

УДК.621.774.1

Скачков В. А.  
Бережная О. Р.  
Оверчук О. Р.  
Колобов Г. А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТРУБОК МАЛОГО ДИАМЕТРА ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРЕЦИЗИОННОЙ ТОЧНОСТИ

Конструктивно-технологические решения теплообменных и газодинамических установок предполагают использование алюминиевых трубок прецизионной точности, обладающих высокими прочностными и упругими характеристиками.

Непрерывная кристаллизация алюминиевых трубок из расплава не обеспечивает требований по толщине стенок и искривлению осевой линии. Последующий процесс волочения частично исправляет погрешности кристаллизации, однако требуется специальная доводка трубок по обеспечению прочностных характеристик и геометрических параметров.

Литье труб производят двумя способами – центробежным и полунепрерывным. При литье металла в длинный кристаллизатор его охлаждение осуществляется только через стенки кристаллизатора. Литье металла в короткий кристаллизатор характеризуется образованием в нем только наружной корочки, удерживающей металл от растекания, а основное охлаждение осуществляется водой, подаваемой на заготовку, чем достигается резкое увеличение интенсивности охлаждения [1, 2]. Кристаллизаторы для получения тонких прутков из алюминиевых сплавов рассмотрены в работе [3].

В работах [4–5] рассмотрены процессы волочения трубчатых заготовок, однако в них не поставлена и не решена задача обеспечения геометрической точности готовой продукции.

Цель данной работы – рассмотреть температурные режимы процесса кристаллизации алюминиевых трубок, установить условия волочения полученных заготовок и установить требования, обеспечивающие прецизионную точность по толщине стенок и искривлению осевой линии.

Разливка трубок малого диаметра из алюминиевых сплавов может быть реализована в металлическом трубчатом кристаллизаторе (внутри кристаллизатора находится стержень) с внешним охлаждением в среде жидкости или газа. В зоне расплава температура алюминиевого сплава составляет  $T_p$ , которая превышает температуру плавления  $T_{пл}$  на величину перегрева  $T_{np}$ .

Величина отвода теплоты через боковую поверхность кристаллизатора определяется передачей теплоты от текущего расплава к стержню и внутренней поверхности кристаллизатора, по толщине стенки кристаллизатора и от наружной поверхности кристаллизатора в окружающую среду. Она зависит от теплоемкости текущего расплава, коэффициента теплоотдачи от кристаллизатора к внешней среде, а также от геометрических размеров кристаллизатора.

Система дифференциальных уравнений, описывающих распределение температуры по длине центрального стержня и расплава алюминиевого сплава, имеет вид:

$$\frac{d^2 t_{cm}}{dx^2} = Q \cdot (t_{cm} - t_p); \quad (1)$$

$$\frac{dt_p}{dx} = (A + D) \cdot t_p - D \cdot t_{cm} - A \cdot t_g, \quad (2)$$

где

$$Q = \frac{4\alpha_{cm}}{\lambda};$$

$$A = \frac{4}{K_1 \cdot C \cdot \rho \cdot W \cdot (d_1^2 - d_{cm}^2)}; \quad D = \frac{4}{C \cdot \rho \cdot W \cdot (d_1^2 - d_{cm}^2)}; \quad K_1 = \frac{1}{\alpha_p \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_k} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{me} \cdot d_2};$$

$\alpha_{cm}, \alpha_p, \alpha_{me}$  – коэффициенты теплоотдачи от расплава к стержню и кристаллизатору, а также от кристаллизатора к внешней среде соответственно;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала кристаллизатора;

$t_{cm}, t_p, t_6$  – температуры стержня, расплава и окружающей среды соответственно;

$d_1, d_2, d_{cm}$  – соответственно внутренний и наружный диаметры кристаллизатора, а также диаметр стержня;

$C$  – теплоемкость текущего расплава;

$\rho$  – плотность расплава;

$W$  – линейная скорость течения расплава (скорость вытяжки трубки).

Уравнения (1) и (2) получены при введении следующих допущений:

– теплоемкость расплава не зависит от температуры;

– скорость течения расплава по длине кристаллизатора – постоянная величина;

– температура расплава равномерно распределена по диаметру кристаллизатора.

Граничные условия для данной системы уравнений можно записать так:

$$t_{cm}|_{x=0} = t_{np}^p; \quad (3)$$

$$t_{cm}|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (4)$$

$$t_{np}|_{x=0} = t_{np}^p, \quad (5)$$

где  $t_{np}^p$  – температура расплава.

