

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВОВ (Обзор)

Д.А. Калашник, В.А. Шаповалов, И. В. Шейко,
Ю.А. Никитенко, В.В. Якуша

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведен анализ свойств и строения аморфных и мелкокристаллических материалов. Описан метод, позволяющий статистически определить структуру аморфных материалов. Благодаря уникальным механическим, электрическим и магнитным свойствам аморфные материалы применяются в качестве постоянных магнитов, электрических датчиков, магнитопроводов трансформаторов, припоев при прецизионной пайке. Особое внимание уделяется перспективной технологии получения постоянных магнитов. Рассмотрены технологические особенности методов получения аморфных и мелкокристаллических материалов с помощью прецизионной металлургии. Проанализированы методы распыления, молота и наковальни, прокатки расплава, поверхностного плавления с помощью электронного луча и лазера, метод Тейлора, спиннингования, экстракции из расплава. Подробно рассмотрен метод диспергирования из расплава с использованием индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. Наряду с положительными сторонами этот метод имеет недостатки, одним из которых является невысокая скорость закалки. Нивелировать данный недостаток прогнозируется при исследовании тепловых процессов на диске-холодильнике. Библиогр. 41, ил. 4.

Ключевые слова: аморфные металлические материалы; диспергирование; закалка; индукционная плавка в секционном кристаллизаторе; чешуйки

Строение, свойства аморфных материалов и их применение. В последние годы появился целый ряд новых типов металлических материалов, которые активно исследуются с перспективой промышленного применения. В первую очередь речь идет об аморфных металлических сплавах и о нанокристаллических материалах, получаемых различными способами. Отсутствие в аморфных металлах дальнего порядка в расположении атомов резко затрудняет изучение и описание их структуры. В отличие от кристаллических тел в них нет элементарных ячеек, пусть и достаточно сложных, определив положение атомов в которых, можно было бы описать всю структуру. Поэтому описание такой структуры может быть только статистическим [1–4].

Для описания структуры аморфных тел используют различные статистические функции: радиальную плотность распределения атомов $\rho(r)$, т.е. количество атомов в единице объема на расстоянии r от центра атома, принятого за начало отсчета; безразмерную функцию радиального распределения атомов (ФРРА) в виде $g(r) = \rho(r)/\rho_0$ или $G(r) = 4\pi r \rho(r) - \rho_0$, где ρ_0 — средняя плотность атомов,

и др. Их находят путем сложной математической обработки спектров рассеивания исследуемым веществом рентгеновских лучей, нейтронов и т.п. Положение первого пика ФРРА определяет среднее межатомное расстояние, положения следующих пиков — средние расстояния к более дальним соседям [5, 6].

Важнейшую роль в исследовании структуры аморфных металлов играет моделирование, результаты которого сопоставляются с экспериментальными ФРРА. Структуру аморфного сплава рассматривают как состоящую из полиэдров Бернала или призм, в центре которых находится атом металлоида, как кристалл с плотностью дефектов, превышающую некоторую критическую величину. В качестве дефектов часто рассматривают комплексы дисклинаций разного знака, создающих невозможные в кристалле поворотные оси 5-го или 7-го порядка [6, 7].

Следствием уникальности аморфной структуры являются необычные магнитные, механические, электрические свойства и коррозионная стойкость аморфных металлических сплавов. Наряду с высокой магнитной мягкостью — такой,



что уровень электромагнитных потерь в аморфных сплавах с высокой магнитной индукцией оказывается существенно ниже, чем во всех известных кристаллических сплавах, эти материалы проявляют исключительно высокие механическую твердость и прочность при растяжении, в ряде случаев имеют близкий к нулю коэффициент теплового расширения, а их удельное электросопротивление в три-четыре раза выше его значения для железа и его сплавов [8, 9].

