

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

© 2014 А.С. Горшенин, В.Е. Кривошеев

Самарский государственный технический университет

Существующие технологии охлаждения цилиндрических алюминиевых слитков не обеспечивают одинаковую скорость снижения температуры во всех частях слитков. Наиболее целесообразно использовать для охлаждения слитков специальные камеры. Существующие методы расчёта и режимы охлаждения, которые учитывают геометрические характеристики садки и камеры охлаждения и обеспечивали бы одинаковую скорость охлаждения во всех частях слитков, отсутствуют. Поэтому был рассмотрен вопрос математического моделирования процесса охлаждения алюминиевых слитков на основе регулируемого конвективного теплообмена. При разработке математической модели были сформулированы допущения, математическая и физическая постановка задачи. Математическая модель включила в себя расчётную схему теплообмена в системе алюминиевые слитки – охлаждающий воздух, систему дифференциальных уравнений, начальные и граничные условия. Полученная математическая модель позволила провести аналитическое исследование процесса охлаждения с постоянными и переменными режимными и конструктивными факторами, такими как скорость охлаждающего воздуха, диаметр слитков и высота канала между слитками. Аналитическое исследование позволило сформулировать алгоритм, обеспечивающий номинальную скорость охлаждения каждого слитка в горизонтальном ряду путём регулируемого конвективного охлаждения. Для доказательства достоверности аналитической модели было выполнено экспериментальное исследование. Расхождение между полученными экспериментальными данными и аналитическими значениями составило в среднем 34%.

Математическая модель, регулируемый конвективный теплообмен, скорость охлаждения.

В настоящее время всё возрастающими темпами увеличивается ассортимент и объёмы проката, получаемого из алюминиевых слитков. Анализ технологии производства цилиндрических слитков методом полунепрерывного литья в водоохлаждаемый кристаллизатор выявил главную проблему данного метода - образование неоднородной структуры слитка. Для её устранения проводят термическую обработку слитков, одним из видов которой является гомогенизационный отжиг. Важным этапом термической обработки является охлаждение слитков после гомогенизации со скоростью, не превышающей критическую - $70^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ для предотвращения закалки сплава.

Проведённый анализ способов охлаждения алюминиевых слитков показал, что наиболее целесообразно использовать специальную камеру, позволяющую обеспечить заданную технологией скорость охлаждения слитков и повысить выработку качественной продукции.

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 твёрдости металла от номинальной и появлению брака при изготовлении готовых изделий.

В настоящее время отсутствуют методы расчёта 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 температуры во всех точках садки, является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить качество выпускаемой продукции.

Для изучения процесса охлаждения слитков в камере охлаждения была разработана математическая модель регулируемого конвективного теплообмена в

системе «алюминиевые слитки — охлаждающий воздух» [1].

При разработке математической модели (рис.1) регулируемого конвективного теплообмена в системе «алюминиевые слитки - охлаждающий воздух» были приняты следующие допущения: 1) задача теплообмена принималась двухмерной; 2) теплообмен рассматривался в половине высоты канала z и при омывании половины слитка; 3) температура воздуха t_B по высоте канала S принималась одинаковой; 4) температура охлаждающего воздуха при омывании каждого слитка принималась постоянной; 5) теплообмен рассматривался для каждого отдельного слитка.

Математическая модель конвективного теплообмена в системе «ряд горизонтальных алюминиевых слитков - охлаждающий воздух» включает в себя расчётную схему (рис. 1), описание процесса теплообмена, ограничение по скорости охлаждения слитков, систему уравнений по изменению температур слитков и воздуха.

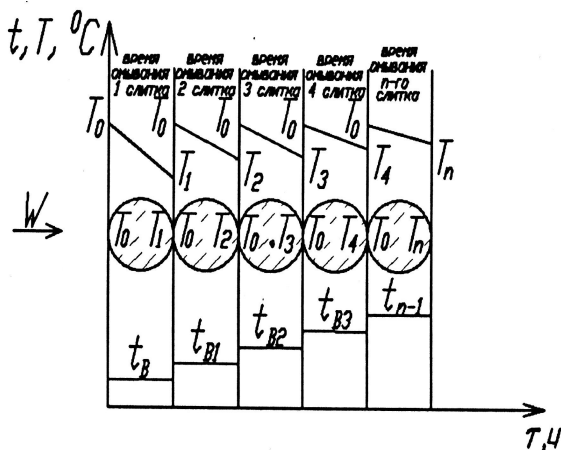


Рис. 1. Расчётная схема к математической модели

Процесс нагрева воздуха при охлаждении горизонтального ряда слитков количеством N основывается на решении уравнения охлаждения одного слитка [2]. В соответствии с принятыми допущениями теплообмен между воздухом и слитками рассчитывается отдельно для каждого слитка. В соответствии с этим каждый слиток начинает охлаждаться с одной и той

же температуры T_0 .

