



**А. С. ГОРШЕНИН
Ю. И. РАХИМОВА
Н. П. КРАСНОВА**

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ФАКТОРОВ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА АЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ В КАМЕРЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

STATEMENT OF THE PROBLEM OF OPTIMIZING THE FACTORS OF THE HEAT EXCHANGE MODEL OF ALUMINUM INGOTS IN THE COOLING CHAMBER

Литье в охлаждаемый кристаллизатор является основным способом получения алюминиевых полуфабрикатов – круглых слитков. Непрерывное литье приводит к образованию неоднородной структуры. Ее устранение происходит при термической обработке – гомогенизации отжига с последующим охлаждением в камере. Для исследования теплообмена между алюминиевыми слитками и охлаждающим теплоносителем в камере разработана математическая модель. Она показала, что время охлаждения слитков в камере зависит от конструктивных и режимных факторов. Данная работа посвящена оптимизации конструктивных факторов математической модели теплообмена в камере охлаждения алюминиевых слитков. Рассмотрены вопросы критериев оптимизации, определена целевая функция с ограничениями на множество допустимых решений функции.

Ключевые слова: оптимизация, допустимые решения, критерии оптимизации, целевая функция, математическая модель, мультипликативная свертка

В настоящее время изделия из алюминиевых слитков находят все большее применение. Одним из способов производства таких изделий является горячее прессование. Полуфабрикатами служат алюминиевые слитки, получаемые способом непрерывного литья в охлаждаемый кристаллизатор. Как известно [1], при литье круглых алюминиевых слитков в охлаждаемом кристаллизаторе ускоренное охлаждение слитков ведет к появлению неравновесной структуры, т. е. дендритной ликвации, появлению микропор, трещин и неслитин, ликвационных наплывов. Такие дефекты в слитках снижают их качество, что выясняется на этапе прессования.

Casting in a cooled mold is the main way to produce aluminum semi-finished products - round ingots. Continuous casting leads to the formation of a heterogeneous structure. Its elimination occurs during heat treatment – homogenization annealing followed by cooling in the chamber. To study the heat exchange between aluminum ingots and cooling coolant in the chamber, a mathematical model was developed. She showed that the cooling time of ingots in the chamber depends on structural and operational factors. This paper is devoted to the optimization of the design factors of the mathematical model of heat transfer in the cooling chamber of aluminum ingots. The questions of optimization criteria are considered, the objective function with restrictions on the set of feasible solutions of the function is defined.

Keywords: optimization, feasible solutions, optimization criteria, objective function, mathematical model, multiplicative convolution

Для устранения дефектов проводят термическую обработку слитков. Одним из видов термической обработки является гомогенизационный отжиг. В процессе гомогенизации состав кристаллов твердого раствора выравнивается, а интерметаллиды растворяются. При последующем охлаждении интерметаллиды выделяются в виде равномерно распределенных мелких вторичных включений. В результате пластичность литого сплава повышается, что позволяет увеличить степень обжатия при горячей обработке давлением, повысить скорость прессования и уменьшить технологические отходы.

Важное значение на структуру сплава оказывает скорость охлаждения после гомогенизации. При медленном охлаждении слитка после гомогенизации успевают 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 более высоких механических свойств полуфабрикатов вследствие однородной структуры и повышения температуры рекристаллизации, а с другой – требует более высоких усилий деформации. Таким образом, скорость охлаждения слитка после гомогенизации не должна превышать критическую скорость охлаждения [2].

Регулирование скорости охлаждения возможно несколькими способами, одним из них является выдержка слитков после гомогенизации в камере охлаждения. Применение существующих режимов охлаждения не обеспечивает одинаковой скорости снижения температуры во всех частях алюминиевых слитков, особенно на их торцах и на боковых поверхностях крайних слитков, что приводит к отклонению структуры и твердости металла от номинальной и появлению брака при изготовлении готовых изделий.

Однако в настоящее время отсутствуют методы расчета и режимы проведения процессов охлаждения, учитывающие геометрию садки и камеры охлаждения и обеспечивающие одинаковую скорость снижения температуры во всех частях алюминиевых слитков, а также способствующие снижению энергетических затрат.

В связи с этим совершенствование процесса охлаждения алюминиевых слитков воздухом на основе моделирования регулируемого конвективного теплообмена, обеспечивающего одинаковую скорость снижения их температуры во всех точках садки, является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить качество выпускаемой продукции.

Авторами предложена конструкция камеры охлаждения с конвективным способом охлаждения алюминиевых слитков воздухом. Одним из вопросов, возникших при проектировании камеры охлаждения, было определение общего времени охлаждения. Для теоретического расчета времени охлаждения необходима разработка математической модели теплообмена между слитком и охлаждаю-

щей средой. Математические модели теплообмена между отдельным слитком, слитками, уложенными в ряд, и охлаждающим воздухом разработаны и подробно описаны в [3, 4]. Полученные математические модели позволили провести аналитическое исследование теплообмена в системе алюминиевые слитки – охлаждающий воздух [5, 6].

