

Г. А. Сребрянский

Никопольский техникум Национальной металлургической академии Украины,
Никополь

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ЛЕНТ ПРИ ОДНОВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ

В работе исследовано получение быстрозакаленной ленты на поверхности барабана-холодильника. Предложено рассматривать процесс получения ленты как технологическую цепочку отдельных этапов, которая должна быть привязана к конкретному составу сплава, способу выплавки исходной заготовки и конструкции оборудования. Рассмотрены процессы каждого этапа. Показано противоположное влияние различных факторов на размеры лужицы (ванны) расплава в зазоре «сопло-барабан» и толщину ленты. Предложено контролировать длину лужицы как суммарный фактор влияния на толщину ленты. Даны рекомендации по конструкции барабана-холодильника в зависимости от объема разливаемого металла. Показано значение микрогеометрии его поверхности. Поведение ленты за пределами барабана рассмотрено как дополнительную зону охлаждения, которая может быть организована различными способами.

Ключевые слова: быстрозакаленная лента, барабан-холодильник, зазор «сопло-барабан», гидродинамические и теплофизические факторы, лужица расплава.

У роботі досліджено одержання швидкозагартованої стрічки на поверхні барабана-холодильника. Запропоновано розглядати процес одержання стрічки як технологічний ланцюжок окремих етапів, який повинен бути прив'язаний до конкретного складу сплаву, способу виплавки первинної заготовки і конструкції обладнання. Розглянуті процеси кожного етапу. Показано протилежний вплив різних факторів на розміри рідкої ванни розплаву в зазорі « сопло-барабан» і товщину стрічки. Запропоновано контролювати довжину ванни як сумарний фактор впливу на товщину стрічки. Надано рекомендації з конструкції барабана-холодильника залежно від об'єму металу, що розливається. Показано значення мікрогеометрії його поверхні. Поведінку стрічки за межами барабана розглянуто як додаткову зону охолодження, яка може бути організована різними способами.

Ключові слова: швидкозагартована стрічка, барабан-холодильник, зазор «сопло-барабан», гідродинамічні і теплофізичні фактори, рідка ванна розплаву.

The paper investigates receiving a rapidly quenched tape on the surface of the drum-refrigerator. It is proposed to consider the process of obtaining the tape as a technological chain of separate stages. The processes of each stage are analyzed. The entire chain should be consistent to a specific alloy composition, a method of melting the initial procurement and construction equipment. Opposite influence of different factors on the sizes of puddle of fusion in a gap «nozzle-drum» and thickness of tape is shown. It is suggested to control length of puddle as total factor of influence on the thickness of tape. Recommendations on the construction of drum-refrigerator depending on the volume of the poured out metal are given. The value of microgeometry of its surface is shown. The behavior of the tape outside the drum is considered as an additional cooling zone, which can be arranged in various ways.

Keywords: rapidly quenched tape, drum-refrigerator, a gap «nozzle-drum», hydrodynamic and thermalphysic factors, a pool of melt.

За последние 30-50 лет получение аморфных, нано- и микрокристаллических лент непосредственно из расплава переросло от лабораторных опытов к промышленному производству. Его объемы и география постоянно расширяются, что

обусловлено набором уникальных эксплуатационных характеристик этого нового класса материалов. Растет и число композиций лент, закаленных из расплава на поверхности вращающегося барабана-холодильника, что вызвано расширением областей применения. Поэтому знание условий формирования ленты на охлаждающей поверхности не потеряло актуальности, несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [1]. Тем не менее, из них однозначной схемы (модели) формирования ленты не следует. Это обусловлено различием свойств в жидком состоянии сплавов разного состава, одновременным влиянием гидродинамических и теплофизических факторов при формировании ленты, конструктивными особенностями оборудования, объемом расплава и схемой его подачи на охлаждающую поверхность (барабан-холодильник). Каждый из факторов имеет свои параметры и константы, зачастую противоположно влияющие на получение ленты [2]. Нужно также учитывать химический состав в части склонности к аморфизации при закалке расплава (аморфный или микрокристаллический). Поэтому правильно представлять всю цепочку от выплавки исходной заготовки до приемника готовой ленты (складирования или смотки) весьма затруднительно, а иногда просто невозможно. При видимой простоте, экономичности и высокой производительности, получение ленты содержит в себе ряд особенностей, влияющих на практические элементы технологии, а, следовательно, и на эксплуатационные свойства изделий.

Цель данной работы – подробнее рассмотреть схему формирования ленты на барабане-холодильнике с практическими рекомендациями.

Рассмотрение процессов на этапах технологической цепочки

Получение быстрозакаленной ленты из расплава можно представить в виде технологической цепочки, состоящей из отдельных этапов (рис. 1), в рамках которых существенны свои параметры.

