

УДК 669.017.15

Г.А.Сребрянский, В.П.Хлынцев

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ

Введение

При формировании аморфных металлических лент на наружной поверхности вращающегося барабана-кристаллизатора требуется создать интенсивный теплоотвод, необходимый для реализации скоростей охлаждения 104 – 106 К/с. Основной материал барабана - преимущественно медь или её сплавы [1-8] из-за оптимального сочетания теплопроводности и механических свойств. При взаимодействии расплава с поверхностью барабана происходит её износ (эрозия), интенсивность которого возрастает с увеличением длительности разлива (массы разливаемого металла). Вследствие этого возрастает шероховатость поверхности, прилипание к ней расплава, снижение качества аморфной ленты или нарушение всего процесса, что справедливо для «малотоннажных» и «крупнотоннажных» промышленных установок [5,6,9]. Таким образом, при оптимальных параметрах разлива, «узким местом» в технологии получения ленты является механическая стойкость поверхности барабана. Для увеличения срока службы барабана необходимо постоянно обновлять его поверхность непосредственно в процессе получения ленты или сокращать время взаимодействия расплава (ленты) с этой поверхностью (зону интенсивного охлаждения), а недостаточное охлаждение на барабане компенсировать теплоотводом в другие элементы конструкции, например в лентосъемник.

Цель настоящей работы - изучение взаимодействия движущейся ленты с поверхностью лентосъемника и влияния его параметров на подстуживание ленты.

Методика эксперимента

В работе проводились оценочные расчеты охлаждения аморфной ленты на лентосъемнике в зависимости от тепловых характеристик материала съемника и его геометрии. Эксперименты по получению аморфной ленты проводили на специальной лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 1.