Проведенные исследования теплообмена с постоянными и переменными конструктивными факторами показали, что основным фактором, влияющим на процесс теплообмена в камере охлаждения, является ширина канала между рядами алюминиевых слитков δ [6]. Для определения наиболее выгодной ширины канала необходимо произвести оптимизацию конструктивных параметров в [3, 4]. Для оптимизации конструктивных факторов необходимо составить целевую функцию, множество допустимых решений для целевой функции и критерии оптимизации.

Для составления целевой функции воспользуемся методом мультипликативной свертки [7]. Он заключается в замене частных критериев K_i одним общим критерием K :

$$K(x) = \prod_{i=1}^n K_i^{a_i}(x), \quad (1)$$

где $K(x)$ – общий критерий; $K_i^{a_i}(x)$ – набор частных критериев; n – число частных критериев; a_i – относительный вес (важность) частного критерия $K_i(x)$.

Рассмотрим критерии, подлежащие оптимизации в нашем случае. На основании анализа исследования математической модели можно сделать вывод, что главным фактором, влияющим на процесс охлаждения, является ширина канала δ . Ширина канала определяет габаритный размер садки по высоте камеры охлаждения. Увеличение ширины канала благоприятно влияет на процесс охлаждения слитков, приводит к более низкой конечной температуре слитков, но в то же время уменьшает общую массу садки, что снижает производительность.

Уменьшение ширины канала приводит к увеличению конечной температуры слитков, но увеличивает массу садки. Это позволяет обрабатывать большее количество слитков, повысить производительность. Уменьшение ширины канала приведет к тому, что садка по высоте будет уменьшаться и занимать не всю высоту камеры охлаждения. Это приведет к появлению в верхней части камеры пустого пространства.

Охлаждающий воздух из-за отсутствия сопротивления будет уходить в появившееся пространство, охлаждая садку лишь по краю. Для устранения данного недостатка необходимо

увеличить гидравлическое сопротивление пространства. Это можно осуществить установкой металлического короба.

Таким образом, ширина канала δ непосредственно влияет на массу садки $M_{ал}$. Масса садки $M_{ал}$ является первым оптимизационным критерием $M_{ал} = K_1(x)$. Необходимо стремиться к ее увеличению, так чтобы ширина канала δ была наибольшей и не требовалась установка металлического короба.

Определим первый оптимизационный критерий $K_1(x)$. Масса садки определяется по выражению

$$M_{ал} = m_1 \cdot n \cdot z, \quad (2)$$

где $m_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot \rho_{ал}$ – масса одного слитка;

$n = \frac{A}{d}$ – количество слитков в ряду;

A – ширина садки;

$z = \frac{h}{\delta} + 1$ – число рядов по высоте;

h – высота садки.

Таким образом,

$$M_{ал} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot \rho_{ал} \cdot \frac{A}{d} \cdot \left(\frac{h}{\delta} + 1\right) = \frac{\pi}{4} \cdot l \cdot \rho_{ал} \cdot A \cdot d \cdot \left(\frac{h}{\delta} + 1\right) = K_1(\delta). \quad (3)$$

Из анализа выражения (3) следует, что для слитка одного диаметра изменяющимся параметром, влияющим на оптимизационный критерий, является только ширина канала δ .

Вторым оптимизационным критерием является общее время охлаждения слитка $\tau_{об}$ т.е. $\tau_{об} = K_2(x)$. На общее время охлаждения слитка $\tau_{об}$ не влияет ширина канала δ и определяется только диаметром слитка и его необходимой конечной температурой. Более низкая температура слитков требует длительного времени охлаждения и приводит к повышению затрат на электроэнергию. Кроме того, время охлаждения в любом случае не должно превышать времени термообработки в печи гомогенизации.

Определим второй оптимизационный критерий $K_2(x)$. Воспользуемся математической моделью охлаждения слитка [1] для определения времени охлаждения

$$\frac{(T_{к} - t_{В})}{(T_0 - t_{В})} = \exp(-Bi \cdot Fo \cdot 4). \quad (4)$$

Прологарифмировав и преобразовав (2), получим

$$\tau_{об} = -0,25 \cdot c_{Рал} \cdot \rho_{ал} \cdot d \cdot \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(T_{к} - t_{В})}{(T_0 - t_{В})} = K_2(\delta). \quad (5)$$

После определения оптимизационных критериев необходимо рассмотреть относительный вес (важность) a_i каждого частного критерия. В нашем случае оба частных критерия

важны в одинаковой степени, так как важно иметь минимальное время охлаждения и большую производительность, т. е. массу. Поэтому $a_1 = a_2 = 0,5$.