В соответствии с допущением о постоянстве температуры воздуха при омывании одного слитка, считаем, что его температура увеличивается скачком после омывания слитка. Так как температура воздуха t_B от слитка к слитку увеличивается, то перепад температуры между слитками и воздухом в ряду будет уменьшаться и каждый последующий слиток будет более горячим, чем предыдущий.

При разработке математической модели регулируемого конвективного теплообмена было принято ограничение по скорости охлаждения слитков dT/dr , которая в интервале температур 500 - 300°C не должна превышать 70 °C/ч.

Система уравнений по снижению температур T_N каждого из N алюминиевых слитков, расположенных в горизонтальном ряду, и по увеличению температуры воздуха t_{BN} выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} T_N = t_{B_{N-1}} + (T_0 - t_{B_{N-1}}) \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo), \\ t_{B_N} = t_{B_{(N-1)}} + \frac{c_{Пал} m_{ал}}{c_{Pв} G_B} \times [(T_{(N-1)} - t_{B_{(N-1)}}) - \\ - (T_0 - t_{B1}) \exp(-4 \cdot Bi \cdot Fo)]. \end{cases} \quad (1)$$

Полученная математическая модель регулируемого конвективного теплообмена позволила провести аналитическое исследование конвективного теплообмена в камере охлаждения. Результаты аналитического исследования конвективного теплообмена в камере охлаждения при поддержании постоянной в процессе охлаждения скорости воздуха W , м/с для слитка диаметром $d = 0,24$ м приведены на рис. 2.

Представленные на рис. 2 зависимости показывают, что при поддержании постоянной скорости охлаждающего воздуха $w = const$ в процессе охлаждения не удаётся обеспечить заданную технологией скорость охлаждения $T/\tau = 70^\circ\text{C}/\text{ч}$, что приводит к снижению качества продукции вследствие закалки слитков. Кроме этого, сохранение постоянной скорости воздуха $w = const$ увеличивает продолжительность периода охлаждения.

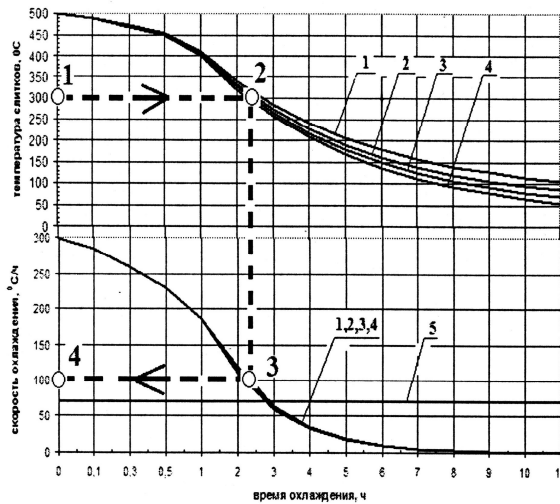


Рис. 2. Изменение температуры и скорости охлаждения слитков от продолжительности охлаждения при постоянной скорости охлаждения $W = 1,1 \text{ м/с}$ (1,2,.....,4-номера слитков, 5 - максимальная скорость охлаждения)

В целях повышения качества продукции и предотвращения закалки алюминиевых слитков предложен алгоритм обеспечения номинальной скорости охлаждения каждого из алюминиевых слитков любого ряда во временной динамике процесса их охлаждения путём регулируемого конвективного теплообмена в горизонтальной камере охлаждения, учитывающего высоту канала между рядами слитков, их диаметр, изменение скорости воздуха в процессе охлаждения слитков.

Согласно уравнениям математической модели температура воздуха при его течении от слитка к слитку увеличивается, а перепад температуры между слитками и воздухом в ряду, наоборот, уменьшается. Тогда каждый последующий слиток будет иметь более высокую температуру по сравнению с предыдущим. Это приводит к тому, что слитки будут недоохлаждаться, и для каждого последующего слитка величина недоохлаждения будет увеличиваться.