Тогда решение системы уравнений (1)–(2) имеет вид:

$$t_{cm} = \exp(Rx) \cdot [C_2 \cdot \cos(z \cdot x) + C_3 \cdot \sin(z \cdot x)] - \frac{Q \cdot G}{\Omega}; \quad (6)$$

$$t_p = \exp(R \cdot x) \left[ \left( C_2 - \frac{C_2 \cdot R^2 + 2R \cdot z \cdot C_3 - C_2 \cdot z^2}{Q} \right) \cdot \cos(z \cdot x) + \left( C_3 - \frac{C_3 \cdot R^2 - 2R \cdot z \cdot C_2 - C_3 \cdot z^2}{Q} \right) \cdot \sin(z \cdot x) \right] - \frac{Q \cdot G}{\Omega}, \quad (7)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – постоянные интегрирования;

$G = -A \cdot t_6$ .

В уравнениях (6) и (7) постоянные интегрирования  $C_1, C_2$  и  $C_3$  определяются из удовлетворения условий (3)–(5) и имеют вид:

$$C_1 = 0; \quad (8)$$

$$C_2 = t_{np}^p + \frac{Q \cdot G}{\Omega}; \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{1}{2R \cdot z} \cdot \left[ \left( C_2 - t_{np}^p - \frac{Q \cdot G}{\Omega} \right) \cdot Q - C_2 \cdot R^2 - C_2 \cdot z^2 \right]. \quad (10)$$

Условия внешнего охлаждения при кристаллизации трубок из алюминиевых сплавов определяются коэффициентом теплопроводности материала кристаллизатора, а также коэффициентом теплоотдачи от наружной поверхности кристаллизатора к внешней среде.

Увеличение значений коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности кристаллизатора к внешней среде обуславливает уменьшение минимальной длины кристаллизатора. При увеличении коэффициента теплопроводности материала кристаллизатора улучшаются условия передачи теплоты от расплава к наружной поверхности кристаллизатора, однако его влияние на длину кристаллизатора значительно меньше, чем изменение коэффициента теплоотдачи. Следует отметить, что выбор материала для кристаллизатора рассматриваемого типа существенного значения не имеет, однако наиболее технологично его выполнить из меди или ее сплавов.

Технологические методы обеспечения упругих, прочностных и геометрических характеристик алюминиевых трубок предполагают построение статистических характеристик черновых заготовок после их разлива и волочения в безопрочном режиме, на цилиндрических закрепленной и подвижной оправках, а также проведения последующей поверхностной обработки с оценкой степени деформационной анизотропии упругих и прочностных характеристик.

Одной из основных характеристик заготовок алюминиевых трубок является стабильность толщины стенки, которая определяет однородность жесткости трубок и их деформационное поведение в процессе волочения.

Для оценки статистических характеристик толщины заготовок проводили исследование представительных выборок, как по длине трубок, так и по их количеству. Толщину стенок измеряли с точностью до 0,001 мм по окружной координате на каждой фиксированной длине. Выполненные измерения позволили установить, что изменение толщины трубок в можно представить в виде соотношения:

$$b(l) = b_{\beta}(l) + b_j(l), \quad (11)$$

где  $l$  – текущая координата по длине трубки;

$b_{\beta}(l)$  – периодическая функция;

$b_j(l)$  – случайная функция с нулевым средним, которая удовлетворяет условиям эргодичности.

Периодическая компонента  $b_{\beta}(l)$  является гармонической и может быть представлена в виде:

$$b_{\beta}(l) = b_o + A \cdot \cos(\omega \cdot l + \varphi), \quad (12)$$

где  $b_o$  – статистическая средняя толщина стенки, учитывается только для расчета количества переходов и не влияет на стабильность толщины трубок;

$A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  – соответственно детерминированная амплитуда, круговая частота и фаза повторности,  $\omega = 2\pi/T$ ,  $T$  – период колебаний.

Случайная компонента  $b_j(l)$  характеризуется корреляционной функцией:

$$b_j(l) = D_h \cdot \exp(-k^2 \cdot l_i), \quad (13)$$

где  $D_h$  – дисперсия толщины стенки;

$l_i$  – расстояние от рассматриваемой точки  $i$ ;

$k$  – положительная константа.

