

УДК 69.216-147:539.213

Г.А. Сребрянский, А.П. Стовпченко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ ИЗ РАСПЛАВА

Введение

При получении металлической ленты из расплава разливкой на наружную поверхность барабана-кристаллизатора реализуются условия охлаждения, позволяющие получать различные сплавы в аморфном или микрокристаллическом состоянии. Структура и свойства аморфных и микрокристаллических лент во многом определяются этими условиями [1-4]. Основными параметрами при этом являются толщина ленты, коэффициент теплопередачи на границе «расплав (лента) - барабан» и скорость охлаждения. Учитывая малую толщину получаемых лент (15-60) мкм и быстротечность процесса, определение указанных параметров является актуальным.

Постановка задачи

Поскольку экспериментальных работ по определению скорости охлаждения и коэффициента теплопередачи относительно мало [5-7], в настоящей работе ставилась задача определить коэффициент теплопередачи в процессе контакта ленты с барабаном и среднюю скорость охлаждения за этот период.

Материал и методика эксперимента

Для экспериментального определения искомых параметров использовали методику, теоретический аспект которой был описан в работе [8]. Определяли среднюю температуру ленты после схода с поверхности барабана, для чего сформировавшуюся ленту сразу после съёма с барабана направляли в калориметр с 0,8 л воды. При этом контролировали температуру расплава, скорость вращения барабана, точку подачи расплава на барабан и место отрыва ленты от его поверхности, толщину получаемой ленты. Схема опыта показана на рис.1.

По известным точкам подачи расплава и съёма ленты при известной скорости вращения барабана определяли время контакта с ним расплава (ленты). Зная температуру расплава перед разливкой, температуру ленты, слетающей с барабана и её время контакта с ним, можно определить некоторую среднюю скорость охлаждения ленты на барабане и коэффициент теплопередачи. Средняя температура покинувшей барабан ленты рассчитывалась по тепловому балансу калориметра:

$$c_в m_в T_в = c_л m_л T_л \quad (1)$$

где c, m, T – теплоёмкость, масса и температура, индексы «в» и «л» относятся к воде и ленте соответственно. Температура воды в калориметре ($T_в$) измерялась спиртовым термометром с точностью до $0,1^{\circ}\text{C}$. Масса ленты ($m_л$) определялась на электронных весах после её просушки, а теплоёмкость ленты ($c_л$) вычисляли по результатам дифференциального термического анализа (ДТА), полученным с помощью термоанализатора «Дюпон 990» в соответствующем диапазоне температур. Использовали сплав $\text{Fe}_{83}\text{V}_{17}$ (ат.%), ленту которого получали на стальном и медном барабанах-кристаллизаторах, и сплав Sendust (Fe-Al-Si), получаемый на стальном барабане.

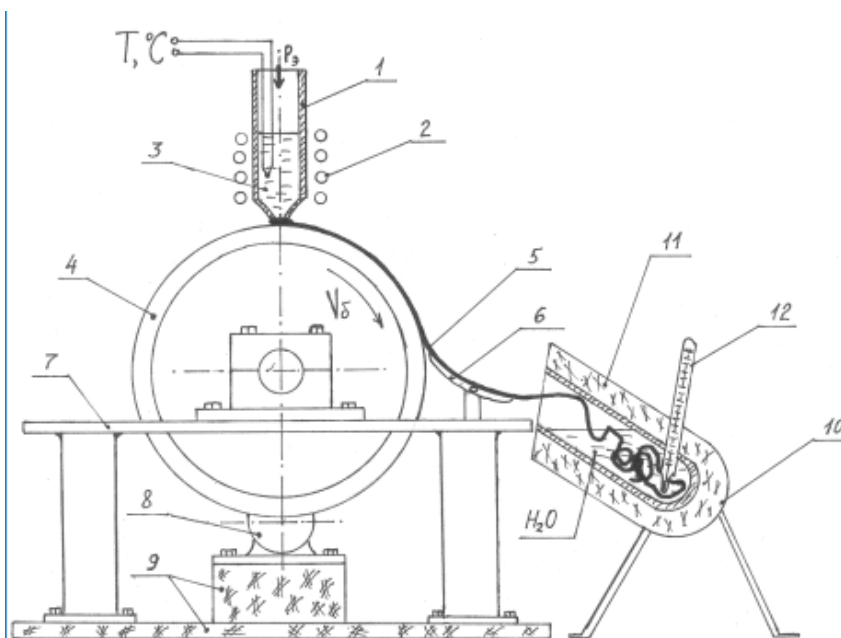


Рисунок 1 - Схема определения температуры аморфной ленты: 1-тигель; 2-индукционный нагреватель; 3-расплав; 4-закалочный барабан; 5-лента; 6-лентосъёмник; 7-рабочий стол; 8-приводной двигатель; 9-вибропоглощающие основания; 10,11-калориметр и его теплоизоляция; 12-термометр.

