

### III. ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 621.762:669

А.Н. АБРАМЕНКО, А.С. КАЛИНИЧЕНКО,  
М.А. АНТОНЕВИЧ, Э.Д. СЫЧИКОВ

#### РАСЧЕТ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТОЛЩИНЫ ЛЕНТ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЗАКАЛКОЙ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

В настоящее время все большее распространение получают процессы сверхбыстрого охлаждения расплавов, в том числе закалка из жидкого состояния, которые позволяют получать материалы с физико-механическими свойствами, значительно превосходящие аналогичные из традиционных сплавов [1]. Важным элементом в теоретическом плане является определение скоростей охлаждения, при обеспечении которых фиксируются мелкокристаллические и аморфные состояния. В работах [2–4] сделаны аналитические расчеты этих скоростей. Недостатком таких расчетов является значительное количество упрощений и допущений, в частности не учитывается теплообмен ленты и вала с окружающей средой, переменность теплофизических характеристик и т. д. Решение сопряженной задачи, учитывающей в комплексе влияния основных факторов на скорость охлаждения, возможно провести только численным методом.

В литературе имеются работы по определению толщины формирующегося слоя как при экстракции расплава [5, 6], так и при спиннинговании (литье на один вращающийся валок) [7, 8]. Расчеты применительно к процессу спиннингования основаны либо на обработке экспериментальных результатов [7], либо на анализе вихревого течения расплава, захватываемого валком [6], либо учитывают скорость объемного течения [8]. Представленные расчетные формулы в одном случае сложны для применения, в другом – пригодны только для частных случаев.

Поэтому в настоящей работе ставилась задача численного расчета скорости охлаждения слоя расплава, толщина которого рассчитывалась для конкретных технологических условий литья применительно к процессу спиннингования. Исходя из поставленной задачи рассмотрены параметры, влияющие на формирование толщины ленты.

Предложена модель процесса формирования, которая основана на посылке, что растекание и удержание слоя расплава на периферии вращающегося вала происходит за счет сил поверхностного натяжения. Такая модель имеет смысл только в случае смачивания материала вала-кристаллизатора жидким металлом. Были выполнены расчеты для двух схем подвода расплава: подачи под действием металлостатического напора (спиннингование); за счет захвата валком, соприкасающимся с объемом расплава (литье намораживанием) [7].

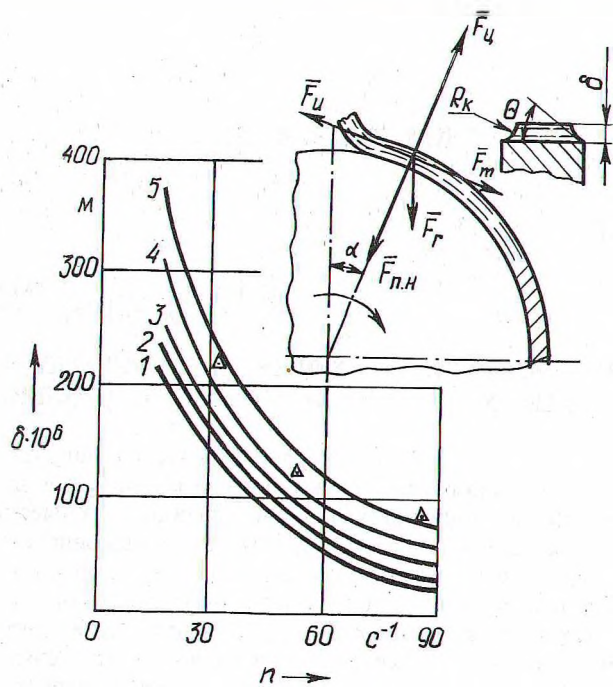


Рис. 1. Зависимость толщины ленты от числа оборотов вала при подаче расплава под действием металлостатического напора:

1 - 5 -  $R_B = 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1$  м

При подаче расплава под действием металлостатического напора (рис. 1) расчет толщины основывается на анализе баланса сил, действующих на элементарный участок расплава. Силы трения  $\bar{F}_T$ , гравитации  $\bar{F}_G$  и поверхностного натяжения  $\bar{F}_{п.н}$  удерживают расплав на валке, центробежная сила  $\bar{F}_c$  и сила инерции  $\bar{F}_и$  срывают его. В векторной форме баланс сил

$$\bar{F}_T + \bar{F}_G + \bar{F}_{п.н} + \bar{F}_c + \bar{F}_и = 0. \quad (1)$$

Частица жидкого металла захватывается только в том случае, когда сила инерции равна силе трения.

