

УДК 621.78

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ

© 2013 А. С. Горшенин, В. Е. Кривошеев

Самарский государственный технический университет

В работе рассмотрен вопрос идентификации критериального уравнения для определения коэффициента теплоотдачи экспериментальными данными при охлаждении алюминиевых слитков по методу наименьших квадратов. Описана экспериментальная установка для охлаждения алюминиевых слитков. Приведены экспериментальные данные.

Критериальное уравнение, скорость охлаждения, аппроксимация, камера охлаждения.

Введение

В настоящее время изделия из алюминиевых сплавов находят всё большее применение. Одним из способов производства таких изделий является обработка давлением. Полуфабрикатами служат цилиндрические алюминиевые слитки, получаемые непрерывным литьём в охлаждаемый кристаллизатор. Как известно, при литье в водоохлаждаемый кристаллизатор ускоренное охлаждение слитков ведёт к появлению неравновесной структуры, ухудшающей качество слитка.

Для устранения дефектов слитка проводят термическую обработку, одним из видов которой является гомогенизационный отжиг. Важное влияние на структуру сплава оказывает скорость охлаждения после отжига. Охлаждение слитков после гомогенизации в промышленности реализуется несколькими способами, одним из которых является использование специальной камеры охлаждения.

Математическая модель теплообмена в камере охлаждения

Термическая обработка является одной из самых энергозатратных в тепловых технологиях. Задача снижения энергетических затрат является одной из приоритетных в современной энергетике. На величину энергетических затрат в процессе термической обработки оказывают влия-

ние многие режимные и конструктивные факторы. Для оценки влияния данных факторов на конвективный теплообмен в камере охлаждения алюминиевых слитков авторами предложена математическая модель конвективного теплообмена в системе «охлаждающий воздух – алюминиевые слитки» [1]:

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

Здесь t_{B_N} – температура охлаждающего воздуха при омывании N -го слитка, $^\circ C$; $t_{B_{(N-1)}}$ – температура охлаждающего воздуха при омывании предыдущего N -му слитка, $^\circ C$; c_{Pal} – коэффициент теплоемкости алюминия, Дж/(кг· $^\circ C$); $m_{ал}$ – масса слитка, кг; $c_{Pв}$ – коэффициент теплоемкости воздуха, Дж/(кг· $^\circ C$); G_B – расход воздуха, м³/ч; T_0 – начальная температура охлаждения слитка, $^\circ C$; T_N – температура N -го слитка, $^\circ C$; $T_{(N-1)}$ – температура предыдущего N -му слитка, $^\circ C$; Bi – критерий Био; Fo –

критерий Фурье; $\frac{T}{t}$ – скорость охлаждения слитка, $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

В данной системе первое уравнение описывает изменение температуры охлаждающего воздуха, второе – изменение температуры слитка, третье – ограничение на максимальную скорость охлаждения слитков.

Решение данной математической модели предполагает определение коэффициента теплоотдачи a . Движение воздуха происходит по каналам, ограниченными цилиндрическими слитками. Уравнения для расчёта коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме движения при омывании волновой поверхности даны в работах [2, 3]. В работе В.И. Гомелаури [4] предложено критериальное уравнение теплоотдачи при омывании волновой поверхности:

$$\overline{Nu}_{\text{жд}_{\text{эkv}}} = 0,021 \cdot \text{Re}_{\text{жд}_{\text{эkv}}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{жс}}}{\text{Pr}_{\text{с}}} \right)^{0,25} \cdot e_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где $\overline{Nu}_{\text{жд}_{\text{эkv}}} = \frac{a \cdot d_{\text{эkv}}}{l}$ – среднее значение критерия Нуссельта по длине канала; l – коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $d_{\text{эkv}}$ – эквивалентный диаметр канала, м ; $\text{Re}_{\text{жд}_{\text{эkv}}} = \frac{W \cdot d_{\text{эkv}}}{\nu}$ – среднее значение критерия Рейнольдса по длине канала; W – скорость охлаждающего воздуха, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\text{Pr}_{\text{жс}}$ – среднее значение критерия Прандтля по длине канала; $\text{Pr}_{\text{с}}$ – среднее значение критерия Прандтля, определённое при температуре алюминиевых слитков; $e_{\text{ш}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение теплоотдачи вследствие искусственной шероховатости:

$$e_{\text{ш}} = 1,04 \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}^{0,04} \cdot \exp\left[0,85 \cdot f\left(\frac{S}{h}\right)\right],$$