В соответствии с теоретическим обоснованием [8], определяли приведенный коэффициент теплопередачи из формулы:

$$h_{\infty} = \frac{\alpha^* a_l}{\nu}, \quad (2)$$

где h_{∞} - толщина получаемой ленты, a_l - её температуропроводность, а ν - теплофизический параметр, вычисляемый из соотношения:

$$\theta = e^{-\nu t}, \quad (3)$$

в котором t - время контакта ленты с барабаном, а θ - безразмерная температура:

$$\theta = \frac{T_{(x,t)} - T_{10}}{T_0 - T_{10}}, \quad (4)$$

где $T_{(x,t)}$ - средняя температура слетающей с барабана ленты, T_{10} - температура поверхности барабана, T_0 - температура расплава в момент разливки. После подстановки (4) в (3) и логарифмирования получаем выражение:

$$\nu = \frac{1}{t} \ln \frac{T_0 - T_{10}}{T_{(x,t)} - T_{10}}. \quad (5)$$

Теперь, определив температуру (среднюю) слетающей с барабана ленты с помощью калориметра (см. рис.1), замерив её толщину и время контакта с барабаном при известной температуропроводности можно определить приведенный коэффициент теплопередачи α^* (сделав в (2) все необходимые подстановки):

$$\alpha^* = \frac{h_{\infty} \nu}{a_l}. \quad (6)$$

Этот коэффициент теплопередачи α^* связан с искомым коэффициентом α соотношением:

$$\alpha = \lambda \cdot \alpha^*, \quad (7)$$

где λ - теплопроводность охлаждающегося слоя расплава или ленты. Здесь следует уточнить, что по различным экспериментальным данным, представленным в работе [3], значения теплопроводности расплава и ленты близки между собой (по крайней мере в рамках одного порядка) для сплавов на основе железа, никеля или кобальта [9]. Аналогичным образом ведет себя и температуропроводность, поэтому принимаем $\lambda = 40 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ и $a_l = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [3].

Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты экспериментов для сплава Fe₈₃V₁₇ (стальной барабан) представлены в таблице 1.

Таблица 1

Определение коэффициента теплопередачи при получении ленты на барабане из стали 45.

№№ п/п	Температура расплава T ₀ , °C	Средняя температура слетевшей ленты, T _(x,t) , °C	Время контакта ленты с барабаном t, с*10 ⁻³	толщина ленты h _∞ , мкм	Параметр v, с ⁻¹	Коэффициент α*, м ⁻¹	Коэффициент α, Вт/ м ² ·К* 10 ⁴	Средняя скорость охлаждения $\bar{V}_{охл}$, К/с·10 ⁵
1	1450	350	2,96	27	495	1909	7,64	3,7
2	1300	310	3,3	28	450	1800	7,2	3,0
3	1470	670	3,8	38	211	1145	4,38	2,1
4	1300	540	3,2	35	281	1405	5,62	2,4
5	1435	710	3,3	45	216	1389	5,57	2,2

Полученные данные показывают прямое соответствие между коэффициентом теплопередачи и средней скоростью охлаждения, причём однозначной корреляции между этими двумя величинами и толщиной ленты или температурой расплава не просматривается.

С учетом среднеквадратичной ошибки, посчитанной в соответствии с [10] для α и $\bar{V}_{охл}$ по формулам:

$$\sigma(\alpha) = K \sqrt{\frac{\sum \alpha^2}{5} - (\bar{\alpha})^2} \quad \text{и} \quad (8)$$

$$\sigma(\bar{V}_{охл}) = K \sqrt{\frac{\sum \bar{V}_{охл}^2}{5} - (\bar{\bar{V}}_{охл})^2}, \quad (9)$$

где $K=1,118$, получаем $\alpha=(5,22\pm 3,79)\cdot 10^4$ Вт/м²·К, а $\bar{V}_{охл}=(2,68\pm 0,67)\cdot 10^5$ К/с.

Полученные экспериментальным путем данные хорошо вписывались в диапазоны значений, полученных расчётным [11-16] и экспериментальным путём [5-7, 17].