Аморфные сплавы являются высокопрочными материалами. Предел текучести аморфных сплавов $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$, $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, $\text{Fe}_{60}\text{Cr}_6\text{Mo}_6\text{B}_{28}$ составляет соответственно 2400, 3600, 4500 МПа, в то время как предел текучести высокопрочных сталей обычно составляет не более 2500 МПа. Для аморфных сплавов характерна четкая линейная связь между твердостью и прочностью. Для сплавов на основе Fe, Ni, Co справедливо выражение $HV = 3,2\sigma_m$, что позволяет с достаточной точностью использовать показания твердомера для определения прочностных характеристик. Следует обратить особое внимание на то, что наряду с высокой прочностью аморфные сплавы характеризуются хорошей пластичностью при сжатии (до 50 %) и изгибе [10].

В настоящее время для производства автомобилей, промышленных роботов, электродвигателей, промышленных измерительных приборов и медицинских электрических устройств необходимы такие датчики потока управляющих индукционных моторов, которые бы удовлетворяли ряд условий: высокое отношение сигнал/шум, быстрое действие при частотах до 2 кГц, высокая стабильность при изменениях температуры и максимальной рабочей температуре около 180 °С, миниатюризация (диаметр <0,6 мм для возможности установки в пазы статора). Для выполнения этих требований мало пригодны датчики из кристаллических материалов, поскольку полупроводниковые датчики обладают высокой чувствительностью, но низкими термической стабильностью и рабочей температурой, а датчики из магнитных сплавов имеют высокую стабильность, но низкий уровень быстрого действия и линейности [11]. Магнитометры, изготовленные из аморфной проволоки, отличаются многофункциональностью и удовлетворяют почти всем перечисленным требованиям.

Перспективным является применение быстро закаленных материалов с нанокристаллической и аморфной структурой для получения постоянных магнитов [12, 13]. В аморфных сплавах носителями магнетизма являются атомы переходных металлов — железа, кобальта, никеля и др.,

а атомы, стабилизирующие аморфное состояние, такие, как фосфор, бор, углерод, кремний и др. — немагнитные. Ферромагнетизм (антиферромагнетизм) имеет место при условии положительного (отрицательного) значения обменного интеграла, характеризующего особое квантовое (обменное) взаимодействие между магнитными спиновыми моментами. В сплавах на основе железа и кобальта магнитный момент уменьшается с увеличением концентрации металлоидов, и эти сплавы имеют более низкие значения намагниченности и температуры Кюри, а в аморфных сплавах никеля с металлоидами при температурах выше комнатной ферромагнетизм вообще не проявляется. В кобальтовых сплавах магнитный момент атомов слабо изменяется с концентрацией металлоида и практически одинаков для кристаллических твердых растворов, химических соединений и аморфных структур. Магнитный момент атомов железа в сплавах сильно различается для аморфного и кристаллического состояний, причем эта особенность характерна для многих сплавов на основе железа.

На величину коэрцитивной силы оказывает влияние магнитная анизотропия, микроструктура, наличие или отсутствие определенного типа дефектов, которые могут выступать либо как центры зарождения, либо как центры закрепления доменных границ [5, 9, 14]. Наиболее существенное влияние на величину коэрцитивной силы оказывает микроструктура. Наличие аморфной фазы или мелкокристаллических зерен варьирует величину коэрцитивной силы от 100 до 14 000 Э [15–17].

Применение аморфных материалов не ограничивается производством датчиков и постоянных магнитов. Широкое применение в промышленности нашли аморфные магнитопроводы для трансформаторов [18, 19]. Магнитопроводы из аморфных и нанокристаллических сплавов имеют значительно меньшие удельные магнитные потери по сравнению с электротехнической сталью, пермаллоями и ферритами.

При прецизионной пайке сегодня также используют аморфные материалы. Физико-химические качества аморфных и мелкокристаллических сплавов обуславливают значительно более высокую диффузионную и капиллярную активность по сравнению с кристаллическими аналогами, а также превосходную гибкость. Быстрое затвердевание сужает интервалы плавления и кристаллизации, что в сочетании с малой толщиной (20...50 мкм) обеспечивает «мгновенное» равномерное плавление припоя по всему объему [5, 20, 21].

