

ПРОИЗВОДСТВО АМОРФНОЙ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ НА ОДНОВАЛКОВОЙ МНЛЗ

**И.И. Данилова, В.В. Маркин, О.В. Смолякова,
В.Е. Рошин, С.И. Ильин, Ю.Н. Гойхенберг**

ОАО «Ашинский металлургический завод» уже на протяжении 24 лет (с 1984 года) производит быстрозакаленные аморфные и нанокристаллические сплавы на железной, никелевой и кобальтовой основе. В настоящее время завод является крупнейшим в России производителем аморфных и нанокристаллических металлов в виде тонкой (микронных размеров) ленты. Выпуск продукции из аморфных и нанокристаллических сплавов достигает нескольких сотен тонн в год.

Лента изготавливается методом намораживания (спиннигования) расплава на полированную поверхность охлаждаемого водой вала, движущуюся с линейной скоростью 20...30 м/с. Скорость охлаждения расплава на поверхности вала составляет примерно 10^6 °С в секунду. Такой скорости охлаждения недостаточно для аморфизации чистых металлов, критическая скорость охлаждения которых составляет 10^{10} ... 10^{12} °С [1], но достаточно для отвердевания без кристаллизации расплавов некоторых сплавов.

Способность к отвердеванию без кристаллизации повышается при образовании растворов замещения, для получения которых в зависимости от состава основы применяют легирующие элементы никель, хром, железо, молибден, медь. Весьма существенно повышают склонность металлов к переохлаждению примеси внедрения. Поэтому для легирования аморфизирующихся при технически оправданных значениях скорости охлаждения сплавов в качестве элементов-аморфизаторов, образующих растворы внедрения, практически всегда в разных комбинациях используют бор, кремний, углерод.

Технологический процесс получения аморфной ленты осуществляется в два этапа. На первом этапе в вакуумных индукционных печах выплавляют заготовку - исходный аморфизирующийся сплав необходимого состава, а на втором производится плавление порции заготовки и получение аморфной ленты на машинах разлива. Для выплавки заготовки аморфизирующихся сплавов в качестве шихтовых материалов используют железо марки ЖЧК (железо чистое конвертерное), никель электролитический марок Н-1, Н-2 или Н-3, кобальт металлический марок КО или К1, медь марки М1, кристаллический кремний. Бор в исходный аморфизирующийся сплав вводят в виде предварительно сплавленных в вакуумной индукционной печи лигатур железо-бор, никель-бор, кобальт-бор с содержанием бора от 7 до 18%.

Подготовленные шихтовые материалы загружают в тигель вакуумной индукционной печи ИСВ-0,6НИИЗ. После расплавления шихты и растворения всех добавок производится перегрев расплава на 80...100°С выше температуры ликвидус, выдержка при этой температуре, отбор проб для анализа химического состава, затем охлаждение расплава до температуры слива и слив в массивную чугунную изложницу специальной конструкции. Изложница выполнена таким образом, что кристаллизация расплава происходит при высокой скорости охлаждения, и в слитке возникают специально предусмотренные конструкцией изложницы большие термические напряжения, которые вызывают разрушение слитка. Это облегчает подготовку порций исходного сплава для повторного плавления в тиглях разливочных машин.

В цехе аморфных сплавов установлены две разливочные машины. На машине конструкции ВНИИМЕТМАШ индукционная плавильная печь для подготовки расплава к разливке установлена над разливочным валком, на машине фирмы SUNDWIG (Германия) - под валком. Соответственно подача расплава к закалочному валку в первом случае осуществляется сверху, во втором - снизу (рис. 1). Подача расплава снизу вверх осуществляется по металлопроводу, в качестве которого используется кварцевая трубка. Расплав из плавильного тигля давлением инертного газа по металлопроводу выдавливается вверх к разливочному узлу (рис. 2). Чтобы компенсировать охлаждение расплава в металлопроводе, в верхней части металлопровода осуществляется индукционный подогрев расплава (рис. 3).