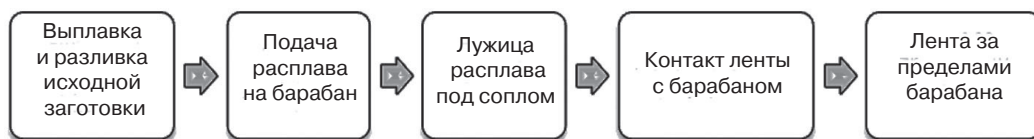


Рис. 1. Технологическая цепочка получения быстрозакаленной ленты

В первую очередь получение ленты следует привязывать к конкретному составу сплава (независимо от дальнейшей схемы разливки). Это вызвано сложностью состава быстрозакаленных сплавов (из трех и более элементов), причем с большим количеством металлоидов (бора, кремния, фосфора и углерода), наличием различных примесей в зависимости от способа выплавки исходной заготовки. Даже незначительное изменение состава сплава в рамках одной системы или наличие разных по составу и количеству примесей меняет такие свойства как вязкость, плотность и поверхностное натяжение [3-7]. Но именно они определяют условия течения расплава, его взаимодействие с материалом тигля и сопла, а также условия смачивания поверхности барабана-холодильника. Если при этом еще учитывать изменение температур ликвидус и солидус, то стабильное получение ленты в нескольких разливах возможно только из одной исходной заготовки. Ее объем нужно учитывать – чем он больше, тем сильнее ликвация [8]. Возникает дилемма: разливка сразу всей заготовки в несколько десятков килограмм или разливка несколькими порциями с возможностью коррекции технологических параметров на небольшом количестве металла. А это уже конкуренция между разным типом оборудования – «ампульной» (малотоннажной) технологии и «крупнотоннажного» производства [9].

В первом случае выплавка исходной заготовки осуществляется на самостоятельном плавильном агрегате по технологии, зависящей от состава сплава. Затем выплавленный состав разливается на отдельные порции для конкретной установки получения ленты. Количество металла, разливаемого в ленту по «ампульной» тех-

нологии, обычно составляет 0,5-2 кг. Главное при этом – постоянство химического состава каждой такой порции.

В «крупнотоннажном» производстве (20-50 и более кг за цикл) выплавка происходит непосредственно в разливочном агрегате, совмещенном с соплом, формирующем геометрию потока расплава, и, в конечном счете – геометрию ленты. Появляется проблема определения химического состава перед подачей расплава на барабан. Это обусловлено тем, что в некоторых промышленных установках «крупнотоннажного» производства плавление сплава происходит в закрытой камере под защитной атмосферой или в вакууме [10]. Существует также выплавка в отдельном агрегате, перелив металла в промежуточный разливочный ковш, из которого через сопло расплав подается на барабан [9]. Тогда необходим достаточный большой объем предварительных экспериментов или экспресс-анализ химического состава непосредственно перед разливкой. Поэтому получение исходной заготовки является отдельным фактором, от которого зависит вся дальнейшая цепочка. При различных технологиях выплавки заготовки для установок с разным объемом разливаемого металла, основное условие – получить состав, удовлетворяющий требуемым свойствам ленты, причем с минимальными затратами. Следует учитывать литейные характеристики расплава (вязкость, плотность, поверхностное натяжение, взаимодействие с материалом тигля и сопла, способность растворять газы и примеси, смачивание поверхности барабана).

Фактически выплавка исходной заготовки (сплава) – большая самостоятельная проблема, далекая от оптимизации и требующая отдельного более глубокого изучения. При этом следует серьезное внимание уделить экономическому аспекту, так как 50-70 % себестоимости готовой ленты составляет стоимость исходной заготовки из-за использования чистых шихтовых материалов (железо ЖЧК, никель марок Н1, Н2, Н0, кобальт К0 и К1, чистых кремния и бора и т. п.). Необходимы такие технологии ее выплавки, которые позволили бы использовать более дешевые шихтовые материалы (отходы металлургического производства, металллом и т. п.).

Следующий этап – подача расплава на барабан, которая зависит от конструктивных особенностей оборудования. При этом «конструктивные особенности оборудования» весьма обобщенное понятие. Оно объединяет: тип плавильного агрегата, конструкцию барабана-холодильника и привод его вращения, материал и конструкцию разливочного сопла, механизм его расположения относительно поверхности барабана, систему организации калиброванного потока расплава через это сопло, устройство для съема ленты с поверхности барабана, механизм обновления его поверхности, приборы для контроля параметров и ряд других. Основные из перечисленных – плавильный агрегат (и его мощность), барабан-холодильник, сопло и лентосъемник. Их конструкция определяется объемом разливки, то есть «ампульной» технологией или «крупнотоннажным» производством. В последнем случае необходимо добавить узел обновления поверхности барабана в процессе разливки.

Схема подвода расплава к барабану (сверху, снизу или сбоку) определяет разливаемый объем. Для разливки больших объемов металла наиболее оптимальна подача расплава на барабан-холодильник сбоку [9] (рис. 2). В этом случае положительную роль начинают играть гравитационные силы как дополнительный элемент удержания ленты на барабане. Кроме того, проще избежать гидроудара и вибрации, возникающих при подаче расплава из разливочного ковша в промежуточный ковш.