Как было показано выше, область применения аморфных материалов достаточно широка. Но

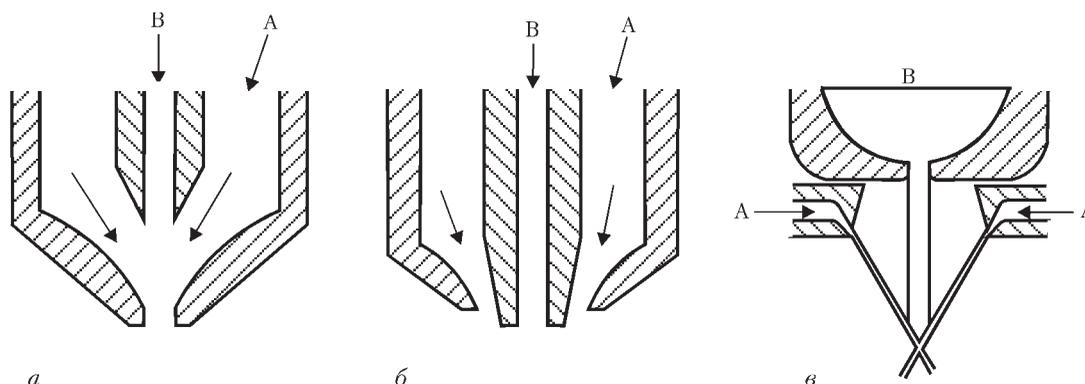


Рис. 1. Системы распыления струй: *а* — полностью замкнутая с внутренним смешиванием; *б* — полузамкнутая с внешним смешиванием; *в* — открытая со свободным падением струи расплава; А — распыляющая струя; В — распыляемый расплав

достижение аморфной и мелкокристаллической структуры во многом обуславливается применением той или иной технологии производства. Уникальные физико-химические свойства при одинаковом методе производства зависят от технологических режимов.

Технология получения быстрозакаленных материалов. Одним из первых аморфное состояние получил П. Дювез [22]. Его метод базируется на выстреливании небольшой порции жидкого металла (около 25 мг) на медную мишень. Закашиваемый материал плавится и удерживается в сопле, расположенном над охлаждающей поверхностью. Над соплом расположено устройство для создания ударной волны. Пушка работает таким образом, что при повышении в верхней камере давления газа до уровня 5 МПа подобранная соответствующим образом диафрагма прорывается и создается ударная волна, выбрасывающая расплавленную навеску на охлаждающую поверхность. Данным методом получают образцы в виде неоднородных чешуек с диаметром не более нескольких сантиметров и толщиной, колеблющейся от 0,1 до нескольких десятков микрометров в пределах одного образца. К плюсам данного метода можно отнести высокую скорость закалки ($10^6 \dots 5 \cdot 10^8$ К/с). К минусам — низкую производительность, дорогостоящее оборудование, неоднородность получаемых образцов.

Более эффективным с точки зрения производительности является распыление расплавленного металла струей воздуха или газа [23, 24]. В зависимости от температуры плавления металла возможно распыление в трех системах (рис. 1). Материалы жидкие при комнатной температуре можно распылять в полностью замкнутой системе (рис. 1, *а*). Такая технология является высокоэффективной в отношении передачи энергии распыляющим газом, однако в процессе работы на выходе из сопла образуется корка. Металлы с

низкой температурой плавления можно распылять с использованием полузамкнутой системы, в которой коаксиально направленная распыляющая струя сталкивается с расплавом непосредственно в точке его выхода из сопла (рис. 1, *б*). Для других металлов применяют «открытую» систему, в которой столкновение распыляющей струи с расплавом происходит после прохождения некоторого расстояния в свободном полете (рис. 1, *в*). Данный метод позволяет получить порошок с частицами меньше 50 мкм. К положительным сторонам можно отнести высокую производительность и относительную однородность образцов. К недостаткам — низкую скорость охлаждения, которая варьируется от 400 до значения 10^4 К/с.

Другой разновидностью метода распыления является ротационное распыление. В основе метода лежит принцип сбрасывания капель расплава с поверхности быстро вращающегося распылителя — диска, чаши, тигля или электрода.