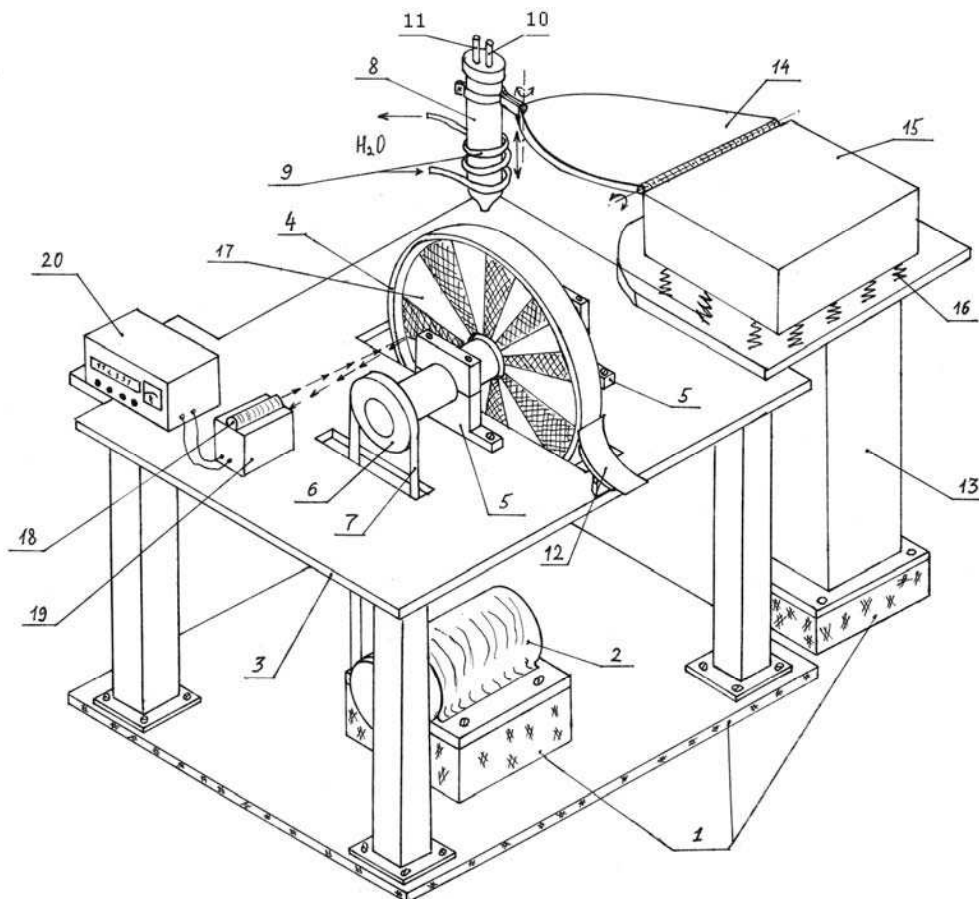


Рисунок 1 - Схема лабораторной установки: 1 – основания; 2 – двигатель; 3 – рабочий стол; 4 – барабан-кристаллизатор; 5 – подшипники; 6, 7 – привод; 8 – тигель-сопло; 9 – индуктор; 10, 11 – штуцеры термопары и инертного газа; 12 – съёмник ленты; 13 – колонна; 14 – механизм перемещения тигля; 15 – станина механизма крепления тигля; 16 – упругие элементы; 17 – стробоскопический рисунок; 18, 19 – источник и приёмник светового луча; 20 – частотомер, показывающий скорость вращения барабана

Разливку на барабан-кристаллизатор проводили из кварцевых тиглей-сопел с круглым отверстием Φ 0,5 – 2 мм, плавление исходной заготовки весом от 10 до 50г (в зависимости от Φ сопла) осуществляли токами высокой частоты при помощи генератора ВЧИ-4/10 мощностью 10 кВт с частотой 440 кГц. В качестве объекта изучения использовали сплав Fe83V17 (ат. %), из которого получали аморфные ленты толщиной от 15 до 70 мкм, шириной от 1 до 4 мм и длиной несколько метров (в зависимости от веса заготовки и диаметра сопла). Этот сплав обладает высокими прочностными характеристиками [8,10] и очень чувствителен к условиям охлаждения, поэтому ленты толщиной более 40 мкм становятся хрупкими за счет структурной релаксации[11].

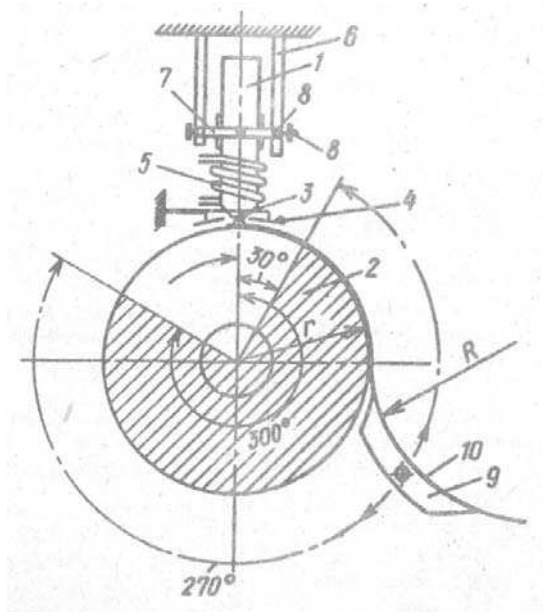


Рисунок 2 - Схема установки лентосъемника: 1–тигель с расплавом; 2 – барабан – кристаллизатор; 3 – сопло в нижней части тигля; 4 – теплозащитный экран; 5 – индукционный нагреватель; 6, 7, 8 – элементы механизма перемещения тигля; 9, 10, R – лентосъемник, его сменная рабочая поверхность и радиус её кривизны; r – радиус барабана

Установку комплектовали неводоохлаждаемыми барабанами диаметром 250 и 180 мм из бескислородной меди, сталей 45 и X18H10T с различной теплопроводностью (400, 50 и 16 Вт/м·К). Лентосъемник определённой кривизны (рис.2.) обеспечивал плавное и равномерное отделение ленты от поверхности барабана без нарушения её геометрии, а его поверхность была антифрикционной или теплопроводящей.

Использовали лентосъемники из фторопласта, стали и меди. Толщину ленты меняли за счёт избыточного давления, а остальные параметры были постоянными. Количество воздушных каверн на контактной поверхности получали на одном уровне, что позволяло считать условия теплопередачи одинаковыми. Условия охлаждения оценивали по степени охрупчивания ленты, считая, что полностью аморфная лента не разрушается при изгибе на оправке диаметром 0,1 мм [1,3,5]. Изгиб осуществляли контактной или свободной поверхностью ленты наружу. Исходные данные и обозначения для расчета охлаждения ленты в контакте с лентосъемником представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Символ	Значение	Единицы	Источники
Теплопроводность воздуха	λ_s	0,026	Вт/м·К	[12]
Перепад температур от * Тлб до Тлс	ΔT	200ч600	°С	[13]