Для «ампульной» технологии традиционно наиболее оптимальна подача расплава сверху. Она наиболее отработана, поскольку представляет собой усовершенствованный вариант лабораторных установок, на которых десятилетиями проводились эксперименты по получению аморфной ленты из самых различных сплавов [9]. Для такого типа установок наиболее важным является одинаковость по составу порций металла, которые получают из общей плавки на независимом плавильном агрегате объемом до 20-50 кг [10].

Подвод расплава к барабану – наиболее объемный этап технологической цепочки

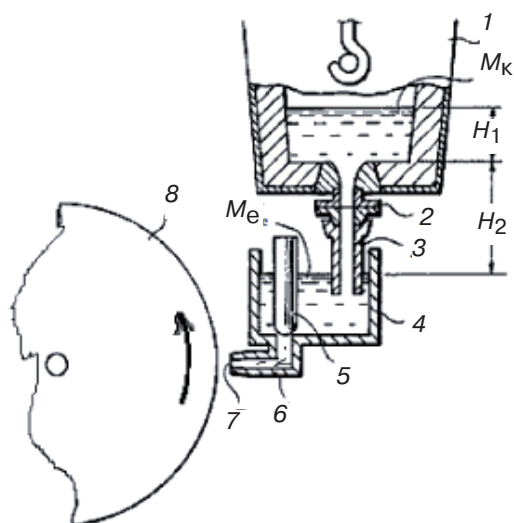


Рис. 2. Схема подачи расплава сбоку через промежуточную емкость: 1 – разливочный ковш; 2 – шиберный затвор; 3 – стакан-дозатор; 4 – промежуточный ковш; 5 – стопор промежуточной емкости; 6 – разливочный насадок промежуточного ковша; 7 – сопло; 8 – барабан-холодильник; H_1 – высота (уровень) расплава в разливочном ковше; H_2 – столб расплава от основного разливочного ковша до уровня в промежуточном ковше; M_k и M_e – уровни металла в разливочном и промежуточных ковшах, соответственно

расплава, затем избыточным давлением [12], а сбоку (рис. 2) – преимущественно только столбом расплава.

При подводе расплава к барабану во всех трех схемах есть переменные и постоянные параметры, определяющие расход расплава через щель сопла. Влияние этих параметров на расход противоречиво [2], но стабильность процесса формирования ленты и ее качество определяются именно постоянством расхода между подводимым к барабану расплавом и отводимой лентой [13]. Управляя скоростью расплава через щель сопла, регулируя скорость вращения барабана, можно управлять формированием ленты за счет изменения размеров лужицы расплава (рис. 4) в зазоре «сопло-барабан» [14]. Этот зазор должен оставаться неизменным в течение всего времени разливки. Кроме него, неизменной на этом этапе является геометрия сопла (длина и ширина щели, высота щелевого канала, конфигурация элементов сопла) и его материал.

Толщина получаемой ленты зависит от совокупности технологических параметров: температуры расплава, ширины щели сопла и величины избыточного давления газа на расплав в тигле (или столба расплава), материала и скорости вращения барабана, физико-химических свойств расплава, величины зазора «сопло-барабан» и некоторых других. В этой ситуации целесообразнее контролировать лужицу расплава (ее размеры) в указанном зазоре [15], поскольку именно она сосредотачивает в себе перечисленные параметры. Толщина ленты, а, следовательно, и скорость ее охлаждения, зависят от длины этой лужицы [15].

Этот этап технологической цепочки производства быстрозакаленной ленты («лужица расплава под соплом») (рис. 4) – наиболее сложный из-за противоречивого влияния технологических параметров. Такую противоречивость можно проиллю-

получения ленты. Он объединяет способ подачи расплава с необходимой температурой на охлаждающую поверхность, конструкцию и материал тигля, материал и геометрию разливочного сопла и его расположение относительно поверхности барабана. При этом все перечисленные элементы необходимо привязывать к одному составу сплава с конкретными физико-химическими свойствами (вязкость, поверхностное натяжение, активность по отношению к материалу тигля и сопла).

Калиброванный поток расплава на барабан принципиально организуется двумя способами: принудительно, под действием избыточного давления инертного газа [11] или под действием столба самого расплава [9]. Первый способ обязателен только для схемы подачи расплава снизу (рис. 3, а) при «крупнотоннажном» производстве или в «ампульной» технологии. В последнем случае малое количество жидкого металла без избыточного давления не протекает сквозь сопло в донной части тигля, так как ширина самой щели не превышает десятых долей миллиметра. В схеме подачи сверху (рис. 3, б) при открытии разливочной щели (позиция б, б) возможна комбинация обоих способов – первоначально столбом