Порцию исходного сплава в кристаллическом состоянии загружают в плавильный тигель разливочной машины и вторично расплавляют, нагревают до необходимой для разливки температуры и производят разливку. Разливка осуществляется через калиброванную щель разливочного сопла, изготовливаемого из аморфного кремнезема.

Длина щели разливочного сопла определяется шириной ленты, которую надо получить, и обычно находится в пределах от 3,0 до 80,0 мм. Ширина щели составляет 0,45...0,65 мм и является одним из важнейших регулируемых параметров разлива, связанным со многими другими (линейной скоростью движения поверхности разливочного вала, зазором между соплом и поверхностью вала, составом сплава, температурой расплава, давлением газа и другими). Можно, например, отметить,

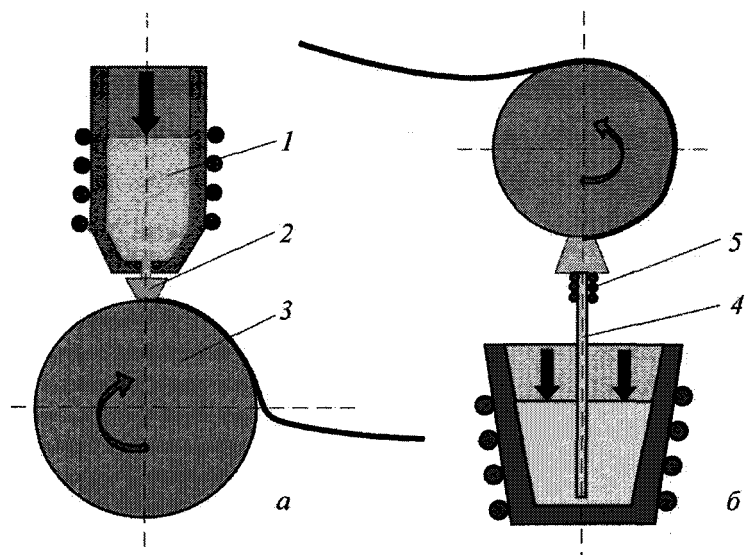


Рис. 1. Схема получения аморфной ленты на одновалковой установке с подачей расплава сверху (а) и снизу (б): 1 – индукционная плавильная печь, 2 – разливочное сопло, 3 – охлаждаемый валок, 4 – металлпровод, 5 – индукционный подогрев металла в металлпроводе

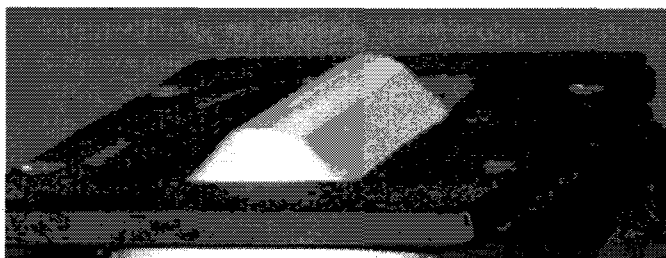


Рис. 2. Разливочный узел для разлива снизу

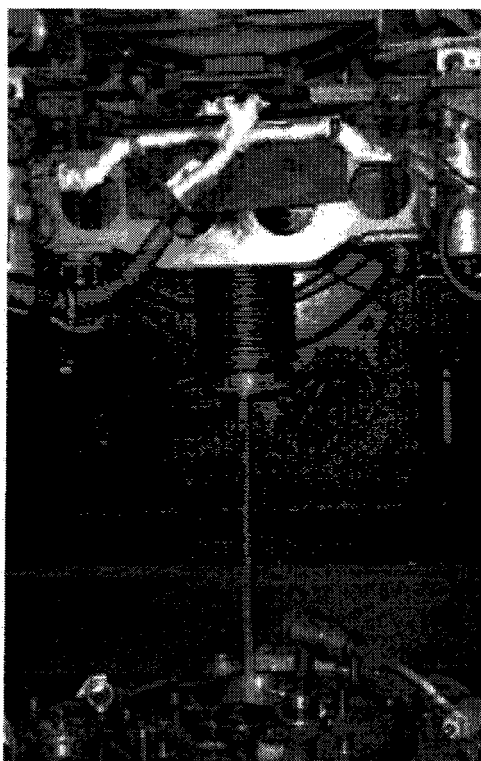


Рис. 3. Металлопровод и индуктор для подогрева металла в металлпроводе при разливе снизу

что зазор между соплом и поверхностью вала изменяется в пределах 0,15...0,30 мм с шагом 0,05 мм в зависимости от других параметров разлива.