Теплопроводность лентосъёмника **	λ	16ч400	Вт/м·К	[14]
Скорость ленты	V	10ч40	м/с	[5]
Плотность ленты	ρ	5ч8	г/см ³	[15]
Удельная теплоемкость ленты	C_p	540ч800	Дж/кг·К	[13]
Коэффициент теплопередачи от ленты в атмосферу	α_e	10ч100	Ккал/м ² ·ч·К	[16,17]
Высота воздушных каверн на контактной поверхности ленты	h	1ч2	мкм	[18]
Длина лентосъёмника	L	40ч250	мм	
Теплопроводность ленты	λ_l	50ч200	Вт/м·К	[14]

Примечание: «*» -Тлб и Тлс –температура ленты при сходе с барабана и с лентосъёмника; «**» - от нержавеющей стали до меди.

Расчеты

Количество теплоты, отдаваемое лентой в лентосъёмник (её теплосо-держание), определяется выражением

$$\Delta Q = c_p m \Delta T, \quad (1)$$

где m – масса ленты, определяемая из выражения

$$m = \rho t S, \quad (2)$$

где t и S – толщина ленты и площадь ее контакта с лентосъёмником.

Подставляя в (1) и (2) данные таблицы 1, получаем диапазон ΔQ для $t = 40$ мкм и $\Delta T = 600$ 0С, составляющий $\sim (64-154) \cdot 10^3$ Дж. Время нахождения ленты на лентосъёмнике $\Delta \tau = L/V$ может составлять $\sim (1-25) \cdot 10^{-3}$ с. Теплосо-держание ΔQ ленты при изменении её температуры на 100 К составит $\sim (11-26) \cdot 10^3$ Дж, а $\Delta \tau$

при оптимальной скорости ленты (30 м/с) – $(1,3-8,3) \cdot 10^{-3}$ с. Тогда мощность теплопередачи в лентосъёмник при охлаждении 1м² ленты на 100 К

$$P_1 = \Delta Q / \Delta \tau = (11-26) \cdot 10^3 / (1,3-8,3) \cdot 10^{-3} = (1,33-20) 10^6 \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

а скорость охлаждения может приобретать значения $V_{\text{охл}} = 100 / \Delta \tau = (1,2-7,7) \cdot 10^4$ К/с, что соизмеримо с условиями охлаждения на стальных барабанах-кристаллизаторах [1].

Верхняя (свободная) поверхность ленты охлаждается воздухом, который движется со скоростью ~ 30 м/с (относительно ленты). При таких скоростях пограничный слой воздуха, прилегающий непосредственно к ленте, преимущественно турбулентный [1,19], и поэтому для оценки теплопередачи справедливо применить верхний диапазон значений α_v . Тогда тепловая мощность при охлаждении ленты воздухом составит

$$P_2 = \alpha_v \Delta T \approx 116 \cdot 100 = 11,6 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2. \quad (4)$$

На контактной поверхности ленты имеют место воздушные каверны[1, 3,18], высота которых 1-4 мкм[18], а их общее количество – до 40% от общей площади контактной стороны ленты. Тепловое сопротивление этих каверн на 1м² поверхности ленты описывается выражением

$$R=h/\lambda_b S=(3,85-7,69)\cdot 10^{-5} \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}. \quad (5)$$

Тепловая мощность передачи тепла через воздушные каверны при изменении температуры ленты на 100 К составит

$$P_3=\Delta T/R=100/(3,85-7,69)\cdot 10^{-5}=(1,3-2,6)\cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2. \quad (6)$$

Таким образом, передача тепла в лентосъемник от контактной поверхности ленты и через воздушные каверны - величины одного порядка. Теплоотдача свободной поверхности ленты несколько ниже, но также достаточно высокая.

При движении по поверхности лентосъемника лента подвергается воздействию сил трения, за счет которых происходит её разогрев. Для его оценки воспользуемся выражением

$$Q_{тр}=A_{тр}/\Delta\tau=F_{тр}L/\Delta\tau=F_{тр}V=(kmV^2/R)\cdot V, \quad (7)$$

где $A_{тр}$ - работа сил трения $F_{тр}$, R – радиус кривизны лентосъемника (принимаем 1 м). Принимая коэффициент трения между лентой и лентосъемником $k=0,02$ (сталь по стали), с учетом данных таблицы 1, для 30 м/с получаем $Q_{тр}=108-173\text{Вт}$. Эта величина значительно меньше теплоотдачи в лентосъемник и воздух, что даёт основание пренебречь влиянием сил трения на охлаждение ленты на лентосъемнике. Поэтому для случая квазистационарного нагрева может быть использован упрощенный подход, состоящий в следующем.