Запишем целевую функцию

$$K(\delta) = (K_1^{a_1}(\delta)) \left(\frac{1}{K_2^{a_2}(\delta)} \right) = \frac{K^{a_1}(\delta)}{K^{a_2}(\delta)}. \quad (6)$$

Подставим оптимизационные критерии

$$K(\delta) = - \frac{\left(\frac{\pi}{4} \cdot l \cdot \rho_{ал} \cdot A \cdot d \cdot \left(\frac{h}{\delta} + 1\right) \right)^{0,5}}{\left(0,25 \cdot c_{Рал} \cdot \rho_{ал} \cdot d \cdot \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(T_{к} - t_{В})}{(T_0 - t_{В})} \right)^{0,5}} \quad (7)$$

или

$$K(\delta) = - \frac{\left(\pi \cdot l \cdot A \cdot \left(\frac{h}{\delta} + 1\right) \right)^{0,5}}{\left(c_{Рал} \cdot \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(T_{к} - t_{В})}{(T_0 - t_{В})} \right)^{0,5}}. \quad (8)$$

Выражение (8) является целевой функцией нулевого порядка, имеющей множество допустимых решений, в следующих ограничениях:

– скорость охлаждающего воздуха не должна превышать 15 м/с;

– масса садки, которая не должна быть более 20 т, чтобы не превысить грузоподъемность загрузочной машины.

Таким образом, целевая функция может быть записана с ограничениями в следующем виде:

$$\begin{cases} K(\delta) = - \frac{\pi \cdot l \cdot A \cdot \left(\frac{h}{\delta} + 1\right)}{c_{Рал} \cdot \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(T_{к} - t_{В})}{(T_0 - t_{В})}} \rightarrow \max \\ 0 < W < 15 \text{ м/с} \\ M_{ал} \leq 20 \text{ т} \end{cases} \quad (9)$$

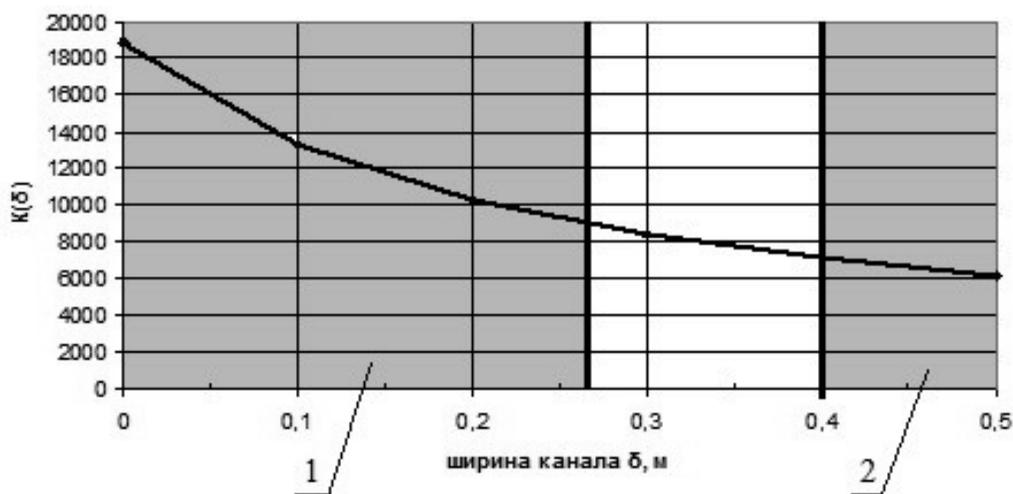
Решение системы уравнений (9) является линейной однофакторной задачей, которая может быть решена применением численных методов безусловной оптимизации. В нашем случае выбран метод покоординатного спуска.

На рисунке представлены результаты оптимизации конструктивных факторов для алюминиевого слитка $d = 0,24$ м. При оптимизации используются следующие исходные данные: ширина садки $A = 2,5$ м, высота садки $h = 2,0$ м, длина слитков $l = 8$ м, начальная температура охлаждающего воздуха $t_0 = 20$ °С, начальная температура охлаждения слитков $T_0 = 500$ °С, конечная температура охлаждения слитков $T_{к} =$

60 °С. Коэффициент теплоотдачи определялся в зависимости от заданного значения ширины канала δ и скорости воздуха W .