После расплавления сплава в плавильной емкости разливочной машины и нагрева до необходимой температуры в плавильную емкость подают инертный газ, который выдавливает расплав из плавильного объема к поверхности закалочного вала. Смачивая поверхность вала, расплав движется вместе с ней, формируя на поверхности аморфную ленту. От поверхности вала лента отделяется потоком воздуха, подаваемого на съемник ленты. Съемник устанавливается с зазором от 100 до 300 мкм от поверхности вала.

Управляя расходом расплава через щель сопла путем изменения температуры расплава, ширины щели сопла и величины давления, а также скоростью вращения вала можно управлять процессами формирования ленты. Толщина получаемой ленты зависит от совокупности технологических факторов - температуры расплава, ширины щели сопла, скорости вращения вала, давления газа, физико-химических свойств расплава (вязкость, поверхностное натяжение), материала диска, а также величины зазора между соплом и поверхностью вала и составляет 25 ± 5 мкм.

Качество контактной поверхности ленты зависит от материала вала и качества подготовки его поверхности, так как одним из источников дефектов контактной поверхности ленты является ее недостаточно хороший тепловой контакт с поверхностью вала. Нарушения теплового контакта вызываются кавернами, возникающими на контактной поверхности, по-видимому, вследствие кавитации (рис. 4, а). Поэтому особое внимание уделяется качеству подготовки поверхности вала, а также предъявляются жесткие требования к материалу вала. Наименьшее количество каверн наблюдается на ленте, формируемой на поверхности вала из бронзы БрХЦр. Свободная поверхность ленты является более ровной, но на ней также проявляется рельеф, (рис.4, б).

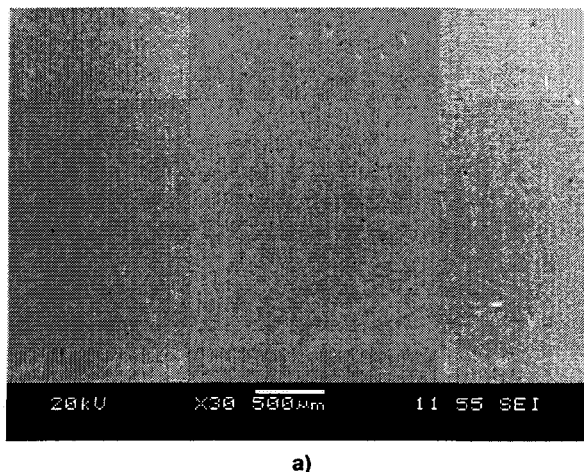
В цехе аморфных сплавов производится лента аморфная из прецизионных магнитомягких сплавов марок УСР, 2НСР, 9КСР, 30КСР, 71КНСР, 84КСР, 84КХСР, 86КГСР, 82КЗХСР, 82КГМСР и нанокристаллического сплава марки 5БДСР по ТУ 14-123-149 [2]. Отличие структуры аморфного и нанокристаллического состояний проявляется в характере излома ленты и в состоянии поверхности. Аморфные сплавы дают ровный стекловидный излом, в то время как в изломе ленты нанокристаллического сплава со стороны свободной поверхности, охлаждавшейся с меньшей скоростью, выявляется рельеф (рис. 5). Кроме того, на поверхности нанокристаллической ленты видны многочисленные микропоры (рис. 6).

