

Математическая модель теплообмена в системе “охлаждающий воздух — алюминиевые слитки” в камере охлаждения конвективного типа после термической обработки

Горшенин А. С., инж., Кривошеев В. Е., канд. техн. наук

Самарский государственный технический университет

Описан процесс охлаждения алюминиевых слитков после термической обработки. Рассмотрены дефекты полуфабрикатов алюминия и способы их устранения. Представлена математическая модель охлаждения одного алюминиевого слитка.

Ключевые слова: гомогенизационный отжиг, охлаждаемый кристаллизатор, скорость охлаждения, термически тонкое тело, математическая модель, критерий Био, камера охлаждения.

В настоящее время изделия из алюминиевых сплавов находят все большее распространение. Один из способов их производства — горячее прессование. Полуфабрикатами служат алюминиевые слитки, получаемые способом непрерывного литья в охлаждаемый кристаллизатор. Как известно [1], при литье круглых алюминиевых слитков их ускоренное охлаждение ведет к появлению неравновесной структуры, т. е. дендритной ликвации, возникновению микропор, трещин и неслитин, ликвационных наплывов. Такие дефекты ухудшают качество слитков, что непременно проявляется на этапе прессования. Для устранения дефектов проводят термическую обработку слитков, которая относится к самым энергозатратным процессам в тепловых технологиях.

Один из видов термической обработки — гомогенизационный отжиг. Важное значение для структуры сплава имеет скорость охлаждения после гомогенизации. При медленном охлаждении успевает произойти распад твердого раствора алюминия с легирующими компонентами. Сплав приобретает повышенную пластичность и может деформироваться при меньших удельных давлениях и с большими скоростями. При быстром охлаждении слитка после гомогенизации выше температуры перехода основных легирующих элементов в твердый раствор происходит закалка сплава. Слиток получается более однородным и прочным, что, с одной стороны, способствует получению лучших механических свойств полуфабрикатов вследствие однородной структуры и повышения температуры рекристаллизации, а с другой — требует больших усилий деформации. Таким образом, скорость охлаждения слитка после гомогенизации не должна превышать критическую скорость охлаждения [2].

Регулировать скорость охлаждения можно несколькими способами, один из них — выдержка слитков после гомогенизации в камере охлаждения. Авторами статьи предложена конструкция камеры с конвективным способом охлаждения алюминиевых слитков воздухом. При проектировании камеры возникла задача определения общего времени охлаждения. Для теоретического расчета продолжительности охлаждения необходима разработка математической модели теплообмена между слитком и охлаждающей средой. Модель охлаждения одного алюминиевого слитка воздухом рассмотрена в [3]. Но в камере охлаждения происходит обработка ряда слитков. Поэтому нужна математическая модель теплообмена в системе “охлаждающий воздух — алюминиевые слитки”, позволяющая определять температуру всех слитков, составляющих один горизонтальный ряд.

Слитки размещают на стальных поддонах, которые устанавливают один на другой, образуя садку. Поверхность теплообмена представляет собой канал, образованный горизонтальными рядами слитков (см. рисунок).

Поток воздуха с постоянной скоростью W , м/с, движется по каналу, омывая поперечно расположенные цилиндрические слитки. При этом воздух нагревается, алюминиевые слитки охлаждаются. Процесс теплопередачи носит нестационарный характер. Примем следующие условные обозначения: t_B — температура воздуха перед каналом, °С; $t_{B,N}$ — температура воздуха после омывания N -го слитка, °С; T_0 — температура слитка перед началом охлаждения, °С; T_N — температура N -го слитка в процессе охлаждения, °С.

При постановке задачи анализа теплообмена в камере охлаждения были приняты следующие допущения:

1) задача — “плоская”, двумерная, не зависящая от координаты z ;

2) теплообмен рассматриваем на уровне половины высоты канала δ и при омывании половины слитка ($r = d/2$);

3) температура воздуха t_B по высоте δ одинакова;

4) теплообмен анализируем для каждого слитка в отдельности.

Постановка задачи исследования теплообмена в системе “охлаждающий воздух — алюминиевые слитки” включает описание процесса и расчетную схему теплообмена, принятые допущения, систему дифференциальных уравнений, уравнения, описывающие граничные и начальные условия, а также ограничение к модели.