$\frac{S}{h}$ – шаг волн, S – расстояние между соседними волнами, м ; h – высота волновой поверхности, м .

Данное критериальное уравнение обобщает опытные данные по исследованию теплоотдачи внутри каналов круглого сечения, что является недостаточным для задачи конвективного теплообмена в системе «охлаждающий воздух – алюминиевые слитки», т.к. в этой системе поверхность теплообмена представляет собой канал, ограниченный горизонтальными рядами слитков. Поэтому для приведения данного уравнения к виду, где в качестве характерного размера используется высота канала d , необходимо провести экспериментальные исследования.

Описание эксперимента

Экспериментальное исследование теплообмена при охлаждении слитков проводилось на смонтированной камере охлаждения. Камера охлаждения представляет собой конструкцию, состоящую из рабочего пространства, в котором располагается садка; раздающего и собирающего газоходов. Для подачи охлаждающего воздуха на раздающем газоходе установлены четыре осевых вентилятора. При проведении эксперимента определялись зависимость температуры слитков в течение времени охлаждения, скорости охлаждающего воздуха. Температура слитков замерялась термомпарами градуировки ХА, зачеканенными в слитки. Вторичным прибором служил измеритель - регулятор температуры 2ТРМ1. Скорость охлаждающего воздуха определялась путём пересчёта динамического давления, измеренного напорной трубкой. При проведении экспериментальных исследований погрешность измерений температуры слитков составляла 1,5%, скорости охлаждающего воздуха $\pm 2,5\%$.

Результаты экспериментальных значений температуры слитка представлены

на рис. 1. На графике показано изменение температуры слитка в одной точке измерения. Результаты экспериментальных

значений скорости охлаждающего воздуха представлены на рис. 2.



Рис. 1. Изменение температуры слитка в течение времени охлаждения



Рис. 2. Изменение скорости охлаждающего воздуха в течение времени охлаждения

Идентификация критериального уравнения теплоотдачи по методу наименьших квадратов

Проведённое экспериментальное исследование теплообмена в камере охлаждения позволяет, используя полученные данные, получить критериальное уравнение, где в качестве характерного размера принимается высота канала d .

Для аппроксимации экспериментальных данных степени соответствия между данными эксперимента и результатами определения коэффициента теплоотдачи по формуле (1) воспользуемся методом наименьших квадратов [5].

Экспериментальные данные аппроксимируем к уравнению, выражающему зависимость между критериями Нуссельта Nu , Рейнольдса Re и Прандтля Pr :

$$Nu = A \cdot Re^B \cdot Pr^C,$$

где A, B, C – постоянные числа. Для упрощения расчётов опустим значение критерия Прандтля Pr^C , так как в интервале температур $0 - 600^\circ C$ его значение почти не меняется.

Функция, подлежащая минимизации для определения оценок параметров методом наименьших квадратов, имеет вид [6]

$$F(A, B) = \sum_{i=1}^n (Nu_{di} - A \cdot Re_{di}^B)^2, \quad (2)$$

где Nu_{di} – значение зависимой переменной в i -м эксперименте, $A \cdot Re_{di}^B$ – значение независимой переменной, A, B – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению.