Появление микрорельефа в изломе и микропор на поверхности связано, по-видимому, с образованием нанокристаллов, поскольку в результате начинающейся кристаллизации происходит более сильное изменение объема по сравнению с переохлаждением расплава.

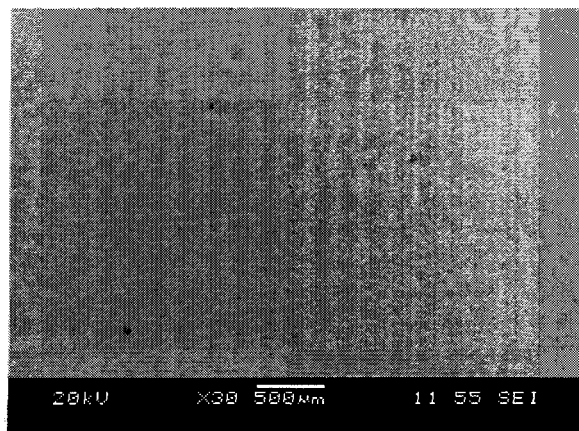
Лента изготавливается с обрезной и необрезной кромкой. Ленту заданной ширины с обрезной кромкой получают путем продольной резки широкой ленты с обрезной кромкой составляет обычно 0,06 мм, для необрезной ленты - 0,5 мм. Ленту из магнитомягких сплавов используют для изготовления витых магнитопроводов и сердечников индуктивных компонентов взамен ферритов, пермаллоев и других магнитомягких материалов, а также для резистивных элементов.

Завод изготавливает из ленты аморфных и нанокристаллических сплавов магнитопроводы различных форм и размеров: кольцевые, прямоугольные, овальные, комбинированные и стержневые, в защитных корпусах и без них (рис. 7).

Из ленты нанокристаллического сплава 5БДСР изготавливают магнитопроводы с разрезом. Сплав марки 5БДСР обладает не только гистерезисными магнитными свойствами на уровне лучших кристаллических (сплавы типа пермаллоев) и аморф-

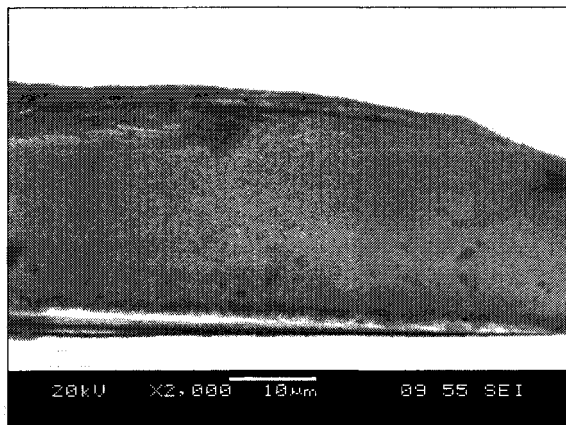


а)

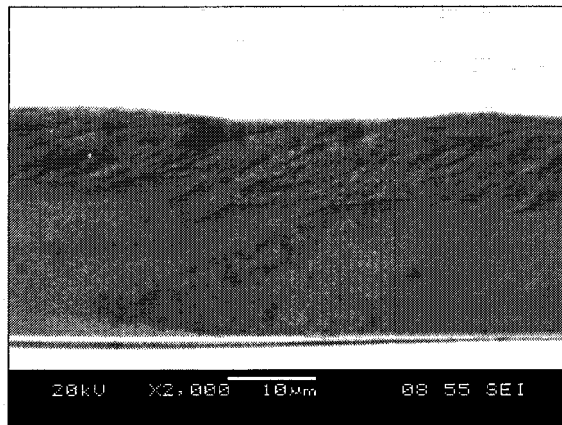


б)