С учётом этого, регулирование скорости охлаждения осуществляется путём регулирования скорости воздуха: сначала по температуре первого слитка до момента его охлаждения до 300°C таким образом, чтобы она не превысила своё номинальное

значение, то есть $T_i/\tau \leq 70^\circ\text{C/ч}$. После этого предлагается переходить на регулирование скорости охлаждения по второму слитку путём изменения скорости воздуха, таким образом, чтобы она не превысила своё номинальное значение, то есть $T_i/\tau \leq 70^\circ\text{C/ч}$, и так до охлаждения последнего в ряду слитка до температуры 300°C . После этого скорость воздуха, а следовательно, скорости охлаждения увеличиваются до максимально возможного значения, поскольку при достижении температуры последнего в ряду слитка до величины 300°C эффекта закаливания алюминия, а следовательно, потери качества не наступает.

С целью проверки правильности предлагаемого метода было проведено аналитическое исследование регулируемого конвективного теплообмена в камере охлаждения при переменной скорости воздуха W , м/с для слитка диаметром $d = 0,24$ м с высотой канала $\delta = 0,1$ м. Результаты приведены на рис.3.

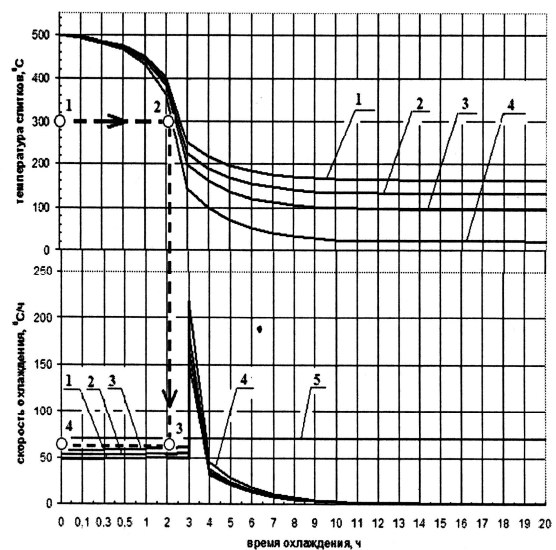


Рис. 3. Зависимость температуры и скорости охлаждения слитков от времени охлаждения, $d = 0,24 \text{ м}$, $\delta = 0,1 \text{ м}$ при переменной скорости воздуха W (1,2,.....,8 - номера слитков)

Графики изменения температуры и скорости охлаждения слитков, представленные на рис. 3, подтверждают влияние переменной скорости охлаждающего воздуха W , м/с на скорость охлаждения слитков T/τ , $^\circ\text{C/ч}$ и время охлаждения τ , ч. Поддержание расчётной скорости воздуха

при охлаждении слитков до 300°C позволяет выдерживать скорость их охлаждения, не приводящую к их закалке и тем самым повышать выработку качественной продукции. Увеличение скорости воздуха до максимальной после охлаждения слитков ниже 300°C позволяет существенно ускорить процесс охлаждения. Общее время охлаждения определяется только заданной технологией конечной температурой слитков.

Для доказательства достоверности математической модели теплообмена было проведено экспериментальное исследование. Экспериментальная камера охлаждения (рис. 4) состояла из рабочего пространства, раздающего и собирающего газоходов, приборов для измерения температуры слитков (термопары ТХА, измеритель-регулятор 2ТРМ1) и скорости воздуха (трубка Прандтля - электронный манометр).

Сопоставление расчётной температуры слитков и полученных экспериментальных данных для одной точки измерения представлено на рис. 5.

Среднее расхождение между теоретическими и экспериментальными данными составляет 34%.