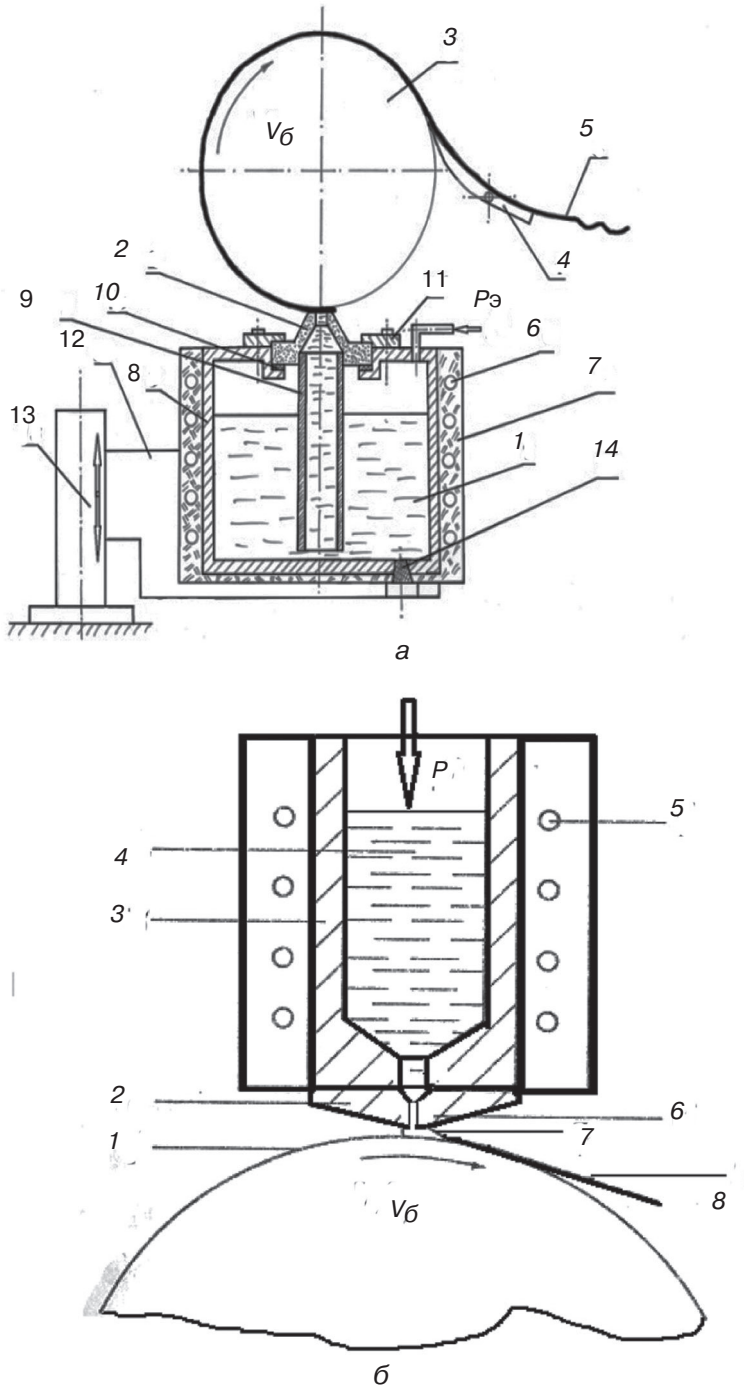


Рис. 3. Схемы установок с подачей расплава снизу (а) и сверху (б): P и $P_{э}$ – избыточное давление на расплав, $V_{б}$ – скорость барабана; 1, а, 4, б – расплав; 2 – сопло; 3, а, 1, б – барабан-холодильник; 4, а – лентосъемник; 5, а, 8, б – аморфная лента; 6, а, 5, б – индукционный нагреватель; 6, б – щель сопла; 7, а – теплоизоляция плавильного тигля; 7, б – ванна расплава; 8, а, 3, б – плавильный тигель; 9, а – огнеупорный металлопровод; 10, а и 11, а – компенсирующие прокладки сопла; 12, а – кронштейн крепления плавильной камеры; 13, а – механизм перемещения плавильной камеры; 14, а – пробка аварийного слива расплава

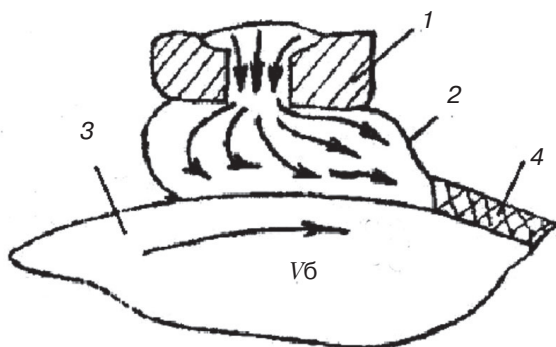


Рис. 4. Схема образования лужицы расплава в зазоре «сопло-барабан»: 1 – сопло; 2 – лужица расплава; 3 – барабан-холодильник; 4 – лента (стрелками показано течение расплава); V_6 – скорость и направление вращения барабана

наблюдается [15]. Неоднозначно также влияние скорости и материала барабана-холодильника. Если увеличить скорость его вращения при остальных постоянных, то толщина ленты будет уменьшаться, а скорость ее охлаждения соответственно возрастать. Но с увеличением скорости вращения барабана его поверхность будет увлекать все более толстый пограничный слой воздуха [16]. Этот слой увлекается «задней» поверхностью лужицы, что приводит к образованию воздушных каверн на контактной поверхности ленты [17]. В результате уменьшается площадь контакта расплава и ленты с поверхностью барабана, вследствие чего скорость охлаждения снижается. Кроме того, увеличение скорости вращения барабана уменьшает время контакта ленты с его поверхностью, что, в свою очередь, повысит температуру ленты, покидающую барабан. Особенно это важно при получении аморфных сплавов, так как повышенная температура (150-200 °С) будет вызывать структурную релаксацию [18] и лента будет хрупкой.