На рисунке представлена зависимость целевой функции от оптимизируемого параметра – ширины канала δ для слитка δ . Как отмечалось выше, целевая функция имеет ограничения на ширину канала δ : по скорости охлаждающего воздуха $0 < W < 15$ м/с и по массе садки $M_{ал} < 20$ т. На рисунке эти ограничения изображены областями «1» и «2». Область «1» показывает значения δ , при которых скорость охлаждающего воздуха превышает

значения 15 м/с, что увеличивает мощность дутьевых устройств и повышает затраты на электроэнергию. Повышение скорости охлаждающего воздуха, как отмечалось в [7], приведет к закалке алюминиевых слитков. Область «2» показывает значения δ , при которых масса садки превышает максимально возможную. Оптимальным является наибольшее значение ширины канала δ из указанной области для каждого слитка. При этом значении мы имеем большую, но не максимально возможную, массу садки и более низкую скорость охлаждающего воздуха.



Зависимость целевой функции от ширины канала для слитка

Выводы. Проведенный поиск наиболее оптимальных соотношений конструктивных факторов математической модели конвективного теплообмена позволил определить оптимальную высоту канала между слитками с диаметром 0,24 м. Это позволяет определить габаритные размеры садки, внутренние размеры камеры охлаждения, разработать опытную камеру охлаждения и провести экспериментальное исследование. Аналогичное исследование может быть проведено для слитков любого диаметра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Одинцов М.В. Анализ процесса литья алюминия в кристаллизаторе с подвижным дном // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. заоч. науч. конф. (Санкт-Петербург, март 2011 г.) / под общ. ред. Г.Д. Ахметовой. СПб.: Реноме, 2011. С. 126–129.
2. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): справочник. Киев: Коминтех, 2005. 364 с.
3. Горшенин А.С. Математическое моделирование теплообмена при охлаждении ряда алюми-

ниевых слитков воздухом // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. №2(33). С. 179–182.

4. Горшенин А.С., Кривошеев В.Е. Математическая модель теплообмена в системе охлаждающий воздух – алюминиевые слитки в камере охлаждения конвективного типа после термической обработки // Промышленная энергетика. 2013. №11. С. 20–22.

5. Горшенин А.С., Щелоков А.И. Исследование теплообмена при охлаждении алюминиевых слитков с постоянными режимными и конструктивными параметрами для повышения энергоэффективности // Промышленная энергетика. 2012. №10. С. 23–25.

6. Горшенин А.С., Кривошеев В.Е. Математическое моделирование и исследование процесса термической обработки алюминиевых слитков на основе регулируемого конвективного теплообмена // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева (национального исследовательского университета). 2014. №5–4(33). С. 137–141.

7. Романов В.Н. Системный анализ для инженеров. СПб.: СЗГЗТУ, 2006. 186 с.

Об авторах:

ГОРШЕНИН Андрей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленной теплоэнергетики
Самарский государственный технический университет
443110, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: andersonag1@yandex.ru

GORSHENIN Andrey S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the
Industrial Heat and Power Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: andersonag1@yandex.ru

РАХИМОВА Юлия Игоревна

кандидат педагогических наук, доцент кафедры
промышленной теплоэнергетики
Самарский государственный технический университет
443110, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: juliarahimova@yandex.ru

RAKHIMOVA Yulia I.

PhD in Pedagogy, Associate Professor of the Industrial
Heat and Power Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: juliarahimova@yandex.ru

КРАСНОВА Наталья Петровна

старший преподаватель кафедры
промышленной теплоэнергетики
Самарский государственный технический университет
443110, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: krasnova-pt@yandex.ru

KRASNOVA Natalya P.

Senior Lecturer of the Industrial Heat and Power Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: krasnova-pt@yandex.ru

Для цитирования: Горшенин А.С., Рахимова Ю.И., Краснова Н.П. Постановка задачи оптимизации факторов модели теплообмена алюминиевых слитков в камере охлаждения // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, №1. С. 126–130. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.19.

For citation: Gorshenin A.S., Rakhimova Yu.I., Krasnova N.P. Statement of the problem of optimizing the factors of the heat exchange model of aluminum ingots in the cooling chamber // Urban Construction and Architecture. 2019. V. 9, 1. Pp. 126–130. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.19.

Уважаемые читатели!

Приглашаем Вас принять участие в Первом Международном форуме архитектурно-строительных инноваций «Города Будущего», который состоится 19 – 20 ноября 2019 года.

Основные научные направления форума:

- умные города и проблемы региональной идентичности;
- новые типологии архитектурно-строительных объектов в городах будущего;
- стратегии развития городской среды;
- эффективные практики сохранения наследия и регенерации исторической среды городов;
- совершенствование систем водоснабжения и водоотведения по очистке природных и сточных вод;
- теория расчета строительных конструкций;
- строительные материалы для новых городов;
- Моделирование и механика строительных конструкций.

Организатор АСА СамГТУ

Контакты: тел. (846)339-14-38, 339-14-15, E-mail: dir_asa@samgtu.ru