Результаты аналогичных измерений, но для медного барабана, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Определение коэффициента теплопередачи при получении ленты на барабане из меди

№	Температура расплава $T_0, ^\circ\text{C}$	Средняя температура слетевшей ленты $T_{(x,t)}, ^\circ\text{C}$	Время контакта ленты с барабаном $t, \text{c} \cdot 10^{-3}$	Толщина ленты $h_\infty, \text{мкм}$	Параметр ν_1, c^{-1}	Коэффициент α^*, c^{-1}	Коэффициент $\alpha, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К} \cdot 10^4$	Средняя скорость охлаждения $\bar{V}_{\text{охл}}, \text{К/с} \cdot 10^5$
1	1200	300	3,3	30	436	1869	7,48	2,73
2	1280	393	2,7	22	451	1417	5,67	3,29
3	1350	230	2	30	923	3956	15,82	5,6
4	1180	186	2	20	972	2777	11,11	4,97
5	1180	330	2,7	40	489	2794	11,18	3,15
6	1200	357	2,97	35	422	2110	8,44	2,84
7	1300	420	2,7	40	431	2463	9,85	3,26

В отличие от стального барабана величины скоростей охлаждения для медного уже не показывали однозначного соответствия с коэффициентом теплопередачи. Но, так же как и в предыдущем случае, однозначная корреляция между толщиной ленты и температурой расплава отсутствует. Статистическая обработка результатов таблицы 2 по выражениям (8) и (9) даёт:

$$\alpha = (9,94 \pm 3,37) \cdot 10^4 \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К} \text{ и } \bar{V}_{\text{охл}} = (3,69 \pm 1,17) \cdot 10^5 \text{К/с}$$

Сравнение полученных значений для двух барабанов показывает незначительную разницу между коэффициентами теплопередачи и скоростями охлаждения на медном и стальном барабанах выше, но, хотя различие между теплопроводностью стали и меди велики (≈ 8 раз). Отсюда можно предположить, что условия охлаждения будут зависеть не только от температуры расплава, толщины ленты и теплопроводности барабана, но и от условий контакта ленты (расплава) с его поверхностью (что в данной работе не контролировалось из-за коррозии в калориметре лент сплава $\text{Fe}_{83}\text{V}_{17}$).

Дополнительная проверка точности определения температуры слетающей ленты, проведенная на микрокристаллическом сплаве Sendust (Fe-Al-Si), подтвердила правомерность выбранной методики, поскольку лента сходила с барабана при температуре $850-950^\circ\text{C}$, что согласовывалось с ранее полученными данными [18]. В опытах с этим сплавом использовали барабан из стали 45 (медный сплавом Sendust не смачивается), температура расплава варьировалась в пределах $1400-1450^\circ\text{C}$, а скорость барабана – от 25 до 30 м/с. При этом

сформировавшаяся лента отделялась от поверхности барабана самопроизвольно через 50-60мм от точки подачи расплава с указанной выше температурой (850-950⁰С), что наблюдалось даже невооруженным глазом.

Учитывая, что температуры разливки аморфного сплава Fe₈₃B₁₇ и Sendust различаются между собой незначительно, разницу в температурах слетающих с барабана лент обоих сплавов можно объяснить выделением скрытой теплоты кристаллизации. Эта теплота выделяется при формировании ленты сплава Sendust и замедляет её охлаждение в контакте с барабаном. В результате, при практически одинаковых толщинах и длине зоны контакта (времени контакта) с барабаном-кристаллизатором, ленты микрокристаллического сплава Sendust имеют более высокую температуру (см. рис.2).

Если при формировании аморфной ленты снижение её температуры происходит относительно монотонно по мере удаления от жидкой лужицы (рис. 2а), то тепловыделение в процессе кристаллизации вносит свой вклад в конечную температуру ленты и обуславливает её более высокую температуру на аналогичном удалении от лужицы (рис. 2б).

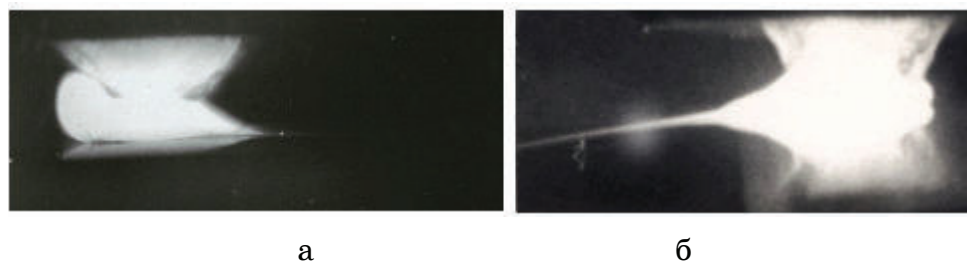


Рис.2 Формирование ленты из расплава на поверхности барабана: а – аморфной, б – микрокристаллической (сплав Sendust), x8.

