

*Запропоновано розрахунок кристалізатора для безперервного розливання тонких прутків з алюмінієвих сплавів і досліджено вплив умов зовнішнього теплообміну на конструктивні параметри. Отримано кінцеві відношення у вигляді аналітичних залежностей, які встановлюють кінцеву довжину кристалізатору від температури перегріву розплаву, коефіцієнтів теплопровідності, матеріалу кристалізатора та коефіцієнтів теплопередачі в навколишнє середовище*

*Ключові слова: алюмінієві сплави, безперервне розливання, кристалізатор, температура розплаву, теплообмін, швидкість витягування*

*Предложен расчет кристаллизатора для непрерывной разливки тонких прутков из алюминиевых сплавов и исследовано влияние условий внешнего теплообмена на конструктивные параметры. Получены конечные соотношения в виде аналитических зависимостей, которые устанавливают предельную длину кристаллизатора от температуры перегрева расплава, коэффициентов теплопроводности, материала кристаллизатора и коэффициентов теплопередачи в окружающую среду*

*Ключевые слова: алюминиевые сплавы, непрерывная разливка, кристаллизатор, температура расплава, теплообмен, скорость вытягивания*

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРУТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**О. Р. Бережная**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра металлургии цветных металлов  
Запорожская государственная инженерная академия  
пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, 69006  
E-mail: berolgar@ukr.net

## 1. Введение

Вопросы непрерывного вытягивания прутков из расплава высокопрочных алюминиевых сплавов представляют актуальную проблему. Наиболее важным является расчет минимальной длины кристаллизатора.

Длина кристаллизатора зависит от условий теплоотвода в окружающую среду, условий теплоотвода от расплава к кристаллизатору и материала кристаллизатора.

Одним из основных технологических параметров процесса вытяжки прутка из расплава является теплоотвод в окружающую среду.

## 2. Постановка проблемы

Для непрерывной разливки тонких прутков из алюминиевых сплавов необходимо рассмотреть условия кристаллизации, а также рассчитать длину кристаллизатора с внешним охлаждением в среде жидкости или газа.

## 3. Анализ литературных данных

Непрерывная разливка металлов и сплавов реализована процессом литья металла в кристаллизатор с получением крупногабаритных заготовок. При литье

в высокий кристаллизатор металл охлаждается только через стенку и в этом мало отличается от литья в изложницу. При литье в короткий кристаллизатор в нем образуется только наружная корочка, удерживающая металл от растекания, а основное охлаждение осуществляется водой, подаваемое на слиток, чем достигается резкое увеличение интенсивности охлаждения [1, 2]. Кристаллизаторы для получения тонких прутков непрерывного или полунепрерывного литья не используются [3].

Конструктивные особенности кристаллизаторов рассмотрены в работах [4 – 7]. В работе [4] решена проблема увеличения скорости вытягивания слитка за счет устранения воздушных зазоров между кристаллизатором и слитком. Влияние профиля кристаллизатора на качество поверхностных и подповерхностных слоев рассмотрено в работе [5].

Особое значение на дефектообразование слитка оказывает формирование мениска, усадка слитка и конусность кристаллизатора [6, 7].

## 4. Методика расчета кристаллизатора

Непрерывная разливка тонких прутков из алюминиевых сплавов может быть реализована в металлургическом трубчатом кристаллизаторе с внешним охлаждением в среде жидкости или газа. Расчетная схема представлена на рис. 1.

В зоне расплава температура алюминиевого сплава составляет  $T_p$ , которая превышает температуру плавления  $T_{пл}$  на величину перегрева  $T_{np}$ .

Рассматривая тепловой баланс в пределах  $[x, x + dx]$  (рис. 1), можно записать:

$$Q_x - Q_{x+dx} = dQ, \quad (1)$$

где  $Q_x, Q_{x+dx}$  – поступление и отдача тепла в сечении  $x$  и  $x + dx$ ;

$dQ$  – отвод тепла через боковую поверхность кристаллизатора.