Система дифференциальных уравнений записывается следующим образом [4 – 7]:

дифференциальное уравнение теплопроводности при охлаждении цилиндра

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (1)$$

дифференциальное уравнение энергии для воздуха

$$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} + \frac{W}{x} \frac{\partial t_B}{\partial x} = a \frac{\partial^2 t_B}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где a — коэффициент температуропроводности.

Граничные условия:

на наружной поверхности слитка, омываемого воздухом,

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{н}}} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T - t_B); \quad (3)$$

в центре слитка

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (4)$$

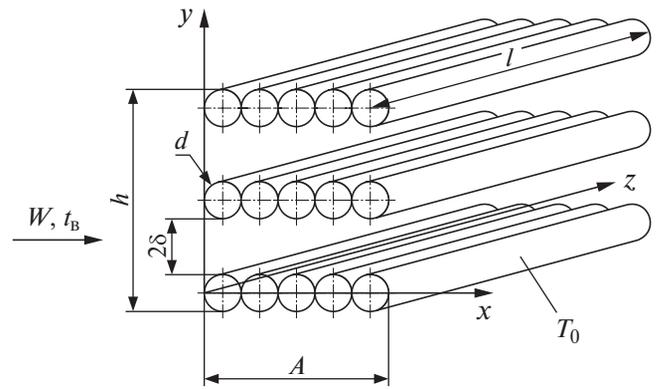
Начальные условия:

температура алюминиевых слитков в начальный момент охлаждения

$$T|_{\tau=0} = T_0; \quad (5)$$

температура охлаждающего воздуха в начальный момент охлаждения

$$t_B|_{\tau=0} = t_B. \quad (6)$$



Ограничение к математической модели: ограничение по скорости охлаждения слитков $dT/d\tau$, которая в интервале температур $500 \div 300$ °C не должна превышать 70 °C/ч:

$$\frac{dT}{d\tau} \leq 70 \text{ °C/ч}. \quad (7)$$

Анализ предложенной задачи показывает, что в системе “охлаждающий воздух — алюминиевые слитки” происходит совместный теплообмен: алюминиевые слитки охлаждаются, омывающий слитки воздух нагревается. Согласно уравнению (1) температура слитка изменяется по его радиусу r и определяется взаимосвязью внешнего и внутреннего теплообмена, характеризуемого числом Био (Bi) [8]. Для алюминиевых слитков диаметром от $0,24$ до $0,127$ м и теплопроводностью $\lambda_{\text{ал}} = 230$ Вт/(м · °C) число Bi не превышает $0,06$, коэффициент теплоотдачи α ориентировочно принят равным 30 Вт/(м² · °C). При этом алюминиевый слиток является термически тонким телом, изменение температуры по радиусу слитка r отсутствует. В соответствии с уравнением (1) отсутствие изменения температуры в пространстве означает отсутствие изменения температуры во времени. Таким образом, классическое решение задачи анализа теплообмена в системе “охлаждающий воздух — алюминиевые слитки” для термического тела не подходит. Кроме того, решение данной задачи в такой наиболее общей постановке довольно затруднительно. Поэтому необходимо получить более простое решение, используя физические особенности теплообмена.

Математическая модель теплообмена при охлаждении ряда слитков основывается на модели охлаждения одиночного слитка [3]. Рассмотрим охлаждение ряда слитков воздухом. Для первого слитка уравнение, описы-

вающее теплообмен между ним и воздухом имеет вид

$$\frac{(T_1 - t_B)}{(T_0 - t_B)} = \exp(-4\text{Bi} \cdot \text{Fo}), \quad (8)$$

где $\text{Bi} = \alpha d / \lambda_{\text{ал}}$ — критерий Био; $\text{Fo} = \alpha \tau / d^2$ — число Фурье; τ — время; T_1 — температура первого слитка в ряду в процессе охлаждения.