Даже грубая оценка теплового сопротивления воздушного промежутка и тела лентосъемника показывает, что лимитирующим фактором теплопередачи является передача тепла через воздушный слой (объем воздушных каверн на контактной поверхности ленты). Например, при толщине этого слоя 4 мкм $R=h/\lambda_b S=1,53\cdot 10^{-5} \text{ Вт}/\text{К}$, а для медного лентосъемника толщиной 1 мм $R=2,3\cdot 10^{-6} \text{ Вт}/\text{К}$. Уравнение теплового баланса для ленты может быть записано в виде

$$c_p m dT + \alpha_b S T d\tau + \frac{\Delta T}{R} d\tau = 0, \quad (8)$$

где первое слагаемое соответствует изменению количества теплоты в ленте за время $d\tau$, второе теплоотдаче за счет конвекции с внешней поверхности, третье теплопередаче через воздушный слой. R - тепловое сопротивление воздушного слоя, $\Delta T= T-T_l$, где T_l – температура лентосъемника. Выделением тепла за счет трения пренебрегаем. После преобразований (8) может быть записано в виде

$$\frac{dT}{d\tau} = -bT + A, \quad (9)$$

где

$$b = \frac{1}{c_p \rho t} \left(\alpha + \frac{\lambda_g}{h} \right) \quad (10)$$

$$A = \frac{T_l \lambda_g}{c_p \rho h t} \quad (11)$$

с начальными условиями при $\tau=0$: $T=T_6$ и $T_l=0$, где T_6 – температура барабана.

Его решение

$$T = \frac{T_6 \lambda_g}{h \left(\alpha + \frac{\lambda_g}{h} \right)} + \left(T_6 - \frac{T_l \lambda_g}{h \left(\alpha + \frac{\lambda_g}{h} \right)} \right) \exp(-b\tau), \quad (12)$$

где T_6 – начальная температура ленты.

Зависимость (12) для различных значений толщины воздушного слоя приведена на рис.3. Как следует из приведенных графиков, эффективность охлаждения существенно зависит от шероховатости поверхностей лентосъемника и ленты, что в сумме определяет результирующую толщину и площадь воздушного слоя между лентой и лентосъемником.

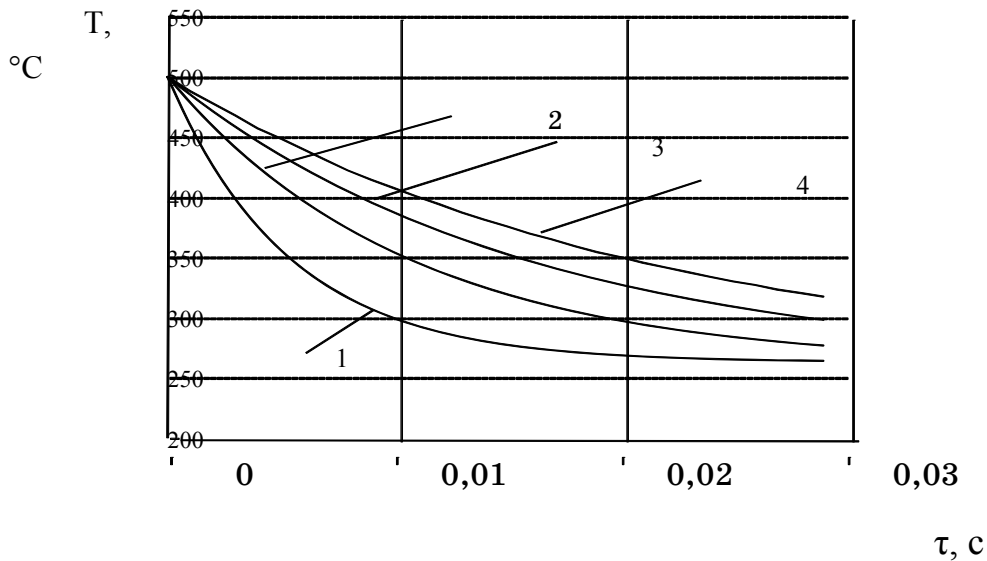


Рисунок 3 - Изменение температуры ленты на лентосъемнике в зависимости от толщины воздушного слоя h : 1- 1мкм; 2- 2мкм; 3- 3мкм; 4- 4мкм.