Для определения неизвестных коэффициентов в (2) вычислим частные производные по A и B и приравняем их нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial}{\partial A} \sum_{i=1}^n (Nu_{di} - A \cdot Re_{di}^B)^2 = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial B} = \frac{\partial}{\partial B} \sum_{i=1}^n (Nu_{di} - A \cdot Re_{di}^B)^2 = 0.$$

После проведения математических преобразований данных уравнений окончательно получим систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{\sum_{i=1}^n (Nu_{di} \cdot Re_{di}^B)}{\sum_{i=1}^n (Re_{di}^{2B})}, \\ B = \frac{\sum_{i=1}^n (Nu_{di} \cdot Re_{di}^{B-1})}{\sum_{i=1}^n (Re_{di}^B \cdot Re_{di}^{B-1})}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Решая уравнение (3) методом подстановки, получим значения коэффициентов: $A = 0,352$ и $B = 0,65$. Подставим данные коэффициенты в уравнение

$$Nu_d = 0,352 \cdot Re_d^{0,65}.$$

С учётом критерия Прандтля окончательно получим

$$Nu_d = 0,352 \cdot Re_d^{0,65} \cdot Pr^{0,33}. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой критериальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи в канале, ограниченном поверхностью алюминиевых слитков.

Заключение

В результате экспериментального исследования были получены данные по характеру изменения температуры слитков и скорости охлаждающего воздуха. С

использованием полученных данных проведена процедура идентификации критериального уравнения теплоотдачи. Это позволило получить критериальное уравнение, где в качестве характерного размера используется высота канала между горизонтальными рядами слитков. Данное уравнение можно использовать при инженерных расчётах.

Библиографический список

1. Горшенин, А.С. Исследование тепловых процессов при охлаждении алюминиевых слитков после их термической обработки [Текст] / А.С. Горшенин, В.Е. Кривошеев // Энергетика и энергоэффективные технологии: тр. V междунар. науч.-практ. конф. – Липецк, 2012. – С. 60-62.
2. Кружилин, Г. Н. Теория теплопередачи круглого цилиндра в поперечном потоке жидкости [Текст] / Г. Н. Кружилин // ЖТФ. – 1936. – Т. 6. – Вып. 5. – С. 858-865.
3. Eckert, E. R. G. Die Berechnung des Wärmeübergang in der laminaren Grenzschicht umstromter Körper [Text] / E. R. G. Eckert // VDI – Forschungsh, 1942. –S. 1-26.
4. Гомелаури, В. И. Влияние искусственной шероховатости на конвективный теплообмен [Текст] / В. И. Гомелаури // Тр. института физики АН ГССР. – Тбилиси. – 1963. – Т. 9. – С. 111-145.
5. Горский, В.Г. Планирование промышленных экспериментов [Текст] / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер, А.М. Талалай.– М.: Металлургия, 1978. – 279 с.
6. Соколов, А.К. Коэффициенты, упрощающие расчет теплопередачи через обмуровки печей [Текст] / А.К. Соколов. – Иваново: Ивановский государственный университет, 1980. – 11 с.

AGREEMENT BETWEEN CRITERIAL EQUATIONS OF HEAT TRANSFER IN THE PROCESS OF COOLING ALUMINIUM INGOTS AND EXPERIMENTAL DATA

© 2013 A. S. Gorshenin, V. E. Krivosheev

Samara State Technical University

The paper deals with the problem of agreement between the criterial equation for the determination of the heat transfer coefficient and the experimental data for the case of cooling aluminum ingots using the least squares method. An experimental unit for the cooling of aluminum ingots is described. Experimental data are presented.

Criterial equation, rate of cooling, approximation, cooling chamber.

Информация об авторах

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

Кривошеев Владимир Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. E-mail: pt@samgtu.ru. Область научных интересов: изучение теплообмена в печах и котельных установках.

Gorshenin Andrey Sergeevich, deputy head of the department of industrial 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 aluminum thermal treatment and optimization of the process.

Krivosheev Vladimir Evgenievich, candidate of technical science, associate professor of the department of industrial heat power engineering, Samara State Technical University. E-mail: pt@samgtu.ru. Area of research: study of heat transfer in furnaces and boilers.