На размер лужицы (ее длину) оказывают влияние избыточное давление на расплав (фактически скорость его истечения через сопло), геометрия сопла и зазор «сопло-барабан». Их влияние на конечный результат также неоднозначно. Принято считать геометрию сопла и зазор постоянными в течение цикла разливки. Но при этом прилагаемое давление на расплав в тигле (или высота столба расплава) будут зависеть от диаметра (ширины щели) сопла и величины зазора «сопло-барабан». Зазор является неким гидравлическим сопротивлением (особенно в процессе PFC) [15]. Его уменьшение будет препятствовать вытеканию расплава из сопла и тем самым уменьшать длину лужицы расплава и толщину ленты.

Сопло обеспечивает формирование потока расплава с заданной формой и скоростью, то есть величину расхода. Геометрия сопла и его материал должны минимизировать гидравлические возмущения потока расплава и взаимодействие со стенками сопла.

Избыточное давление на расплав (высота расплава в тигле) устанавливается в зависимости от геометрии сопла, температуры расплава, величины зазора и скорости вращения барабана-холодильника. Простое увеличение скорости истечения (при постоянстве остальных параметров) приводит к увеличению длины лужицы и толщины ленты [14]. Но, в то же время, возрастает усилие «прилипания» расплава к барабану и уменьшается количество воздушных каверн на контактной поверхности ленты, вследствие чего возрастает теплоотвод в барабан и общая скорость охлаждения ленты [15].

В итоге лужица расплава объединяет влияние температуры расплава, скорости его истечения через сопло, физико-химические свойства расплава, геометрию и

стрировать влиянием температуры расплава. С ее повышением снижается вязкость и плотность расплава [1], поэтому внутри лужицы поверхность барабана будет увлекаться более тонкий слой жидкого металла, который затем затвердевает в более тонкую ленту [14]. Другими словами, увеличение температуры расплава должно способствовать утоньшению получаемой ленты (при постоянстве остальных параметров). Но с другой стороны, уменьшение вязкости и плотности жидкого металла при тех же постоянных параметрах разливки увеличивает расход расплава через сопло, увеличивая тем самым длину лужицы, то есть толщину ленты (что и

материал сопла, величину зазора «сопло-барабан», скорость вращения самого барабана-холодильника, его материал, качество поверхности и способ охлаждения. Поэтому, фиксируя в процессе разливки длину жидкой лужицы, поддерживая ее постоянной и меняя зазор, скорость истечения расплава (например, избыточным давлением) или скорость вращения барабана, можно получать ленту одинаковой толщины [19].

Этап контакта ленты с барабаном определяет скорость охлаждения сформированной ленты – следовательно, ее свойства и микроструктуру (для микрокристаллических сплавов). Лента после затвердевания продолжает находиться в контакте с поверхностью барабана до точки съема. В этот промежуток времени теплоотвод происходит преимущественно в барабан за счет его высокой теплопроводности. Наружная поверхность ленты контактирует с «неподвижным» пограничным слоем воздуха, который увлекается вращающимся барабаном [16]. Теплоотвод в этот слой ничтожно мал по сравнению с барабаном, и им обычно пренебрегают [14]. Количество тепла, отдаваемое барабану, зависит от ширины ленты и массы разливаемого металла. Если же сплав микрокристаллический, то есть не переходит в аморфное состояние, то появляется дополнительный источник тепла – скрытая теплота кристаллизации. Поэтому конструкция барабана может быть водоохлаждаемой или нет. Отсюда вытекает и диаметр барабана, который изменяется в пределах 400-800 мм [9, 15, 20]. Помимо диаметра барабана, следует учитывать его материал, общую конструкцию и привод.

Диаметр барабана «неявно» влияет на качество поверхности получаемой ленты. При «большом» диаметре барабан вращается с малой угловой скоростью для необходимой линейной скорости поверхности. В этом случае частота возможных вибраций от привода и узла крепления барабана в подшипниках будет низкой. Низкая частота вибраций (колебаний) слабо влияет на стабильность жидкой лужицы. При меньших диаметрах частота вибраций возрастает, влияние этих колебаний на жидкую лужицу в зазоре «сопло-барабан» усиливается и приводит к колебаниям толщины ленты.

Другой аспект влияния диаметра барабана связан с износом его поверхности вследствие взаимодействия с расплавом в течение цикла разливки. По мере увеличения времени цикла возрастает шероховатость поверхности, которая в определенный момент может достичь такой величины, что спровоцирует прилипание ленты. При этом лента совершает полный оборот, затягивается по жидкую лужицу и весь процесс нарушается [15]. Поэтому для уменьшения эрозии поверхности барабана необходимо увеличение его диаметра. Но такая мера имеет свои ограничения, поскольку при этом возрастает общая масса (непосредственно барабан и вал, на котором он крепится) конструкции. Это, в свою очередь, требует более габаритных подшипников, у которых радиальное биение элементов качения составляет 10-20 мкм [21] при «стандартном» зазоре «сопло-барабан» 100-200 мкм [22].