Последующая статистическая обработка результатов полученных измерений для заготовок алюминиевых трубок диаметром 8,0 мм и толщиной стенки 0,5 мм из сплава Д16Т позволила установить следующие значения параметров функций (12)–(13):

$$A = 0,041 \text{ мм}; T = 80 \text{ мм}; D_h = 0,2676 \cdot 10^{-3}; k = 2,839; \varphi = 0.$$

При безопрочном волочении с вытяжкой 1,1 на первом переходе наблюдается изменение параметров функций (12)–(13) до значений:

$$A = 0,121 \text{ мм}; T = 96 \text{ мм}; D_h = 0,5876 \cdot 10^{-3}; k = 1,193; \varphi = 0.$$

Волочение на цилиндрической закрепленной оправке с вытяжкой 1,05 на втором переходе обеспечивает выполнение параметров функций (12)–(14) в виде:

$$A = 0,012 \text{ мм}; T = 104 \text{ мм}; D_h = 0,0066 \cdot 10^{-3}; k = 0,798; \varphi = 0.$$

Рассмотрение полученных результатов свидетельствует о том, что при безопрывочном волочении степень колебания толщины алюминиевых трубок возрастает, а при оправочном волочении на закрепленной оправке – снижается. Однако фактическая стабилизация толщины стенки трубок приводит к искривлению осевой линии, что обусловлено несимметричностью зоны деформирования в волоке [1, 3].

Для восстановления прямолинейности оси трубки необходимо ее подвергнуть обратной пластической деформации, при этом база обратной деформации должна соответствовать периоду  $T = 104$  мм, а уровень деформации  $\varepsilon_{обр}$  – нижеприведенному соотношению:

$$\varepsilon_{обр} = \frac{1,05(D_h)^{0,5}}{A}. \quad (14)$$

В процессе волочения заготовок трубок формируется деформационная анизотропия структуры их материала, степень которой определяется методами, изложенными в работе [6].

Прогнозирование упругих и прочностных характеристик алюминиевых трубок в условиях образования структурной анизотропии возможно с применением методов, представленных в работах [6, 7].

Повышение жесткости трубок и обеспечение их геометрической точности достигается методом электрохимического оксидирования, при котором толщина оксидированного слоя находится в пределах 10–50 мкм. Модуль упругости оксидированного слоя достигает 4...5 ГПа, а микротвердость составляет 50–90 МПа. Высокие показатели механических характеристик оксидных покрытий при их толщине, составляющей 10–15 % толщины стенки, значительно повышают жесткостные параметры указанных алюминиевых трубок.

#### ВЫВОДЫ

Построена система дифференциальных уравнений, решение которой представлено в виде конечных формул, определяющих распределение температуры по длине кристаллизатора как в объеме расплава, так и элементах кристаллизатора. Дана оценка точности по толщине стенки трубок и по ее осевой линии.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труболитейное производство / [Хахалин В. Д., Семко В. И., Смоляков А. Н. и др.]. – М. : Металлургия, 1977. – 224 с.
2. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор / [Гецелев З. Н., Балахонце Г. А., Квасов Ф. И. и др.]. – М. : Металлургия, 1983. – 152 с.
3. Непрерывная кристаллизация тонких прутков из алюминиевых сплавов / Скачков В. А., Колобов Г. А., Иванов В. И., Оверчук О. Р. // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения.* – Донецк : Изд-во ДНТУ, 2005. – С. 262–266.
4. Тарновский И. Я. Теория обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев. – М. : Металлургия, 1963. – 431 с.
5. Перлин И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, М. З. Ерманок. – М. : Металлургия, 1971. – 449 с.
6. Гун Г. Я. Пластическое формоизменение металлов / Г. Я. Гун. – М. : Металлургия, 1968. – 521 с.
7. Адамеску Р. А. Анизотропия физических свойств металлов / Р. А. Адамеску, П. В. Гельд, Е. А. Митюшов. – М. : Металлургия, 1985. – 235 с.

Скачков В. А. – канд. техн. наук, доц. ЗГИА;

Бережная О. Р. – ст. преп. ЗГИА;

Оверчук О. Р. – соискатель ЗГИА;

Колобов Г. А. – канд. техн. наук, проф. ЗГИА.

ЗГИА – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье.

E-mail: berolgar@ukr.net

Статья поступила в редакцию 11.10.2012 г.