При толщине $h=1$ мкм (кривая 1 рис.3) лента быстро охлаждается в первые 0,005 с, а затем скорость охлаждения снижается. Аналогичны закономерности и для других толщин. Таким образом, при скорости ленты 30 м/с основное охлаждение происходит на длине $L=V\tau = 30 \cdot 0,005=0,15$ м. Поэтому нет необходимости делать лентосъемник большей длины.

Приведенные на рис.3 кривые соответствуют средней температуре лентосъемника $\sim 300^\circ\text{C}$, а начальной температуре ленты $\sim 500^\circ\text{C}$. При достижении температуры лентосъемника $\sim 400^\circ\text{C}$ эффективность охлаждения сни-

жается и на длине 0,05-0,1м не обеспечивается подстуживания в 100 и более градусов. Из этого вытекает максимальный размер (длина) ленты, которая может быть подстужена на лентосъемнике. Из уравнения теплового баланса для лентосъемника

$$c_p m T_l = \frac{T - T_l}{R} \tau \quad (13)$$

находим

$$\tau = \frac{c_p \rho t T_l h}{\lambda_s (T - T_l)}. \quad (14)$$

Для толщины лентосъемника 1 мм и h= 4 мм время, при котором обеспечивается подстуживание на 100 град., составляет 2,38 и 3,25с (для медного и стального лентосъемника), что соответствует максимальной длине ленты 71 и 98м при скорости 30 м/с. Обеспечение эффективного охлаждения ленты большей длины возможно только при принудительном теплоотводе. Для фторопластового лентосъемника подобные оценки невозможны из-за того, что не выполняется условие малости теплового сопротивления тела лентосъемника по сравнению с воздушным слоем. Кроме того, для промышленного производства фторопластовый лентосъемник неприемлем из-за загрязнения им поверхности барабана.

Экспериментальные результаты

Эксперименты по получению аморфных лент на барабанах с разной теплопроводностью и лентосъемниками из разных материалов показали следующее. Охрупчивание начиналось с контактной стороны ленты, причём разница в толщине охрупчивания контактной и свободной сторон составляла ~ 8 ч 10 мкм, что выходило за пределы ошибки измерения. Ленты сплава Fe-B, полученные на медном барабане, начинали охрупчиваться с толщины $30 \pm 1,5$ мкм (контактная поверхность) и $40 \pm 1,5$ мкм (свободная поверхность) независимо от того, при помощи какого лентосъемника они отделялись от барабана. При толщине $48 \pm 1,5$ мкм не имело значения, какой стороной наружу изгибали ленту – разрушение происходило одинаково хрупко.

Результаты исследований представлены на рис. 4. Ленты, полученные на барабане из X18H10T отделённые стальным или фторопластовым лентосъемником, охрупчивались при $20 \pm 1,5$ мкм, а с $37 \pm 1,5$ мкм разрушение было полностью хрупкое (рис. 4 а) независимо от направления излома.

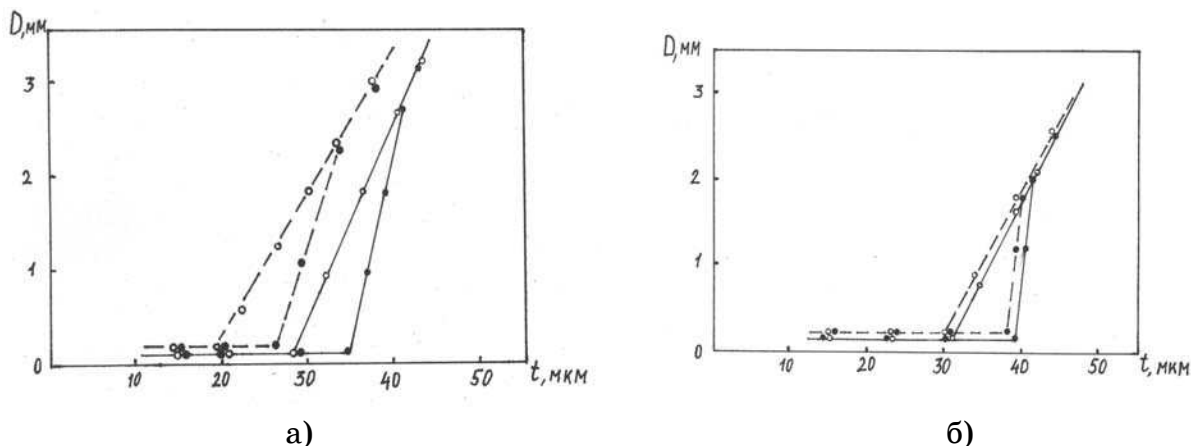


Рисунок 4 - Зависимость диаметра излома (D) аморфной ленты сплава Fe83B17 от её толщины (t): а) стальной или фторопластовый лентосъёмник; б) медный лентосъёмник длиной 40 мм (“—” для барабана из меди; “- - -” барабана из стали X18H10T; “•” – свободная, “○” – контактная сторона ленты наружу).