В методе вращающегося электрода процессы плавления и образования капель локализуются с

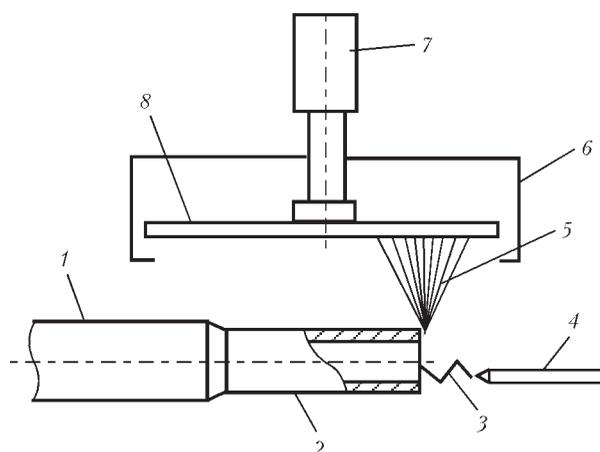


Рис. 2. Схема распыления вращающегося электрода с осаждением на вращающийся диск: 1 — держатель; 2 — расходуемый вращающийся электрод; 3 — электрическая дуга; 4 — водоохлаждаемый вольфрамовый электрод; 5 — распыленная капля; 6 — сборник закаленного материала; 7 — двигатель; 8 — вращающийся закалочный диск

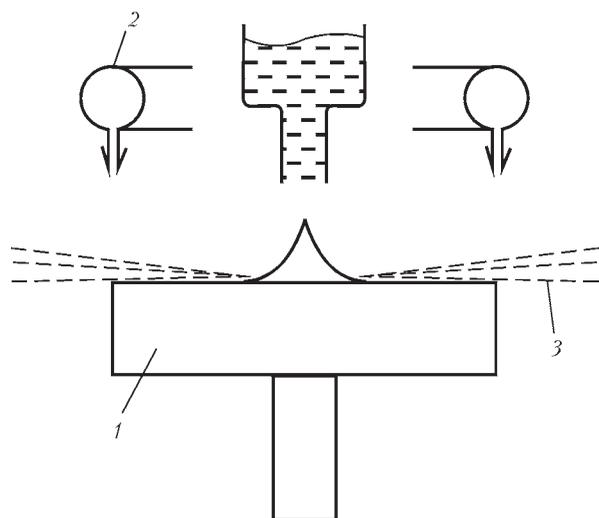


Рис. 3. Схема метода центробежного распыления: 1 — вращающийся распыляющий диск; 2 — охлаждающий газ; 3 — мелкие частицы

помощью дуги на торце вращающегося круглого стрежня или трубки (рис. 2) [25]. Отсутствие тигля в данном методе является особенно привлекательным в случае использования металлов с повышенной реакционной способностью и может обеспечить среднюю скорость охлаждения 10^5 К/с, однако низкая производительность делает его непривлекательным для промышленности.

Более высокую скорость охлаждения может дать метод вращающейся чаши [26]. В этом методе струя расплава поступает внутрь чаши, вращающейся со скоростью 8...16 тыс. об/мин, где дробится, а образованные капли с большим ускорением проходят через слой охлаждающей жидкости. Такое высокоскоростное перемещение в сочетании с большим статическим давлением, препятствующим образованию паровой рубашки, обеспечивает для частиц сплавов на основе железа размером меньше 50 мкм скорость охлаждения 10^6 К/с. Но из-за нестабильности технологических параметров и низкой производительности промышленное производство быстрозакаленных материалов данным методом невозможно.

На основании ротационного метода распыления разработан центробежный при котором расплав поступает на диск, вращающийся со скоростью до 30 тыс. об/мин и распыляется [22]. Диск интенсивно обдувают газом, обладающим высокой теплопроводностью (рис. 3). При этом методе для специальных сплавов достигается скорость охлаждения порядка 10^5 К/с. Процесс характеризуется непрерывностью, получением чистого порошка и хорошей производительностью.