Величина  $dQ$  определяется передачей тепла от текущего расплава к внутренней поверхности кристаллизатора  $dQ_{жт}$ , по толщине стенки кристаллизатора  $dQ_T$  и от наружной поверхности трубки в окружающую среду  $dQ_B$ :

$$dQ = dQ_{жт} = dQ_T = dQ_B. \quad (2)$$

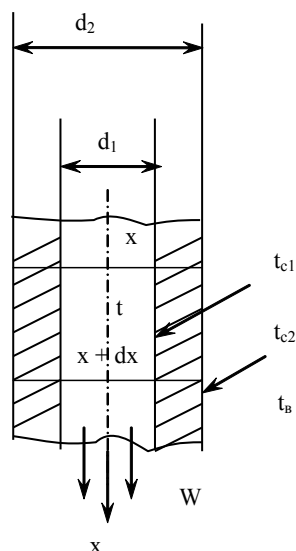


Рис. 1. Расчетная схема кристаллизации:  $t$  – температура текущего расплава;  $W$  – скорость течения расплава;  $t_{c1}, t_{c2}$  – температура внутренней и внешней поверхности кристаллизатора;  $t_B$  – температура охлаждающей внешней среды;  $d_1, d_2$  – внутренний и наружный диаметр кристаллизатора

В соотношении (2) компоненты определяются [8, 9]:

$$dQ_{жт} = \alpha_{жт} \cdot \pi d_1 (t - t_{c1}) dx; \quad (3)$$

$$dQ_T = \frac{2\pi(t_{c1} - t_{c2})\lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}} dx; \quad (4)$$

$$dQ_B = \alpha_{тв} \cdot \pi d_2 (t_{c2} - t_B) dx, \quad (5)$$

где  $\alpha_{жт}, \alpha_{тв}$  – коэффициенты теплоотдачи от расплава к кристаллизатору и от кристаллизатора к внешней среде;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала кристаллизатора;

$t, t_{c1}, t_{c2}, t_B$  – температура расплава, внутренней, внешней поверхности кристаллизатора и окружающей среды соответственно.

При выводе уравнения (3) и (5) приняты граничные уравнения, основанные на законе Ньютона-Рихмана [8].

Исключая из (3) температуры  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ , после преобразований получим:

$$dQ = \frac{\pi(t - t_B)dx}{\frac{1}{\alpha_{жт} d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{тв} d_2}}. \quad (6)$$

В уравнении баланса (1) разность тепловых потоков определяется

$$Q_x - Q_{x+dx} = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot C \cdot \rho \cdot W \frac{dt}{dx}, \quad (7)$$

где  $C$  – теплоемкость текущего расплава;

$\rho$  – плотность расплава;

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

Подставляя (6) и (7) в уравнение баланса (1), получим

$$\frac{dt}{dx} = \frac{4(t_B - t)}{c \cdot \rho \cdot W \left[ \frac{d_1}{\alpha_{жт}} + \frac{d_1^2}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_1^2}{\alpha_{тв} d_2} \right]}. \quad (8)$$

Уравнение (8) получено для условий:

- теплоемкость расплава  $C$  – не зависит от температуры;
- скорость течения расплава  $W$  – постоянная по длине кристаллизатора;
- температура расплава распределена по диаметру равномерно.

Граничное условие для уравнения (8) представляет равенство температуры в начале кристаллизатора и температуры зоны расплава

$$t/x=0 = T_p. \quad (9)$$

Решение уравнения (8) с учетом (9), запишется в виде

$$t = t_B + (T_p - t_B) e^{-\frac{4x}{cWD}}, \quad (10)$$

где  $D = \frac{d_1}{\alpha_{жт}} + \frac{d_1^2}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_1^2}{\alpha_{тв} d_2}$ .

В зоне кристаллизации температура равна  $t = t_{кр}$ . В этом случае минимальная длина кристаллизатора определяется:

$$X_{min} = -\frac{C \cdot \rho \cdot W \cdot D}{4} \ln \frac{t_{кр} - t_B}{T_p - t_B}. \quad (11)$$

**5. Апробация методики расчета кристаллизатора для получения прутков из алюминиевых сплавов**

Длина кристаллизатора зависит от материала кристаллизатора, условий теплоотвода в окружающую среду и условий теплоотвода от расплава к кристаллизатору. Исходные данные для расчета представлены в табл. 1 [10].

Таблица 1

Основные параметры системы расплав-кристаллизатор

$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$c$ , кал/(моль·град)	$T_p$ , °C	$T_{кр}$ , °C	$t_{в}$ , °C	$W$ , м/с
10,0	12,0	2,35	7,0 [1]	800,0	663 [8]	30,0	0,3

Наиболее важными технологическим параметром процесса вытяжки прутка являются условия внешнего охлаждения. Условия внешнего охлаждения определяются коэффициентом теплоотдачи от кристаллизатора к внешней среде  $\alpha_{ме}$ . Коэффициент теплоотдачи изменяется в широких пределах в зависимости от внешнего теплоносителя.