Установка медного лентосъёмника заданной кривизны длиной 40 мм к барабану из X18H10T снижала хрупкость лент (рис. 4 б). На контактной стороне она начиналась при $30 \pm 1,5$ мкм, а на свободной – при $40 \pm 1,5$ мкм. При толщине ленты свыше $42 \pm 1,5$ мкм направление изгиба также не имело значения. Сочетание медного лентосъёмника с медным барабаном не оказало существенного влияния на параметры (толщину) охрупчивания ленты, оставляя их практически неизменными (рис. 4 а). Таким образом, расчетные и экспериментальные результаты по охлаждению ленты на лентосъёмнике согласуются между собой и тем самым дают основание считать конструктивные элементы установок параметрами, влияющими на характеристики получаемых лент.

Выводы

1. Теплоотдача на лентосъёмнике соизмерима с теплоотдачей при охлаждении расплава на стальном барабане. При этом охлаждение наружной и контактной сторон ленты отличается между собой незначительно, а разогревом ленты за счет трения можно пренебречь.

2. Лимитирующим фактором охлаждения на лентосъёмнике является шероховатость контактной поверхности ленты и лентосъёмника.

3. Металлический лентосъёмник можно рассматривать как дополнительную зону охлаждения ленты, что хорошо согласуется с расчетами и экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. – том 7. – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2005. – 151 с. – С. 54 – 68.

2. Чернов В. С., Иванов О. Г., Евтеев А. С. Влияние условий получения на свойства аморфных магнитомягких сплавов. Часть I. Исходное состояние// Материаловедение. – 2004. – № 3. – С. 34 – 40.
3. Овчаров В. П., Золотарёв С. Н., Дорофеева Е. А. Формообразование аморфной металлической ленты при закалке расплава// В кн. 14 Metalltaugung in der DDR. Amorphe metallische Wertstoffe: Dresden (6 bis 8 April 1981). – 1981. – S. 96 – 104.
4. Стародубцев Ю. Н., Белозёров В. Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2002. – 380 с.
5. Ravuna 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.
6. Liebermann H. H. Manufacture of amorphous alloy ribbons// IEEE Trans. On Magn. – 1979. – V. 5. – № 6. – P. 1393 – 1397.
7. Металлические стёкла/ Под ред. Гилмана Дж. Дж. и Лими Х. Дж., США, 1978; Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1984. – 261 с.
8. Аморфные металлы/ Под ред. проф. Ц. Масумото, пер. с японского. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
9. Чернов В. С., Иванов О. Г., Евгеев А. С. Основные условия стабильности технологии производства медных лент из аморфных сплавов// Сталь. – 2001. – № 4. – С. 67 – 69.
10. Аморфные металлические сплавы/ Под ред. Люборского Ф. Е.: Пер. с англ. Под ред. Прокошина А. Ф. – М.: Металлургия, 1987. – 584 с.
11. Шмырёва Т. П., Береза Е. Ю. Быстроохлаждённые эвтектические сплавы. Киев: Техника, 1990. – 144 с.
12. Болгарский А. В., Мукачов Г. А., Цукан В. К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высш. Школа, 1975. – 495 с.
13. Сверхбыстрая закалка жидких сплавов: Сб. научн. трудов. Под ред. Борисова В.Т. – М.: Металлургия, 1986. – 375 с.
14. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник. М.: Энергоиздат, 1967. – 197 с.
15. Сребрянский Г. А., Стародубцев Ю. Н. Основные принципы совершенствования технологии производства аморфной ленты// Сталь. – 1991. – № 9. – С. 73 – 78.
16. Исследование теплообмена в потоках жидкости и газа. Сб. под ред. В. К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1965. – 226 с.
17. Сушкин И. Н. Основы теплотехники. М.: Металлургиздат, 1958. – 389 с.
18. Золотарёв С. Н., Шумаков С. Н. Рельеф контактной поверхности быстрозакалённых лент// ФММ. – 1987. – т.64. – вып. 2. – С. 349 – 357.
19. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. – 724 с.