Центробежная сила, силы гравитации и поверхностного натяжения выражаются:

$$\bar{F}_c = 4\pi^2 n^2 \rho \delta R_B A; \quad (2)$$

$$\bar{F}_G = \rho \delta g A \cos \alpha; \quad (3)$$

$$\bar{F}_{п.н} = \frac{\sigma}{\delta} A \cos \theta, \quad (4)$$

где  $n$  — частота вращения вала,  $c^{-1}$ ;  $\delta$  — толщина ленты, м;  $A$  — площадь частицы расплава,  $m^2$ ;  $\rho$  — плотность расплава,  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  — угол наклона литнико-

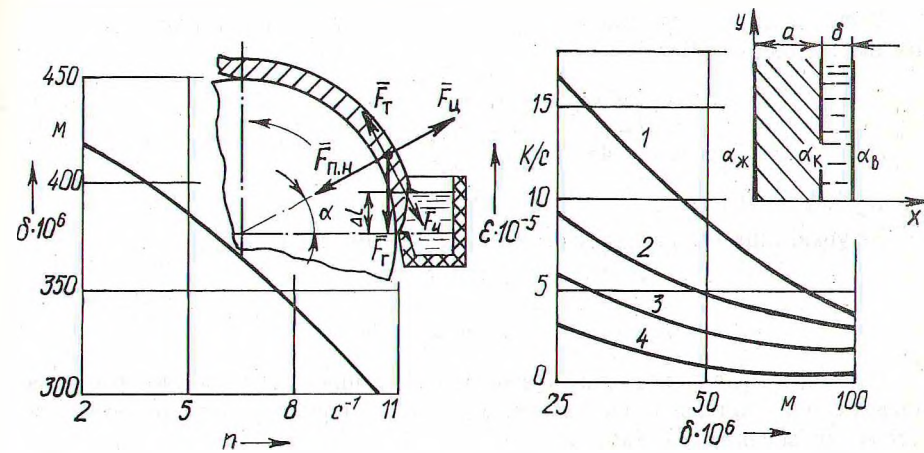


Рис. 2. Расчетная зависимость толщины ленты от числа оборотов вала при литье намораживанием:

$R_B = 0,3$  м

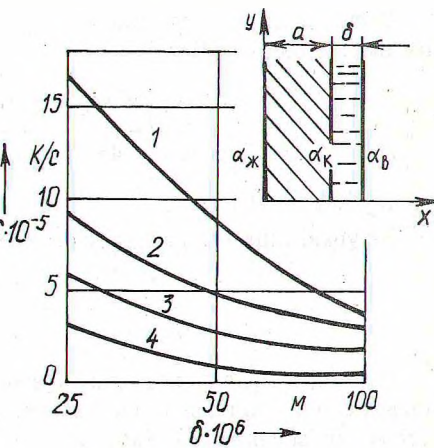


Рис. 3. Зависимость скорости охлаждения ленты от ее толщины при разных коэффициентах теплообмена:

$T_{кр} = 173$  К; 1 -  $\alpha = 15 \cdot 10^4$ ; 2 -  $\alpha = 75 \cdot 10^3$ ; 3 -  $\alpha = 50 \cdot 10^3$ ; 4 -  $\alpha = 15 \cdot 10^3$  Вт/( $m^2 \cdot K$ )

вой системы, град;  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $\theta$  — контактный угол смачивания, град.

Решая уравнения (2) — (4), находим максимальную толщину жидкометаллической ленты, сформировавшейся на вращающемся валке-кристаллизаторе

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma \cos \theta}{4\rho n^2 R_B - \rho g \cos \alpha}} \quad (5)$$

Когда гравитационное ускорение составляет менее 5% центростремительного, формула (5) упрощается

$$\delta = \frac{1}{2\pi n} \sqrt{\frac{\sigma \cos \theta}{\rho R_B}}$$

При захвате расплава валком из открытой литниковой коробки (рис. 2) баланс сил инерции и трения выразится следующим образом:

$$\bar{F}_T + f(\bar{F}_{п.н} + \bar{F}_c) + \bar{F}_и = 0. \quad (6)$$

Если сделать допущение, что захваченная частица жидкого металла, разгоняясь на участке  $\Delta l$  до линейной скорости  $v_0$ , движется равноускоренно, то ее ускорение

$$a_ч = v_0^2 / (2\Delta l), \quad (7)$$

где  $\Delta l$  — высота свободного слоя расплава.



В таком случае коэффициент трения  $f$  выразится из формулы (6) с учетом выражений (2), (4) и (7):

$$f = \frac{\rho \delta (a_{\text{ж}} + g \cos \alpha)}{\sigma \cos \theta / \delta - 4\pi^2 n^2 R_{\text{в}} \rho \delta + \rho \delta g \sin \alpha}, \quad (8)$$

где  $R_{\text{в}}$  — радиус вала, м.

