УДК 621.78

О.И. ЧАСТИКОВА, студент гр. 4-Тэ-4 (СамГТУ)
Научный руководитель: А.С. ГОРШЕНИН, к.т.н., доцент (СамГТУ)
г. Самара

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

В настоящее время все возрастающими темпами увеличивается ассортимент и объемы 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 ее 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 ^{0}С/ч для предотвращения закалки сплава.

Проведенный 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 твердости металла от номинальной и появлению брака при изготовлении готовых изделий.

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 научной задачей, решение которой позволит обеспечить качество выпускаемой продукции.

Для изучения процесса охлаждения слитков в камере охлаждения автором была разработана математическая модель регулируемого конвек-

тивного теплообмена в системе алюминиевые слитки – охлаждающий воздух [1].

При разработке математической модели 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 δ и при омывании половины слитка; 3) температура воздуха $t_{\text{В}}$ по высоте канала δ 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 расчетную схему (рис. 1), описание процесса теплообмена, ограничение по скорости охлаждения слитков (1), систему уравнений (2) и (3) по изменению температур слитков и воздуха

Описание процесса теплообмена. 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 $t_{\text{в}}$ от слитка к слитку увеличивается, то перепад температуры между слитками и воздухом в ряду будет уменьшаться, то есть, каждый последующий слиток будет более горячим, чем предыдущий.

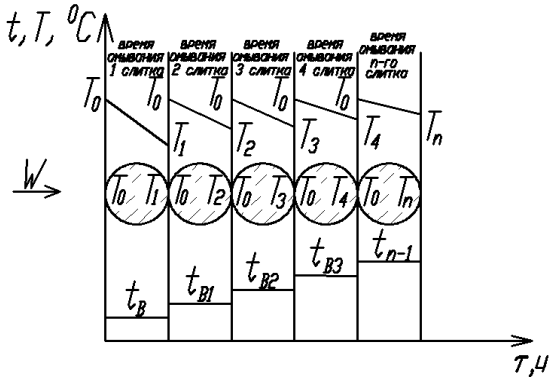

Рис. 1. Расчетная схема к математической модели

При разработке математической модели регулируемого конвективного теплообмена было принято ограничение по скорости охлаждения

слитков $dT/d\tau$, которая в интервале температур $500-300^0C$ не должна превышать

$$\frac{dT}{d\tau} \le 70\ ^0C/_{ч}, \qquad (1)$$

Система уравнений (2) и (3) по снижению температур T_N каждого из алюминиевых слитков количеством N, расположенных в горизонтальном ряду и по увеличению температур воздуха t_{B_N} выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} t_{B_N} = t_{B_{(N-1)}} + \dfrac{c_{Ral}}{c_{Pв}} \dfrac{m_{ал}}{G_{\text{В}}} \left[\left(T_{(N-1)} - t_{\text{B(N-1)}}\right) - \left(\text{T}_0 - \text{t}_{\text{B1}}\right) \exp\left(-4 \cdot Bi \cdot Fo\right) \right] & (2) \\ T_N = t_{\text{B}\,N-1} + \left(\text{T}_0 - \text{t}_{\text{B}\,N-1}\right) \exp\left(-4 \cdot Bi \cdot Fo\right) & (3) \end{cases}$$

Полученная математическая модель регулируемого конвективного теплообмена позволила провести аналитическое исследование конвективного теплообмена в камере охлаждения с использованием уравнений (2) и (3) полученной математической модели. 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.