Для расчетов принято изменение  $\alpha_{ме}$  от 1 до 400 (ккал/(м<sup>2</sup>·ч·град) [1, 8].

Из анализа расчетных данных рис. 2, а следует, что увеличение коэффициента теплоотдачи от кристаллизатора к внешней среде обуславливает уменьшение минимальной длины кристаллизатора. Значительное уменьшение длины кристаллизатора наблюдается до значения  $\alpha_{ме} = 100$  (ккал/(м<sup>2</sup>·ч·град). Большие значения  $\alpha_{ме}$  практически не влияют на уменьшение длины.

Другим параметром, определяющим условия передачи тепла, является коэффициент теплопроводности материала кристаллизатора  $\lambda$ . Для расчетов принят диапазон изменения  $\lambda$  от 30 до 340 (ккал/(м·ч·град). Значение  $\lambda = 30$  примерно соответствует коэффициенту теплопроводности стали, 340 – коэффициенту теплопроводности меди [8].

На рис. 2, б представлена зависимость минимальной длины кристаллизатора от скорости разлива металла. Для расчетов принят диапазон измерения  $W$  от 0,08 до 0,78 м/с. Из графика видно, что при увеличении скорости разлива необходимо увеличивать длину кристаллизатора.

Важное значение для выбора минимальной длины кристаллизатора имеют температура окружающей среды и температура расплава алюминиевых сплавов. С увеличением температуры окружающей среды с 300 К до 340 К минимальная длина кристаллизатора увеличивается с 310 мм до 328 мм (рис. 3, а).

Увеличение температуры расплава с 1070 К до 1120 К обуславливает увеличение длины кристаллизатора с 300 мм до 400 мм (рис. 3, б).

Из анализа данных (рис. 2, 3) следует, что при вытягивании прутка со скоростью не более 0,6 м/с минимальная длина кристаллизатора соответствует 330 мм.

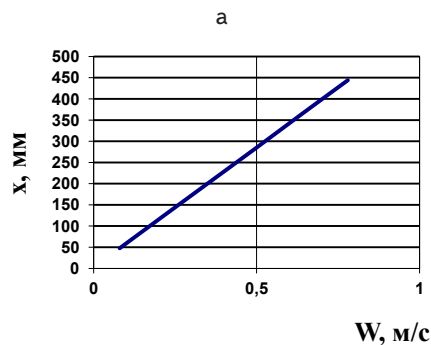
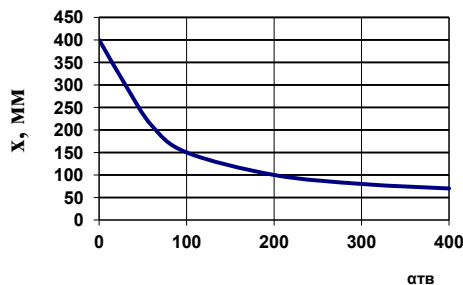


Рис. 2. Зависимость длины кристаллизатора  $x$  от коэффициента теплоотдачи кристаллизатора  $\alpha_{ме}$  к внешней среде (а) и от линейной скорости течения расплава  $W$  (б)

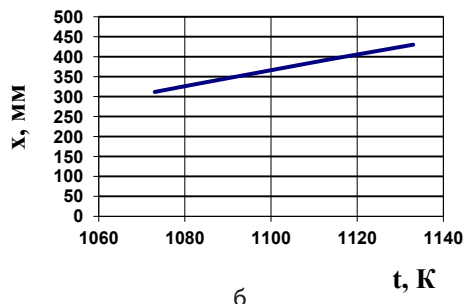
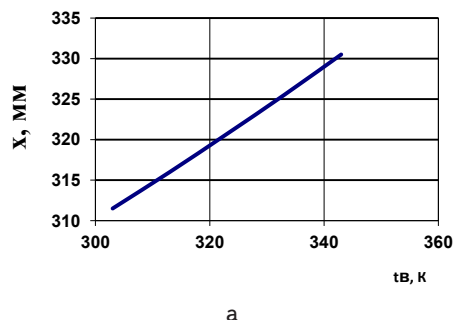


Рис. 3. Зависимость минимальной длины кристаллизатора  $x$  от: а – температуры окружающей среды  $t_{\delta}$ , б – от температуры расплава  $t$

**5. Выводы**

Выведено дифференциальное уравнение, которое описывает распределение температуры в вытягиваемом

мом прутке по длине кристаллизатора. Решение уравнения дает возможность рассчитать минимальную длину кристаллизатора. Проведенные расчеты пока-

зали, что минимальная длина кристаллизатора 330 мм соответствует скорости вытягивания прутка не более 0,6 м/с.