Исходная шероховатость поверхности барабана, на которую подается расплав из сопла, должна иметь определенную величину и микрогеометрию [1]. При соблюдении этого условия будет оптимальная адгезия расплава к поверхности и плотный контакт сформированной ленты с ней. Это, в свою очередь, снизит количество воздушных каверн на контактной поверхности ленты и увеличит тем самым теплоотвод от ленты в барабан. В итоге возрастает коэффициент заполнения в тороидальном магнитопроводе, магнитные свойства которого становятся выше. Отсюда возникает необходимость механизма обновления поверхности барабана (сохранения заданной шероховатости), особенно для «крупнотоннажного» производства.

Поведение ленты за пределами барабана-холодильника можно рассматривать как дополнительную зону охлаждения [23], так как скорость охлаждения ленты, летящей в воздушной атмосфере со скоростью более 20 м/с может достигать 1000 °C/с и более [15]. На этом этапе технологической цепочки лента как бы «обдувается» турбулентным воздушным потоком [15], который обеспечивает интенсивный теплоотвод с

обоих поверхностей. Особенно это важно для микрокристаллических лент, когда скрытая теплота кристаллизации начинает интенсивно выделяться в контакте с барабаном и за его пределами [15]. При этом устройство для принудительного съема ленты также может играть роль дополнительного охладителя [24] при определенном его конструктивном исполнении.

Такое дополнительное охлаждение важно для снижения конечной температуры получаемой ленты, поскольку позволяет избежать структурной релаксации [18], которая охрупчивает аморфную ленту и влияет на микроструктуру ленты микрокристаллической. Использование теплопроводного лентосъемника дает возможность сократить зону контакта ленты с барабаном. За счет этого повышается объем разливаемого за один цикл металла и увеличивается срок службы поверхности барабана до очередного обновления.

Выводы

- Предложено рассматривать процесс получения быстрозакаленной ленты как технологическую цепочку отдельных этапов. При этом вся цепочка должна быть привязана к конкретному составу сплава, способу выплавки исходной заготовки и конструкции оборудования.
- Противоположное влияние различных факторов на толщину ленты целесообразно заменить контролем размеров лужицы расплава в зазоре «сопло-барабан».
- Разливка более ~1,5-2 кг сплава требует увеличения диаметра барабана-холодильника и его принудительного охлаждения. При этом важную роль играет микрогеометрия его поверхности.
- Поведение ленты за пределами барабана следует рассматривать как дополнительную зону охлаждения, которая может быть организована различными способами.



Список литературы

1. Филонов М. Р., Аникин Ю. А., Левин Ю. Б. Теоретические основы производства аморфных и нанокристаллических сплавов методом сверхбыстрой закалки. М.: «МИСИС». 2006. – 328 с.
2. Сребрянский Г. А., Стародубцев Ю. Н. Основные принципы совершенствования технологии производства аморфной ленты // Сталь. –1991. – № 9. – С. 73-78.
3. Громова М. Н. Химическая неоднородность слитка шихтовой заготовки для получения сплава $Fe_{70}Cr_{10}P_{13}C_7$ // Расплавы. –1991. – № 1. –С. 94-96.
4. Варганов Д. В., Журавлев В. А., Калябина О. А., Шабанова И. Н. Изучение взаимосвязи состава поверхностных слоёв сплавов Fe-Cr-P-C в жидком и твердом состояниях // Расплавы. –1989. – № 3. – С. 22-27.
5. Патент РФ № 2424348, 20.07. 11. Лента из аморфного резистивного коррозионностойкого сплава на основе железа.
6. Патент 2241056 России, МПК7 C22C 33/04, 45/04. Способ получения слитков исходного сплава для производства аморфных материалов/В. А. Пономарев, О. Г. Иванов, В. С. Чернов, А. С. Евтеев. – Оpubл. 27.11.2004.
7. Preparation of glass-forming alloys under a refining metal oxide (boron trioxide slag). Pat. USA, 75/53, № 4181521, заявл. 1978, опубл. 1980.
8. Воскобойников В. Г., Кудрин А. Г., Якушев А. М. Общая металлургия. Изд. 3-е, перераб. и доп. –М.: Металлургия, 1979. – 487с.
9. Сребрянский Г. А. Разработка концепции установок для получения аморфных лент закалкой расплава // Сталь. – 2011. – № 12. – С. 61-66.
10. Данилова И. И., Маркин В. В., Смолякова О. В., Рошин В. Е., Ильин С. И., Гойхенберг Ю. Н. Производство аморфной и нанокристаллической ленты методом литья на одновалковой МНЛЗ // Вестник ЮУрГУ/ – 2008. – № 9. – С. 16-21.
11. URL: <http://www.studfiles.ru/preview/5993698/>.