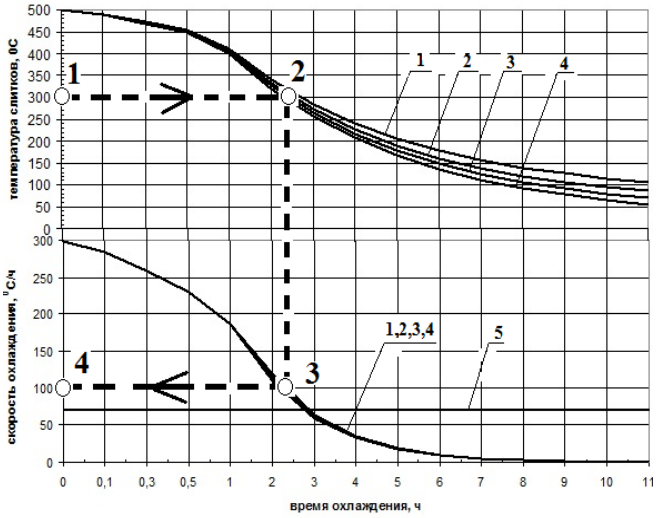

Рис. 2. Изменение температуры и скорости охлаждения слитков от продолжительности охлаждения при постоянной скорости охлаждения $W = 1{,}1 м/с$ (1,2,….,4 – номера слитков, 5 – максимальная скорость охлаждения)

Представленные на рис. 2 зависимости показывают, что при поддержании постоянной скорости охлаждающего воздуха w = const в процессе

охлаждения не удается обеспечить заданную технологией скорость охлаждения T/τ = 70 ^{0}С/ч, что приводит к снижению качества продукции вследствие закалки слитков. Кроме этого сохранение постоянной скорости воздуха w = const увеличивает продолжительность периода 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 путем регулируемого конвективного теплообмена в горизонтальной камере охлаждения, учитывающий высоту канала между рядами слитков, их диаметр, изменение скорости воздуха в процессе охлаждения слитков в камере охлаждения.

Согласно уравнениям (2) и (3) математической модели температура воздуха при его течении от слитка к слитку увеличивается, а перепад температуры между слитками и воздухом в ряду наоборот уменьшаться. 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.

Учитывая это регулирование скорости охлаждения осуществляется путем регулирования скорости воздуха, сначала по температуре первого слитка до момента его охлаждения до $300^0 C$, таким образом, чтобы она не превысила свое номинальное значение, то есть $T_1/\tau \le 70$ ^{0}С/ч. После этого предлагается переходить на регулирование скорости охлаждения по второму слитку, путем изменения скорости воздуха, таким образом, чтобы она не превысила свое номинальное значение, то есть $T_1/\tau \le 70$ ^{0}С/ч и так до охлаждения последнего в ряду слитка до температуры $300^0 C$. После этого скорость воздуха, а, следовательно, скорости охлаждения увеличиваются до максимально возможного значения, поскольку при достижении температуры последнего в ряду слитка до величины $300^0 C$ 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 $\delta = 0{,}1м$, результаты которого приведены на рис. 3.