Рис. 4. Контактная (а) и свободная (б) поверхность аморфного сплава 2НСР

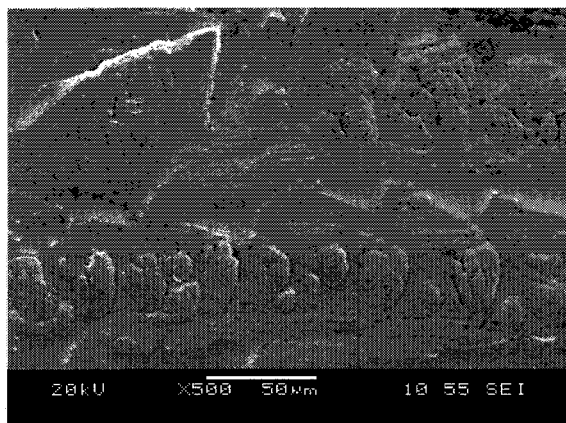


а)

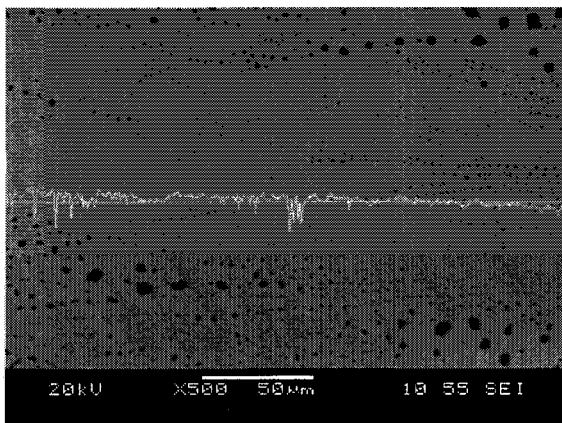


б)

Рис. 5. Излом аморфного (а) и нанокристаллического (б) металла



а)



б)

Рис. 6. Рельеф контактной (а) и свободной (б) поверхности ленты нанокристаллического сплава 5БДСР

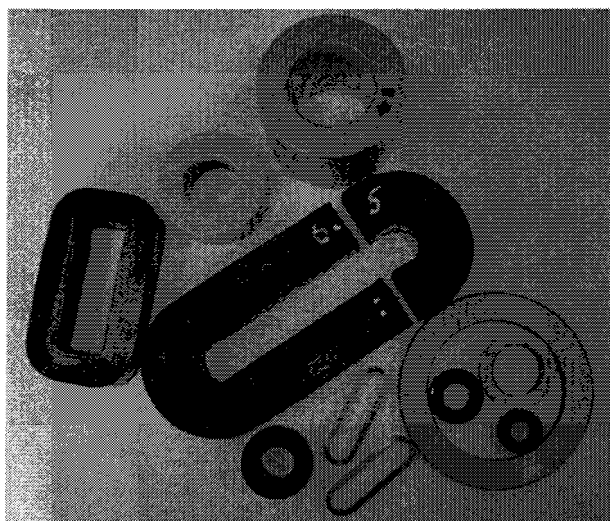


Рис. 7. Магнитопроводы из аморфной и нанокристаллической ленты

ных материалов, но одновременно обладают высокой индукцией насыщения, сравнимой с индукцией высококремнистых электротехнических сталей [3].

Магнитопроводы в защитном корпусе с высокой магнитной проницаемостью марки 5В, 82В и

84ХВ изготавливаются по ТУ 14-123-150 [4]. Они применяются в трансформаторах тока высокого класса точности 0,2S и более точных. Магнитопроводы марки 5В также применяются в силовых трансформаторах на средних и высоких частотах

из-за малых потерь на перемагничивание. Магнитопровод марки 2В применяется для работы в импульсном режиме намагничивания с короткими фронтами и силовых трансформаторах.

Магнитные характеристики магнитопроводов по ТУ 14-123-150 исполнения в корпусе приведены в табл. 1.

Магнитопроводы в защитном корпусе с заданной формой петли гистерезиса изготавливаются по ТУ 14-123-152 [5], магнитопроводы без защитного корпуса - по ТУ 14-123-151 [6].