12. Сребрянский Г. А., Стовпченко А. П. Гидродинамика формирования быстроохлажденной ленты из расплава // Сталь. – 2010. – № 10. – С. 68-70.
13. Anthony T. R., Cine H. E. On the uniformity of amorphous metal ribbon formed by a cylindrical jet impinging on a flat moving substrate // J. Appl. Phys. – 1978. – V. 49. – № 2. – pp. 829-837.
14. Борисов В. Т., Сребрянский Г. А. О формировании аморфной металлической ленты при закалке расплава // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 4. – С. 82-85.
15. Сребрянский Г. О. Управління якістю металевих стрічок на основі вдосконалення режиму розливу розплаву. Дис. канд. техн. наук: 05.16.02. – Дніпропетровськ, 2006.
16. Сребрянский Г. А., Стовпченко А. П. Изучение характеристик газового пограничного слоя на поверхности закалочного барабана // МФИИТ. – 2006. – Т. 28. – № 9. – С. 1153-1165.
17. Молотиллов Б. В., Дьяконова Н. Б., Власова Е. Н., Лясоцкий И. В. Металлургические дефекты поверхности аморфных лент // Сталь. – 2001. – № 8. – С. 101-103.
18. Шмырева Т. П., Береза Е. Ю. Быстроохлажденные эвтектические сплавы. – Киев: Техника, 1990. – 144 с.
19. Способ получения быстроохлажденной ленты // В. П. Овчаров, В. Ф. Птицын, А. К. Фелингер, Г. А. Сребрянский, В. Т. Борисов. А. с. 1764787 СССР, МКИ³ В 22 Д 11/06.-№ 4736853/02; Опубл. 30.09.92; Бюл. № 36.
20. Сребрянский Г. А., Белоусов В. В., Юрич П. Ю. Теоретические основы конструкции диска-холодильника установок для получения аморфных сплавов // Сталь. – 2010. – № 8. – С. 79-82.
21. Анурьев В. И. Справочник конструктора–машиностроителя.– М.: Машиностроение, 1980. – Т. 2. – 584 с.
22. Чернов В. С., Иванов О. Г., Евтеев А. С. Основные факторы формирования свойств аморфных магнитомягких сплавов // Материаловедение. – 2001. – № 4. – С. 38-43.
23. Сребрянский Г. А., Стовпченко А. П. Изучение условий охлаждения металлической ленты за пределами барабана - кристаллизатора // Строительство, машиностроение. – Днепропетровск, ПГАСА, 2006. – Вып. 37. – С. 458-464.
24. Сребрянский Г. А., Хлынцев В. П. Изучение конструктивных элементов оборудования на процесс формирования и характеристики аморфной ленты // Сучасні проблеми металургії. – 2007. – № 10. – С. 114-122.



References

1. Filonov M. R., Anikin Yu. A., Levin Yu. B. (2006) Teoreticheskie osnovy proizvodstva amorfnykh i nanokristallicheskiykh spлавov metodom sverkhbystroy zakalki [*Theoretical basis of the production of amorphous and nanocrystalline alloys by method ultrafast quenching*]. Moscow: «MISIS», 328 p. [in Russian].
2. Srebryanskiy G. A., Starodubtsev Yu. N. (1991) Osnovnye printsipy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva amorfnoy lenty [*The basic principles of improving the production technology of amorphous ribbon*]. Stal, no. 9, pp. 73-78. [in Russian].
3. Gromova M. N. (1991) Khimicheskaya neodnorodnost slitka shikhtovoy zagotovki dlya polucheniya splava Fe70Cr10P13C7 [*Chemical heterogeneity ingot billet feedstock to produce alloy Fe70Cr10P13C7*]. Rasplavy, no. 1, pp. 94-96. [in Russian].
4. Varganov D. V., Zhuravlev V. A., Kalyabina O. A., Shabanova I. N. (1989) Izuchenie vzaimosvyazi sostava poverkhnostnykh sloev spлавov Fe-Cr-R-S v zhidkom i tverdom sostoyaniyakh [*The study of the relationship of surface layers of alloys Fe-Cr-R-S in liquid and solid states*]. Rasplavy, no. 3, pp. 22-27. [in Russian].
5. Lenta iz amorfного rezistivного korrozionnostoykogo splava na osnove zheleza [*The tape from amorphous resistance corrosion alloys of the based of iron*]. Patent RF 2424348, 20.07.2011. [in Russian].
6. Ponamarev V. A., Ivanov O. G., Chernov V. S., Yevteev A. S. Pat. 2241056 Rossii, MPK7 S22S 33/04, 45/04. Sposob polucheniya slitkov iskhodного splava dlya proizvodstva amorfnykh materialov [*A method for producing a starting alloy ingot for producing amorphous materials*]. № 2003102994/02; zayavl. 04.02.1003; opubl. 27.11.2004. [in Russian].
7. Preparation of glass-forming alloys under a refining metal oxide (boron trioxide slag). Pat. USA, 75/53, № 4181521, zayavl. 1978, opubl. 1980. [in English].