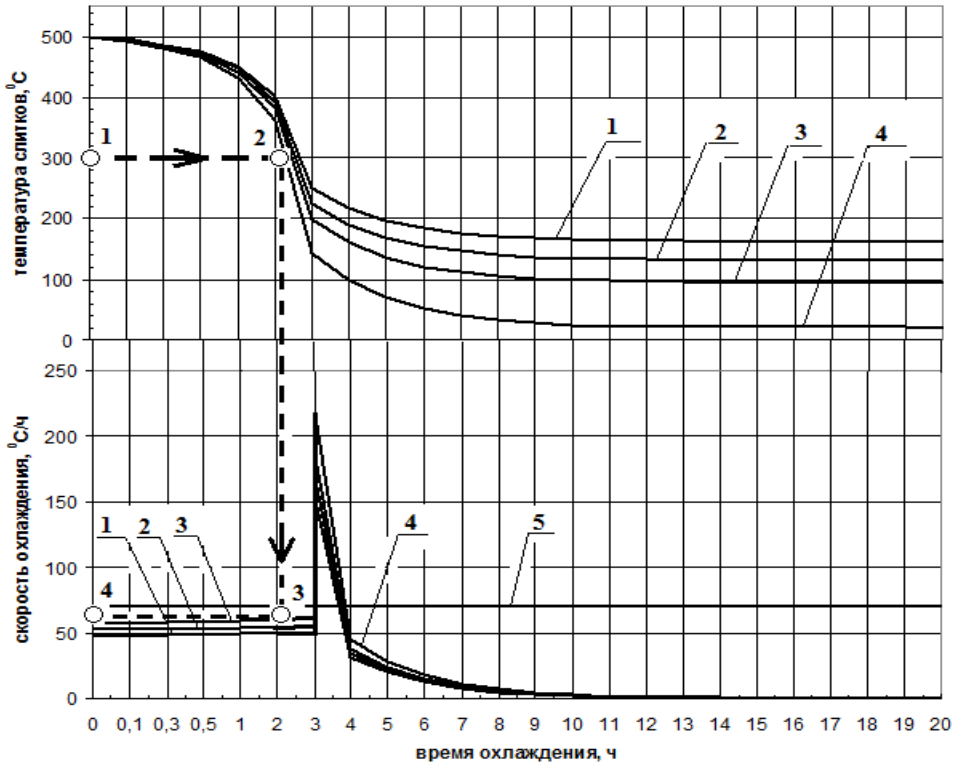

Рис. 3. Зависимость температуры и скорости охлаждения слитков от времени охлаждения, $d = 0{,}24$м, $\delta = 0{,}1м$ при переменной скорости воздуха W (1,2,….,8 – номера слитков)

График изменения температур и скорости охлаждения слитков, представленные на рис. 3, подтверждает влияние переменной скорости охлаждающего воздуха W, м/с на скорость охлаждения слитков T/τ, ^{0}С/ч и время охлаждения τ, ч. Поддержание расчетной скорости воздуха при охлаждении слитков до 300^0C 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 300^0C 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).

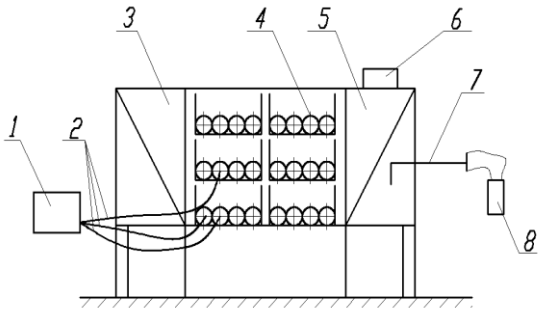

Рис. 4. Схема экспериментальной камеры охлаждения алюминиевых слитков (1-измеритель-регулятор 2ТРМ1, 2-термопары ТХА, 3-собирающий газоход, 4-алюминивые слитки, 5-раздающий газоход, 6-вентиляторы, 7-трубка Прандтля, 8-электронный манометр Comarc C9557)

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

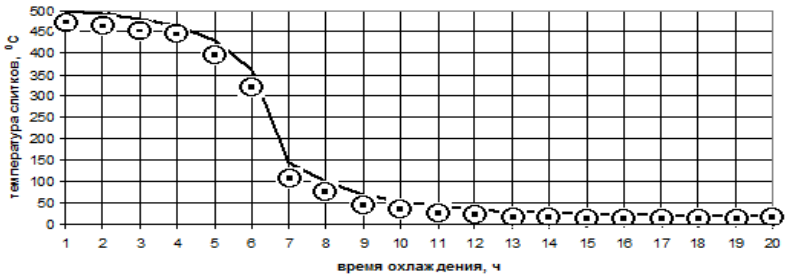

Рис. 5. Сравнение температур слитка (сплошная линия – расчетные значения, точки – экспериментальные данные)

Среднее расхождение между теоретическими и экспериментальными данными составляет 34%. Полученная погрешность позволяет рекомендовать полученную математическую модель для применения в проектной и эксплуатационной практике.

Список литературы:

1. Горшенин, А.С. Математическое моделирование теплообмена при охлаждении ряда алюминиевых слитков [Текст] / А.С. Горшенин // Вестник СГАУ. – 2012. - № 2(33). – С. 179 – 183. - ISSN 1998-6629.

2. 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, 2011: Материалы международной научно-практической конференции // Одесский нац. морской ун-т. – Одесса, 2011. – С. 3 –5.