0,24\text{ м}$, ширина канала $d = 0,2\text{ м}$.

Расход охлаждающего воздуха рассчитывается в зависимости от его скорости W и ширины канала d , а теплофизические свойства воздуха и алюминия определяются в зависимости от температуры.

В процессе расчёта определяем изменение температур каждого слитка и охлаждающего воздуха во времени.

По результатам расчёта построен график, приведённый на рис. 1, для следующих исходных данных: начальная температура охлаждения слитка $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура нагрева воздуха $t_B = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, количество слитков в ряду $n=5$, длина слитка $l=12\text{ м}$, время охлаждения $t = 11\text{ ч}$.

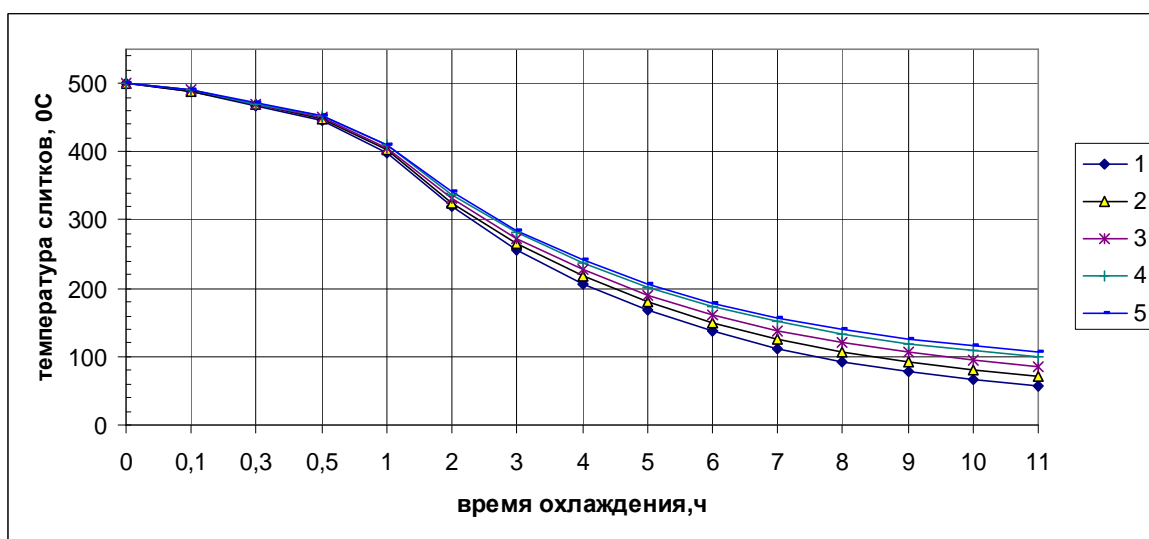


Рис. 1. Снижение температуры слитков ряда в течении времени охлаждения (1, 2, ..., 5 – положение слитков в ряду)

Из рис.1 можно сделать вывод, что температура слитков в начальный момент времени охлаждения $t = 0,5$ ч почти одинакова. Это позволяет сделать предположение о возможности в начальный период времени $t = 0,5$ ч регулирования процесса охлаждения по первому слитку. Из рисунка видно, что каждый последующий слиток в ряду имеет более высокую температуру, чем предыдущий. Это объясняется тем, что воздух при омывании слитков постепенно нагревается, и перепад температуры между слитком и воздухом уменьшается.

Используя рис.1 и систему уравнений (3), можно построить зависимость изменения скорости охлаждения слитков во времени и понять, не подвергнутся ли слитки закалке при заданных режимных и конструктивных факторах. После исследования теплообмена с постоянными конструктивными и режимными факторами можно перейти к исследованию теплообмена с переменными факторами.

Библиографический список

1. Одинцов, М.В. Анализ процесса литья алюминия в кристаллизаторе с подвижным дном [Текст]/ М.В. Одинцов // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. заоч. Науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.); под общ. ред. Г.Д. Ахметовой. – СПб: Реноме, 2011. – с.126-129.
2. Металловедение алюминия и его сплавов: справ. [Текст]/ А.И. Беляев, О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов [и др.]. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 280 с.
3. Горшенин, А.С. Математическая модель охлаждения алюминиевого слитка после гомогенизационного отжига [Текст]/А.С. Горшенин // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: Тр. междунар.научно-практич. конф. – Одесса, 2011. – С. 3-5.

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE ON AIR COOLING OF A NUMBER OF ALUMINUM INGOTS

© 2012 A. S. Gorshenin

Samara State Technical University

The paper is devoted to the development of a mathematical model of heat exchange between heat-treated aluminum ingots and cooling air. The cooling process takes place in a cooling chamber that allows automatic regulation of the process. Defects of aluminum semifinished ingots and methods of their elimination are discussed. A mathematical model of cooling a number of aluminum ingots is presented.

Diffusion annealing, cooling crystallizer, speed of cooling, thermally thin body, mathematical model.

Информация об авторе

Горшенин Андрей Сергеевич, заместитель заведующего кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. E-mail: andersonag1@yandex.ru, andersonag1@mail.ru. Область научных интересов: теплообмен в конвективных печах для термической обработки алюминия, оптимизация процессов.

Gorshenin Andrey Sergeevich, deputy head, the department of heat power engineering, Samara State Technical University. E-mail: andersonag1@yandex.ru, andersonag1@mail.ru. Area of research: study of heat exchange in convective furnaces for the treatment of aluminum ingots and optimization of the process.