Из уравнения (8) находится толщина формируемой ленты

$$\delta = \sqrt{\frac{f \sigma \cos \theta}{\rho (a_{\text{ж}} + g \cos \alpha + 4f \pi^2 n^2 R_{\text{в}} - f g \sin \alpha)}}.$$

При определении скорости охлаждения сформировавшегося слоя расплава определенной толщины (в зависимости от условий разлива) решается система уравнений, куда входят:

уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (9)$$

уравнение, описывающее теплообмен между валком и охлаждающей средой (рис. 3)

$$\alpha_{\text{ж}} (T_{\text{кр}} - T_{\text{ж}}) = -\lambda_{\text{кр}} \frac{\partial T_{\text{кр}}}{\partial x}, \quad x = 0, \quad (10)$$

уравнения, описывающие контактный теплообмен между лентой и подложкой

$$-\lambda_{\text{л}} \frac{\partial T_{\text{л}}}{\partial x} = \alpha_{\text{к}} (T'_{\text{л}} - T'_{\text{кр}}), \quad x = a; \quad (11)$$

$$-\lambda_{\text{к}} \frac{\partial T_{\text{кр}}}{\partial x} = \alpha_{\text{к}} (T'_{\text{л}} - T'_{\text{кр}}), \quad x = a, \quad (12)$$

уравнение, описывающее теплообмен между лентой и окружающей средой

$$\alpha_{\text{в}} (T_{\text{л}} - T_{\text{в}}) = -\lambda \frac{\partial T_{\text{л}}}{\partial x}, \quad x = a + b, \quad (13)$$

где  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $T$  — температура, К;  $T'$  — температура контакта, К;  $x$  — координата, м;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $a$  — толщина кристаллизатора, м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ; индексы: в — воздух, ж — жидкость, к — контакт, кр — кристаллизатор, л — лента.

Коэффициент теплообмена между лентой и кристаллизатором подсчитывался как отношение теплопроводности слоя воздуха к средней высоте микронеровностей поверхности контакта.

Задача решалась на ЭВМ численным методом.

Для расчета толщины лент необходимо определение контактного угла сма-

чивания. По высоте слоя расплава, удержавшегося в капилляре, экспериментально установлено, что угол смачивания алюминием меди (с учетом усадки при затвердевании) равен  $50-55^\circ$  при  $\sigma = 0,86 \text{ Н/м}$ .

Влияние частоты вращения вала на толщину образуемой ленты при подаче расплава под металлостатическим давлением приведено на рис. 1. Расчетные результаты сопоставлялись с экспериментальными, полученными на установке с радиусом  $R_{\text{в}} = 0,1 \text{ м}$  при частоте вращения  $33, 50, 83 \text{ с}^{-1}$ . Можно отметить, что эксперимент и расчет хорошо согласуются.

На установке, работающей по принципу захвата расплава из открытой литниковой коробки, имеющей медный валок радиусом  $0,3 \text{ м}$  и литниковую систему, наклоненную под углом  $17,5^\circ$ , были проведены эксперименты при частоте вращения  $2,67 \text{ с}^{-1}$ . Нормальное протекание процесса обеспечивалось при свободной высоте слоя расплавленного алюминия  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Эксперименты позволили определить коэффициент трения между расплавом и стенкой кристаллизатора  $f \approx 0,3$ . На основании полученных данных были проведены расчеты зависимости толщины ленты от частоты вращения вала (см. рис. 2).

Расчет скорости охлаждения проводился для лент из алюминиевых сплавов, охлаждаемых на медной подложке при различных значениях коэффициента теплообмена между расплавом и кристаллизатором. Результаты расчета показали большое влияние этого параметра на скорость охлаждения. Их значения для лент толщиной  $(25-100) \cdot 10^{-6} \text{ м}$  варьировали в пределах  $10^6 - 10^5 \text{ К/с}$ . Такая интенсивность охлаждения обеспечивала получение образцов с мелкодисперсной структурой и повышенными механическими свойствами.

В настоящей работе проведен расчет размеров и скоростей охлаждения лент, сформированных в процессе высокоскоростного затвердевания при литье на один вращающийся валок. Большая скорость затвердевания позволила получить аморфную или мелкодисперсную структуру, что было подтверждено металлографическими исследованиями. Образцы имели повышенные механические свойства по сравнению с такими же материалами, полученными методами литья.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андриевский Р.А., Нурдин А.А. Аморфные и ультрадисперсные порошки и материалы на их основе // Порошковая металлургия. — М.: ВИНТИ АН СССР. — 1986. — Т. 2. — С. 3—64.
2. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. — М.: Металлургия, 1982. — 168 с.
3. Об определении скорости охлаждения при закалке из жидкого состояния / Ю.К. Кавнерский, Н.П. Болотина, А.А. Раваев и др. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1983. — № 4. — С. 76—79.
4. Иванов О.А., Шейхалиев Ш.М. Расчет скорости охлаждения при закалке из жидкого состояния // Изв. АН СССР. Металлы. — 1985. — № 5. — С. 70—73.
5. Васильев В.А., Митин П.С. О получении метастабильных материалов закалкой из расплава // Изв. АН СССР. Металлы. — 1982. — № 6. — С. 71—76.
6. Antony T.R., Cliné H.E. A Fluid-Flow Temperature Model for the Casting of Amorphous Metal Ribbon by Melt Extraction // J. Appl. Phys. — 1979. — V. 50. — N 1. — P. 239—244.
7. Кавеш Ш. Принципы производства. — Металлические стекла // Под ред. Дж. Дж. Гилмана, Х. Дж. Лими: Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1984. — С. 39—66.
8. Золотухин И. В. Физические свойства аморфных металлических материалов. — М.: Металлургия, 1986. — 176 с.