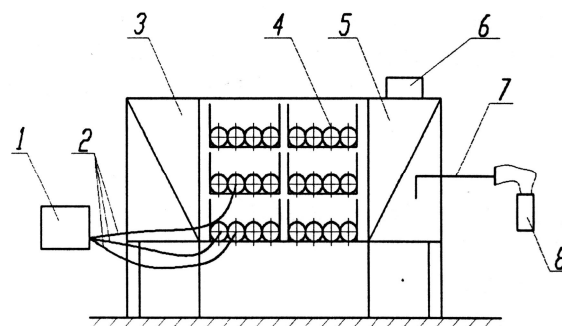


Рис. 4. Схема экспериментальной камеры охлаждения алюминиевых слитков:

(1-измеритель-регулятор 2ТРМ1, 2-термопары ТХА, 3-собирающий газоход, 4-алюминиевые слитки, 5-раздающий газоход, 6-вентиляторы, 7-трубка Прандтля, 8-электронный манометр Comarc C9557)

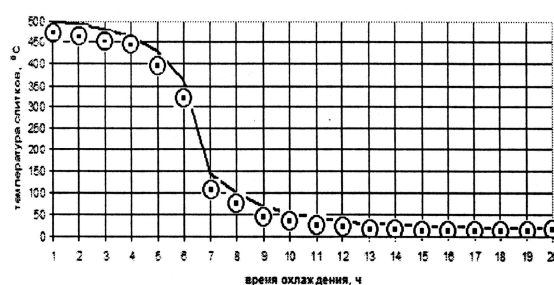


Рис. 5. Сравнение температур слитка: сплошная линия – расчётные значения, точки – экспериментальные данные

Полученная погрешность позволяет рекомендовать полученную математическую модель к применению в проектной и эксплуатационной практике.

Библиографический список

1. Горшенин А.С. Математическое моделирование теплообмена при охлаждении ряда алюминиевых слитков // Вестник СГАУ. 2012. № 2(33). С. 179-183.
2. Горшенин А.С. Математическая модель охлаждения алюминиевого слитка после гомогенизационного отжига // Ма-

териалы международной научно практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании». Одесса: Одесский нац. морской ун-т, 2011. С. 3-5.

Информация об авторах

Горшенин Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, заместитель заведующего кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. E-mail: andersonagl@yandex.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.

**MATHEMATICAL MODELING AND INVESTIGATION
OF THE PROCESS OF THERMAL TREATMENT OF ALUMINUM INGOTS
ON THE BASIS OF REGULATED CONVECTIVE HEAT TRANSFER**

© 2014 A.S. Gorshenin, V.E. Krivosheev

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

Existing cooling technology of cylindrical aluminum ingots don't provide the same speed of the temperature in all parts of the ingots. The most appropriate use for cooling of ingots special camera. Existing calculation methods and modes of cooling, which take into account the geometric characteristics of the charge and a cooling chamber, and would provide the same cooling rate in all parts of the bars are missing. Therefore, the authors addressed the issue of mathematical modeling of the process of cooling aluminum ingots on the basis of the regulated convective heat transfer. When developing mathematical models were formulated assumptions, mathematical and physical formulation of the problem. The mathematical model included the analytical model of heat transfer in the system aluminum ingots - cooling air, the system of differential equations, initial and boundary conditions. A mathematical model has allowed to carry out an analytical study of the cooling process with constant and variable operating conditions and design factors such as the speed of the cooling air, the diameter of the bars and the height of the channel between the bars. An analytical study has allowed to formulate the algorithm, providing a nominal speed of each cooling of the ingot in a horizontal row by controlled cooling. To prove the validity of the analytical model was performed experimental study. The discrepancy between experimental data and analytical values averaged 34%.

Mathematical model, adjustable convective heat transfer, cooling rate.

References

1. Gorshenin A.S. Mathematical modeling of heat transfer in the cooling of a number of aluminium ingots // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. № 2(33). P. 179-183. (In Russ.)
2. Gorshenin, A.S. Mathematical model cooling aluminum ingot after the homogenization annealing // Materials of international scientific-practical conference «Modern problems and ways of their solving in science, transport, production and education, 2011». Odessa: Odesskiy natsional'nyy morskoy universitet Publ., 2011. P. 3-5. (In Russ.)

About the authors

Gorshenin Andrey Sergeevich, Candidate of Science (Engineering), deputy head of heat and power engineering department, Samara State Technical University. E-mail: andersonag1@yandex.ru. Area of Research: study of heat exchange in convective furnaces for aluminum thermal treatment and optimization of this process.

Krivosheev Vladimir Evgenievich, Candidate of Science (Engineering), associate Professor of the department «Industrial heat power engineering», Samara State Technical University. E-mail: pt@samgtu.ru. Area of Research: study of heat transfer in furnaces and boilers.