Магнитопроводы с линейной формой петли гистерезиса используются для изготовления измерительных трансформаторов тока высокого класса точности, в том числе и для счетчиков электрической энергии, катушек индуктивности, работающих в широком диапазоне частот с подмагничиванием постоянным током небольшой величины, дифференциальных датчиков тока (в том числе устройств защитного отключения), дросселей и фильтров.

Магнитные характеристики магнитопроводов по ТУ 14-123-152 приведены в табл. 2.

Магнитопроводы с прямоугольной формой петли гистерезиса имеют высокий коэффициент прямоугольности и могут использоваться для изготовления магнитных усилителей, магнитных ключей и дросселей насыщения.

Магнитные характеристики магнитопроводов

по ТУ 14-123-152 исполнения в корпусе приведены в табл. 3.

Кроме того, производится припойная аморфная лента марок 82Н7ХСР, 75Н13ХСР, 71Н18ХСР, 92НСР и 80НХ15Р [7]. Для успешного проведения процесса пайки необходимо чтобы расплавленный припой максимально смачивал поверхности. Чтобы улучшить смачивание, при пайке обычно применяют флюс, который уменьшает прочность и коррозионную стойкость конструкции. Кроме того, при пайке жаростойких и коррозионностойких конструкций зачастую применение флюсов недопустимо. Для улучшения смачивания поверхностей материалом припоя без использования флюса перспективно применить сплав на основе металлов, обладающих высоким химическим сродством к спаиваемым поверхностям, но имеющих более низкую температуру плавления. Для использования систем никель-бор-кремний в качестве ленточных припоев наиболее перспективными материалами в настоящее время являются ленточные аморфные сплавы-припои. Эти материалы, содержащие в качестве элементов-аморфизаторов бор и кремний, и дополнительно легированные хромом, кобальтом и железом в зависимости от материалов спаиваемых поверхностей широко применяются для соединения жаропрочных и высоколегированных сплавов на основе никеля и железа.

Таблица 1

Магнитные характеристики магнитопроводов по ТУ 14-123-150

Марка магнитопровода (марка сплава)	Магнитная индукция B_m (Тл) при напряженности магнитного поля, не менее				Относительная магнитная проницаемость, не менее
	5 А/м	20 А/м	300 А/м	800 А/м	
82В (82К3ХСР)	0,38	–	–	0,4	80 000
5В (5БДСР)	–	1,15	–	1,25	50 000
84ХВ (84КХСР)	–	0,55	–	0,6	40 000
2В (2НСР)	–	–	1,4	1,5	–

* Буква «В» в марке магнитопровода означает, что сердечники магнитопроводов термообрабатываются без наложения магнитного поля.

Таблица 2

Магнитные характеристики магнитопроводов с линейной формой петли гистерезиса по ТУ 14-123-152.

Марка магнитопровода (марка сплава)	Магнитная индукция B_m (Тл) при напряженности магнитного поля, не менее				Коэффициент прямоугольности $K_p = B_r/B_m$, не более	Относительная магнитная проницаемость, не менее
	15 А/м	25 А/м	300 А/м	800 А/м		
84ХТ (84КХСР)	0,55	–	–	0,6	0,1	30 000
82МТ (82КГМСР)	–	–	–	0,7	0,1	5000
84Т (84КСР)	–	–	–	0,7	0,1	2000
86Т (86КГСР)	–	–	–	0,8	0,1	1500
30Т (30КСР)	–	–	–	1,3	0,1	1500
5Т (5БДСР)	–	1,15	–	1,25	0,15	20 000
9Т (9КСР)	–	–	–	1,45	0,15	2000
2Т (2НСР)	–	–	1,4	1,45	0,15	5000

* Буква «Т» в марке магнитопровода означает, что сердечники магнитопроводов термообрабатываются с наложением поперечного магнитного поля.