Выводы

Результаты проведенных экспериментов показали, что коэффициенты теплопередачи на границе «расплав (лента) – барабан» и скорости охлаждения находятся в рамках одного порядка ($5 \div 9 \cdot 10^4$ Вт/м²К и $2 \div 4 \cdot 10^5$ К/с), несмотря на значительную разницу в коэффициентах теплопроводности (≈ 8 раз) стального и медного барабанов. Это указывает на их зависимость от плотности контакта ленты (расплава) с поверхностью барабана-кристаллизатора, определяемых условиями смачивания.

Показано также, что охлаждение аморфных лент отличается от охлаждения микрокристаллических отсутствием выделения скрытой теплоты кристаллизации, которая препятствует монотонному снижению температуры в процессе затвердевания ленты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернов В.С., Иванов О.Г., Евтеев А.С. Основные факторы формирования свойств аморфных магнитомягких сплавов// Материаловедение. -2001. - №4. -С 38 - 43.
2. Сребрянский Г.А., Стародубцев Ю.Н. Основные принципы совершенствования технологии производства аморфной ленты// Сталь. - 1991. -№9. -С.73 - 78.
3. Сребрянский Г.А., Стовпченко А.П., Чудная В.Л. Анализ условий формирования металлической ленты при закалке расплава на вращающемся барабане// Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. -том7. -С. 54-68. Дніпропетровськ: Системні технології., 2005. -151с.
4. Маркелов Н.Д., Сребрянский Г.А. Зависимость структурных факторов аморфных лент от условий закалки расплава// Расплавы. -1990. -№1. - С.91 - 93.
5. Cremer P., Bigot J. An infrared thermography study of the temperature variation of an amorphous ribbon during production by planar flow casting// Mat. Sci. Eng. -1988. -№98. -P.95 - 97.
6. Ткач В.И., Белошов О.Н., Селяков Б.И., Набережных В.П. Исследование режима охлаждения расплава $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ // Расплавы. -1990. -№1. - С.80 - 82.
7. Stephani G., Miihlbach H., Fiedler H., Richter G. Infrared measurements of the melt puddle in planar flow casting// Mater. Sci. Eng. -1988. -V. 98. -P.29 - 32.
8. Борисов В.Т., Сребрянский Г.А. О формировании аморфной металлической ленты при закалке расплава Изв.АН СССР. Металлы. - 1984. -№4. -С.82 - 85.
9. Борисов В.Т. и др. Теплофизическая модель формирования аморфного волокна на кромке диска// Сталь. -2003. -№8. -С.77 - 80.
10. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.:Металлургия, 1976. -360с.
11. Быстрозакалённые металлы. Сб. научных трудов под редакцией Б.Кантора, -М. : Металлургия, 1983. - 326с.
12. Металлические стёкла, Под. ред. Гилмана Дж.Дж. и Лими Х.Дж., США, 1978; Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1984. - 267с.
13. Pavuna D. Production of metallic glass ribbons by the chill-black melt-spinning technique in stabilized laboratory conditions. // J. Mater. Sci. - 1981. - №16. - P.2419 - 2433.
14. Сверхбыстрая закалка жидких сплавов: Сб. научн. трудов. Под ред. Борисова В.Т. М.: Металлургия. - 1986. -375с.
15. Shingu P.H., Kobayashi K., Suzuki R. and Takeshita K. Cooling process of the single roller block casting.//Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals (Sendai, 1981). - V.1. - P.57 - 60.

16. Takeshita K. and Shindu P.H. An Analysis of the Heat Transformation during Rapid Quenching. // Trans. of Jap. Inst. Metals. – 1983. - V.24. - №5. - P.293 - 300.
17. Warrington D.H., Davies H.A. and Shohoji N. Estimation of cooling rate during rapid solidification processing of Ni-based superalloys using photograph. // Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals (Sendai, 1981). - V.1/. - P.69 - 72.
18. Ohmori K., Arai K., Tsuya N. Ribbon form Sendustalloy made by rapid quenching methods. // Appl. Phys. – 1980. - V.21. - №4. - P.335 - 338.

Получено __.__.2006 г.