Выполнив математические преобразования, получим выражение, описывающее падение температуры первого слитка при охлаждении воздухом:

$$\Delta t_1 = (T_0 - t_B) - (T_0 - t_B) \exp(-4\text{Bi} \cdot \text{Fo}).$$

Количество теплоты, которое отдает первый слиток при своем охлаждении,

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{сл1}} &= c_{p \text{ ал}} m_{\text{ал}} \Delta t_1 = \\ &= c_{p \text{ ал}} m_{\text{ал}} (T_0 - t_B) [1 - \exp(-4\text{Bi} \cdot \text{Fo})]. \end{aligned}$$

При охлаждении первого слитка воздух нагреется на

$$\Delta Q_{\text{в1}} = c_{p \text{ в}} G_{\text{в}} (t_{\text{в1}} - t_B).$$

Это количество теплоты тождественно равно количеству теплоты, отданной первым слитком:

$$\Delta Q_{\text{в1}} = c_{p \text{ в}} G_{\text{в}} (t_{\text{в1}} - t_B) = \Delta Q_{\text{сл1}}.$$

Запишем выражение для температуры воздуха после первого слитка:

$$\begin{aligned} t_{\text{в1}} - t_B &= \frac{\Delta Q_{\text{сл1}}}{c_{p \text{ в}} G_{\text{в}}} = \\ &= \frac{c_{p \text{ ал}} m_{\text{ал}}}{c_{p \text{ в}} G_{\text{в}}} (T_0 - t_B) [1 - \exp(-4\text{Bi} \cdot \text{Fo})]. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} t_{\text{в1}} &= t_B + \frac{c_{p \text{ ал}} m_{\text{ал}}}{c_{p \text{ в}} G_{\text{в}}} \times \\ &\times [(T_0 - t_B) - (T_0 - t_B) \exp(-4\text{Bi} \cdot \text{Fo})]. \end{aligned} \quad (9)$$

Из уравнения (8) найдем температуру слитка после охлаждения

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

Аналогично можно получить обобщенную математическую модель теплообмена для ряда алюминиевых слитков:

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{в}N} &= t_{\text{в}(N-1)} + \frac{c_{p \text{ ал}} m_{\text{ал}}}{c_{p \text{ в}} G_{\text{в}}} [(T_{(N-1)} - t_{\text{в}(N-1)}) - \\ &\quad - (T_0 - t_{\text{в1}}) \exp(-4\text{Bi} \cdot \text{Fo})]; \\ T_N &= t_{\text{в}(N-1)} + (T_0 - t_{\text{в}(N-1)}) \exp(-4\text{Bi} \cdot \text{Fo}); \\ \frac{T}{\tau} &\leq 70 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{ч на отрезке } 500 \div 300 \text{ } ^\circ\text{C}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где N — номер слитка в ряду; $t_{\text{в}N}$ — температура воздуха после охлаждения слитка; T_N — температура алюминиевого слитка; T/τ — заданная скорость охлаждения слитков; $c_{p \text{ ал}}$ и $c_{p \text{ в}}$ — теплоемкость алюминиевого слитка и воздуха; $m_{\text{ал}}$ — масса алюминиевых слитков; $G_{\text{в}}$ — расход воздуха.

Первое уравнение системы (10) описывает изменение температуры охлаждающего воздуха, второе — изменение температуры слитка. Здесь же приведено ограничение на максимальную скорость охлаждения слитков.

Список литературы

1. **Одинцов М. В.** Анализ процесса литья алюминия в кристаллизаторе с подвижным дном. — В кн.: Технические науки: проблемы и перспективы. Материалы междунар. заоч. науч. конф. (Санкт-Петербург, март 2011 г.) / Под общ. ред. Г. Д. Ахметовой. СПб.: Реноме, 2011.
2. **Металловедение** алюминия и его сплавов: Справ. изд., 2-е изд., перераб. и доп. / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов и др. — М.: Металлургия, 1983.
3. **Горшенин А. С.** Математическая модель охлаждения алюминиевого слитка после гомогенизационного отжига. — В кн.: Сб. науч. тр. SWorld. Материалы междунар. науч.-практической конф. "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011", вып. 4, т. 7. Одесса: Черноморье, 2011.
4. **Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А.** Тепломассообмен. Учеб. пособ. для вузов. 2-е изд., испр. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2005.
5. **Кутателадзе С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справ. пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. **Юдаев Б. Н.** Теплопередача. Учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 1973.
7. **Кутателадзе С. С.** Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1979.
8. **Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.** Теплопередача. Учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1975.

andersonag1@yandex.ru