Магнитные характеристики магнитопроводов с прямоугольной формой петли гистерезиса по ТУ 14-123-152 Таблица 3

Марка магнитопровода (марка сплава)	Магнитная индукция B_m (Тл) при напряженности магнитного поля, не менее			Коэффициент прямоугольности $K_p = B_r/B_m$, не менее
	10 А/м	20 А/м	100 А/м	
84ХП (84КХСР)	0,55	–	–	0,9
5П (5БДСР)	–	1,2	–	0,9
82МП (82КГМСР)	–	–	0,6	0,9
84П (84КСР)	–	–	0,68	0,9
86П (86КГСР)	–	–	0,9	0,9
2П (2НСР)	–	–	1,4	0,85
9П (9КСР)	–	–	1,45	0,9
30П (30КСР)	–	–	1,45	0,9

* Буква «П» в марке магнитопровода означает, что сердечники магнитопроводов термообрабатываются с наложением продольного магнитного поля.

Технологические параметры припойной аморфной ленты Таблица 4

Марка	Температура солидус, °С	Температура ликвидус, °С	Рекомендуемая температура пайки, °С	Плотность ленты, г/см ³
75Н13ХСР	965	1103	1135	7,51
82Н7ХСР	969	1024	1055	7,46
71Н18ХСР	1052	1144	1170	7,49
92НСР	984	1054	1085	7,94
80НХ15Р	1048	1090	1120	7,8

Технологические параметры припойной аморфной ленты представлены в табл. 4.

Лента изготавливается по техническим условиям ТУ 14-123-174 [8].

Таким образом, на Ашинском металлургическом заводе в больших промышленных масштабах освоено производство ленты из аморфных и нанокристаллических магнитомягких и припойных сплавов. Налажено производство магнитопроводов различного типа и назначения. Ведется постоянная работа по улучшению технологии производства аморфной и нанокристаллической ленты и магнитопроводов, расширяются объемы производства. В связи с быстро возрастающим спросом на изделия из аморфной и нанокристаллической ленты решается вопрос о реконструкции цеха с целью повышения производительности оборудования. Одно из возможных решений заключается в сокращении производственного цикла и разлива сплавов без промежуточной кристаллизации в изложнице.

Лента и изделия из нее защищены патентами, принадлежащими ОАО «АМЗ»: RU 2269173 «Магнитомягкий аморфный сплав», RU 2269174 «Магнитомягкий композиционный материал на основе железа и способ его изготовления», RU 39000 «Магнитопровод», RU 54693 «Магнитопровод», RU 60786 «Трансформатор», RU 66860 «Трансформатор», RU 66861 «Магнитопровод».

Литература

1. Судзуки, К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. - М.: Металлургия, 1987. - 328 с.

2. ТУ 14-123-149-99 Лента аморфная из прецизионных магнитомягких сплавов УСР, 2НСР, 9КСР, 30КСР, 71КНСР, 84КСР, 84КХСР, 86КГСР, 82КЗХСР, 82КГМСР и нанокристаллического сплава 5БДСР. - <http://www.amet.ru>.

3. Кекало, КБ. Нанокристаллические магнитомягкие материалы: курс лекций / КБ. Кекало. — М.: МКСuС, 2000. - С. 227.

4. ТУ 14-123-150-99 Магнитопроводы ленточные тороидальные марки 82В и 5В из магнитомягких сплавов 82КЗХСР и 5БДСР. — <http://www.amet.ru>.

5. ТУ 14-123-152-99 Магнитопроводы ленточные тороидальные из магнитомягких аморфных и нанокристаллических сплавов с заданной формой петли гистерезиса с защитным корпусом. - <http://www.amet.ru>.

6. ТУ 14-123-151-99 Магнитопроводы ленточные тороидальные из магнитомягких аморфных и нанокристаллических сплавов без защитных корпусов в эмалированном исполнении. — <http://www.amet.ru>.

7. Маркин, В.В. Ленточные аморфные сплавы на никелевой основе для высокотемпературной пайки коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов / В.В. Маркин, О.В. Хамитов, О.В. Смолякова / Кнновации. Технологии. Решения. - 2005, ноябрь. - С. 16-17.

8. ТУ 14-123-174-2004 Лента металлическая припойная из прецизионных сплавов на никелевой основе. - <http://www.amet.ru>.