Существенно отличаются от методов распыления — быстрая закалка из расплава (БЗР). Методы БЗР можно разделить на две категории: родственные литью под давлением при котором расплав инжектируют в полость фиксированной формы и размера, либо проковывают его в тонкие сечения между молотом/поршнем и наковальней/вторым поршнем и родственные литью полос и прутков. В этом случае расплав экструдирован на охлаждающую поверхность или экстрагируется контактирующим с ним вращающимся диском/барabanом.

Метод молота и наковальни. Быстрая закалка осуществляется расплющиванием образца между поверхностями неподвижного металлического тела и перемещающегося с большой скоростью поршня [26]. Существуют установки в которых плавление материала осуществляется плазменным факелом, в других видах оборудования образец плавится в фокусе солнечной печи. Также можно использовать газовый CO_2 — лазер с минимальной выходной мощностью 400 Вт. Закаленные образцы обычно состоят из двух частей. Первая — сплошная расплющенная между двумя металлическими плоскостями и имеющая среднюю толщину 100...300 мкм (в зависимости от типа материала), и вторая, состоящая из отдельных пластинок толщиной 10...50 мкм, оказывающихся обычно в наилучших условиях закалки. Вторая часть образца образуется вследствие того, что при расплющивании он лопается.

В одной из установок с использованием лазерного луча образцы, предназначенные для закалки, помещают в маленькие плоские углубления на водоохлаждаемом медном диске, играющем роль наковальни, и под действием сжатого воздуха (давление до 10 МПа) приводится в движение молот. Лазер представляет собой установку непрерывного типа, работающую на CO_2 и имеющую мощность 250 Вт. Луч фокусируется с помощью германиевых линз, расположенных на стенках вакуумной камеры. Диск для образцов вращается и подводит таким образом очередной образец под молот. К достоинству данного метода относится высокая скорость охлаждения. К недостаткам — низкая производительность, высокая стоимость оборудования, сложная наладка оборудования.

Метод прокатки расплава. В этом методе жидкий металл под некоторым давлением выжимается через сопло и подается в зазор между двумя вращающимися охлаждаемыми валками [27, 28]. Расплав получают в тигле из огнеупорного материала, помещенном в индукторе. Скорость изго-



товления ленты достигает 30...45 м/с, а скорость закалки расплава — 10^5 ... 10^6 К/с. При прокатке расплава актуальной является проблема образования пробок в керамических соплах.

Поверхностное плавление с помощью электронного луча и лазера. Сущность метода заключается в плавлении тонкого слоя на поверхности подложки [29]. Небольшие участки можно быстро и непрерывно расплавлять, используя для этой цели электронный и лазерный лучи вследствие высокой плотности их энергий (100 кВт/см^2). Типичные значения скорости охлаждения в этом случае колеблются от $4 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^6$ К/с. Помимо образования аморфных слоев поверхностное плавление может быть использовано для создания новых поверхностных композиций путем плавления тонких пленок или непрерывным подводом материала в виде проволоки или порошка к поверхности подложки. Одним из вариантов этого метода является инъекция твердых частиц расплавленной дорожки на поверхность с помощью лазерного или электронного луча с целью повышения ее износостойкости. Преимущество — высокая скорость закалки. Недостаток — высокая стоимость оборудования.

Метод Тейлора. Небольшое количество (3...5 г) металла или сплава, помещенного в стеклянную трубку, расплавляется в поле высокочастотного индуктора [30, 31]. Часть стеклянной трубки, примыкающая к расплавленному металлу, размягчается, и из стекла формируется оболочка, обволакивающая каплю. Из размягченного стекла вытягивается стекловолокно, которое заводится и наматывается на катушку приемного устройства. При определенных режимах вытяжки возникают условия затекания металла в образующийся стеклянный капилляр. Таким образом формируется микропровод, состоящий из металлической жилы и сплошной стеклянной оболочки.

Модификацией капельного является «непрерывный» метод литья микропровода [32, 33]. В этом случае уровень металла в капле (микрорванне) непрерывно восстанавливается вводимым в нее стержнем исходного металла или сплава. Этот метод используется в основном для получения микропроводов из меди, серебра и ряда их сплавов и отличается относительной простотой оборудования. Недостаток — применяется в основном для меди и ее сплавов.