### Литература

1. Хахалин, В. Д. Труболитейное производство [Текст] / В. Д. Хахалин, В. И. Семко, А. Н. Смоляков, А. С. Черезов, Н. М. Боковой – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.
2. Гецелев, З. Н. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор [Текст] / З. Н. Гецелев, Г. А. Балахонцев, Ф. И. Квасов, Г. В. Черепок, И. И. Варга, Г. И. Мартынов - М.: Металлургия, 1983. – 152 с.
3. Скачков, В. А. Исследование кристаллизации трубок малого диаметра из алюминиевых сплавов прецизионной точности [Текст] / В. А. Скачков, О. Р. Бережная, О. Р. Оверчук, Г. А. Колобов // Обробка матеріалів тиском. - Збірник наукових праць – Краматорськ: ДГМА, 2012. - №4 (33). С.212 – 215.
4. Pavlicevic M., Matijasevic B., Karaj N. (1997) Hicast: a new approach to high speed casting // Rev. Met. – CIT. 1997. Oct. P. 1215, 1217 – 1223.
5. Ганкин, В. Гильзовые кристаллизаторы для высокоскоростной разливки стали [Текст] / В. Ганкин, А. Белитченко, Н. Богданов. Тр. VI Конгр. сталеплавильщиков. М., 2001. С. 461 – 469.
6. Bertoletti C., Courbe P., Joliver J. M. (1998) Meniscus free casting: metallurgical and technological results //3<sup>rd</sup> Europ. Conf. Continuous Casting. 1998. P. 65 – 74.
7. Кондо, К. Разработка технологии высокоскоростной разливки низкоуглеродистых сталей [Текст] / К. Кондо, Я. Сакамито, К. Хара // Dzaıjre to rıgosehsu. 1999. T.7. №1. С. 280.
8. Исаченко, В. П. Теплоотдача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. - М.: Энергия, 1981. – 416 с.
9. Самойлович, Ю. А. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю. А. Самойлович, С. А. Крулевецкий, В. А. Горянов, З. К. Кабаков // М.: Металлургия, 1982. – 152с.
10. Троицкий, В. А. Металлургия алюминия [Текст] / В. А. Троицкий, В. А. Железнов. – М.: Металлургия, 1984. – 400 с.

*Методом іонної імплантації отримані модифіковані покриття нітридів титану та хрому на підкладках вуглецевої і конструкційної легованої сталей. Вивчені структура та фізичні властивості цих покриттів, а також їх використання в якості захисних покриттів на дрібно розмірному волоочильному інструменті*

*Ключові слова: іонна імплантаци́я, титан, хром, модифіковане покриття, мікротвердість, зносостійкість, експлуатаційна стійкість*

*Методом ионной имплантации получены модифицированные покрытия нитридов титана и хрома на подложках углеродистой и конструкционной легированной сталей. Изучены структура и физические свойства этих покрытий, а также их использование в качестве защитных покрытий на мелко-размерном волоочильном инструменте*

*Ключевые слова: ионная имплантация, титан, хром, модифицированное покрытие, микротвердость, износостойкость, эксплуатационная стойкость*

УДК 533.59

## ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕЛКО- РАЗМЕРНОГО СТАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

**Л. А. Васецкая**

Кандидат технических наук, старший преподаватель  
Кафедра общей физики и технической механики  
Институт химических технологий  
Восточноукраинского национального университета  
им. Владимира Даля (г. Рубежное)  
ул. Ленина, 31, г. Рубежное,  
Луганская обл., Украина, 93009  
E-mail: VasLa@i.ua

### 1. Введение

В настоящее время снижение расходов на приобретение износостойкого инструмента имеет

экономические выгоды для производителя. Одним из способов такого снижения расходов является замена дорогостоящих материалов более дешевыми. Однако подобная замена приводит к