8. Voskoboynikov V. G., Kudrin A. G., Yakushev A. M. (1979) *Obshchaya metallurgiya [General metals]*. Izd. 3-e, pererab. i dop. Moscow: Metallurgiya, 487 p. [in Russian].
9. Srebryanskiy G. A. (2011) *Razrabotka kontseptsii ustanovok dlya polucheniya amorfnykh lent zakalkoy rasplava [Development of plant concepts for amorphous ribbons melt quenching]*. Stal, no. 12, pp. 61-66. [in Russian].
10. Danilova I. I., Markin V. V., Smolyakova O. V., Roshchin V. Ye., Ilin S. I., Goykhenberg Yu. N. (2008) *Proizvodstvo amorfnoy i nanokristallicheskoj lenty metodom litya na odnovalkovoy MNLZ [Production of amorphous and nanocrystalline tape casting method on single roller MNLZ]*. Vestnik YuUrGU, no. 9, pp. 16-21. [in Russian].
11. URL: www.studfiles.ru/preview/5993698/.
12. Srebryanskiy G. A., Stovpchenko A. P. (2010) *Gidrodinamika formirovaniya bystrozakalennyj lenty iz rasplava [Hydrodynamics of formation quickly hardened ribbon from the melt]*. Stal, no. 10, pp.68-70. [in Russian].
13. Anthony T. R., Cine H. E. (1978) On the uniformity of amorphous metal ribbon formed by a cylindrical jet impinging on a flat moving substrate. *J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 2, pp. 829-837. [in English].
14. Borisov V. T., Srebryanskiy G. A. (1984) *O formirovanii amorfnoy metallicheskoj lenty pri zakalke rasplava [About the formation of the amorphous metal ribbon with a melt quenching]*. Izv. AN SSSR. Metally, no. 4, pp. 82-85. [in Russian].
15. Srebryanskiy G. O. (2006). *Upravlinnia yakistiu metalevykh strichok na osnovi vdoskonalennia rezhymu rozlyvu rozplavu [Quality management metal strips through improved mode pouring molten]*. (PhD Thesis), Dnipropetrovsk. [in Ukrainian].
16. Srebryanskiy G. A., Stovpchenko A. P. (2006) *Izuchenie kharakteristik gazovogo pogranichnogo sloya na poverkhnosti zakalochnogo barabana [The study of the characteristics of the gas boundary layer on the surface of the quenching drum]*. MFiNT, T. 28, no. 9, pp. 1153-1165. [in Russian].
17. Molotilov B. V., Dyakonova N. B., Vlasova Ye. N., Lyasotskiy I. V. (2001) *Metallurgicheskie defekty poverkhnosti amorfnykh lent [Metallurgical defects in the surface of amorphous ribbons]*. Stal, no. 8, pp. 101-103. [in Russian].
18. Shmyreva T. P., Bereza Ye. Yu. (1990) *Bystrookhlazhdennye evtekticheskie splavy [Quickly chilled eutectic alloys]*. Kiev: Tekhnika, 144. [in Russian].
19. Ovcharov V.P., Ptitsyn V.F., Felinger A. K., Srebryanskiy G. A., Borisov V. T. *Sposob polucheniya bystrozakalennyj lenty [A method of producing quickly hardened ribbon]*. A.s. 1764787 SSSR, MKI3 V 22 D 11/06. № 4736853/02; zayavl. 31.07.89; opubl. 30.09.92; Byul. № 36.
20. Srebryanskiy G. A., Belousov V. V., Yurich P. Yu. (2010) *Teoreticheskie osnovy konstruksii diskakholodilnika ustanovok dlya polucheniya amorfnykh splavov [Theoretical foundations of the structure of the refrigerator-ROM installations for producing amorphous alloys]*. Stal, no. 8, pp. 79-82. [in Russian].
21. Anurev V. I. (1980) *Spravochnik konstruktora–mashinostroitelja [Manual Machinist-Designer]*. Moscow: Mashinostroenie, T. 2, 584 p. [in Russian].
22. Chernov V. S., Ivanov O. G., Yevteev A. S. (2001) *Osnovnye faktory formirovaniya svoystv amorfnykh magnitomyagkikh splavov [The main factors of the properties of amorphous magnetic alloys]*. Materialovedenie, no. 4, pp. 38-43. [in Russian].
23. Srebryanskiy G. A., Stovpchenko A. P. (2006) *Izuchenie usloviy okhlazhdeniya metallicheskoj lenty za predelami barabana – kristallizatora [The study of the conditions of cooling of the metal strip outside of the drum – the mold]*. Stroitelstvo, mashinostroenie. Dnepropetrovsk, PGASA, vol. 37, pp. 458-464. [in Russian].
24. Srebryanskiy G. A., Khlyntsev V. P. (2007) *Izuchenie konstruktivnykh elementov oborudovaniya na protsess formirovaniya i kharakteristiki amorfnoy lenty [The study of the structural elements of equipment on the formation and characteristics of the amorphous ribbon]*. Suchasni problemi metalurgii, no. 10, pp. 114-122. [in Russian].

Поступила 29.01.2017