Метод спиннингования. Спиннингование расплава на вращающемся холодильнике заключается в том, что жидкий металл под некоторым давлением

P выжимается через сопло на вращающийся относительно горизонтальной оси охлаждаемый диск. Процесс разлива осуществляется в контролируемой атмосфере. Метод позволяет получать тонкие ленты толщиной 11...130 мкм со скоростью 20...40 м/с. Скорость кристаллизации при этом может достигать $8 \cdot 10^5$... $2 \cdot 10^6$ К/с.

В институте электросварки им. Е.О. Патона разработана технология и создано оборудование для получения аморфных и нанокристаллических материалов с использованием плазменно-дугового источника плавления металла методом спиннингования [34–38]. Плавка осуществляется в медном водоохлаждаемом тигле, который выполнен в виде перевернутого усеченного конуса. Такая форма позволяет обеспечить жесткость конструкции и накопление достаточного объема расплава. Слив расплава происходит через керамическое сливное сопло, которое устанавливается в донной части тигля. В качестве материала сопла используется прессованная кварцевая керамика. Закалка расплава осуществляется на медном барабане-холодильнике, который представляет собой полый цилиндр, внутрь которого заливается вода и удерживается там за счет центробежной силы при вращении. В результате вода позволяет повысить общую теплоемкость холодильника. Несмотря на то, что такая конструкция малопримодна для закалки больших объемов расплава, она проста в эксплуатации и весьма эффективна в лабораторных условиях.

Метод экстракции из расплава. Метод заключается в намораживании тонкого слоя металла на быстровращающийся охлаждаемый диск слегка погруженный в металлическую ванну. Сплав для последующей экстракции также получают в тигле из огнеупорного материала с применением индукционного источника нагрева. Процесс экстракции может осуществляться в вакууме или атмосфере инертного газа. Этот процесс отличается высокой производительностью намораживания ленты или проволоки (несколько десятков метров в секунду). При этом скорость кристаллизации достигает 10^6 ... 10^7 К/с.

Так как уровень металлической ванны в тигле находится ниже верхнего края футеровки тигля, для осуществления процесса экстракции необходимо либо подавать жидкий металл из тигля в промежуточную емкость, либо использовать тигель достаточно большого диаметра, чтобы разместить над металлической ванной вращающийся диск-кристаллизатор и исключить попадание в ванну закристаллизовавшейся на диске ленты или чешуек.

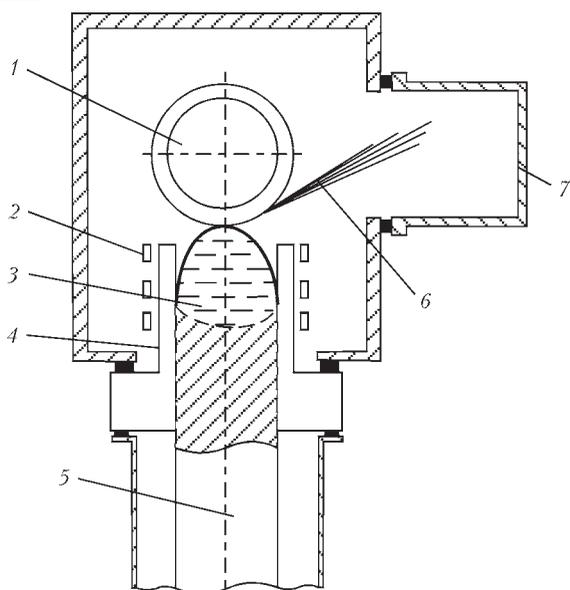


Рис. 4. Принципиальная схема процесса экстракции из расплава: 1 — диск-кристаллизатор; 2 — индуктор; 3 — металлическая ванна; 4 — секционный кристаллизатор; 5 — расходоуемая заготовка; 6 — быстрозакаленные чешушки, 7 — камера для сбора быстрозакаленных чешушек

В институте электросварки им. Е.О. Патона разработан процесс диспергирования расплава, в котором огнеупорный тигель заменен секционным охлаждаемым кристаллизатором, т.е. для приготовления расплава используется известный процесс индукционной плавки в секционном кристаллизаторе (рис. 4) [39, 40]. Совмещение индукционной плавки в секционном кристаллизаторе и сверхбыстрой кристаллизации металла позволяет исключить контакт металлического расплава с огнеупорами и, тем самым, решить вопрос получения быстрозакаленных металлических материалов из высокореакционных металлов, а также сплавов, содержащих эти металлы в качестве легирующих элементов.

Особенностью этого процесса является то, что для получения расплава и его последующего диспергирования применяется расходоуемая металлическая заготовка заданного химического состава. Заготовка вводится снизу в секционный кристаллизатор, в котором производится расплавление ее части на уровне индуктора. Образующаяся металлическая ванна опирается на нерасплавившуюся нижнюю часть заготовки. В зоне индуктора металлический расплав под действием электромагнитного поля отжимается от стенки секционного кристаллизатора и принимает куполообразную форму. При частоте тока 66 кГц и плавке сплава ВТ1-0 ванна расплава достигает максимального объема и оптимальной формы купола для процесса диспергирования. Уменьшение частоты спо-

собствует образованию конусообразной формы купола, усложняющего процесс перемешивания и, как следствие, охлаждению верхней части расплава, что негативно отражается на диспергировании. Установлено, что для обеспечения процесса диспергирования высота купола над секционным кристаллизатором должна составлять $0,2...0,3$ диаметра кристаллизатора, т.е. около 10...18 мм. Повышение высоты выпуклого мениска приводит к пространственной неустойчивости положения купола, нарушающей процесс диспергирования. Минимальная высота купола, при которой заканчивается процесс диспергирования, составляет $0,1$ диаметра кристаллизатора, что равняется 5...6 мм. Поскольку процесс диспергирования происходит непрерывно или циклически в зависимости от сплава, скорость подачи заготовки регулируется от 0 до 10 мм/мин [41].

Подбором электрической мощности, подводимой к индуктору, выпуклый мениск расплава можно приподнять над верхним срезом кристаллизатора и стабильно удерживать в этом положении. Вращающийся диск-кристаллизатор опускают до его касания с поверхностью мениска расплава и осуществляют диспергирование жидкого металла. Намороженный на рабочей дорожке диска тонкий слой металла под действием центробежных сил отрывается от дорожки и в виде чешуек попадает в специальный накопитель в плавильной камере установки.

Для стабильного процесса диспергирования необходимо создать модуль с вращающимся диском-холодильником, температура рабочей дорожки которого не изменялась бы в процессе диспергирования. Первые эксперименты по диспергированию металлического расплава выполняли с использованием неохлаждаемого медного диска-холодильника диаметром 170 и толщиной основания 20 мм. Из-за постоянного контакта расплава с неохлаждаемым диском время работы составляет 20...40 с. При увеличении рабочего времени происходит неконтролируемое намораживание металла на диск и он не отрывается от рабочей дорожки. Следующим этапом в развитии предложенного Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАНУ способа диспергирования были разработка и создание модуля с водоохлаждаемым диском-холодильником. Диаметр диска составлял 170, толщина — 6 мм. Применение водяного охлаждения сняло ограничения по длительности контакта диска-холодильника с металлической ванной, в результате возросла скорость



закалки металла до $10^6 \dots 10^7$ град/с. Тем не менее работоспособность модуля в целом оказалась недостаточной, поскольку через 6...8 мин работы (вращения диска) происходила разгерметизация модуля. Последующие отработки режимов диспергирования выполняли с использованием модуля, имеющего газовое охлаждение. Данный модуль состоит из медного диска-холодильника, на котором с двух сторон выполнены концентрические выступы в виде цилиндров. Диск жестко закреплен на валу, который в свою очередь через муфту связан с валом электродвигателя постоянного тока. Цилиндрические концентрические выступы диска входят в соответствующие пазы, выполненные в неподвижных охлаждаемых элементах. Между цилиндрическими выступами диска-холодильника и пазами в неподвижных охлаждаемых элементах есть конструктивные зазоры размером не более 1 мм, которые позволяют диску-холодильнику свободно вращаться в охлаждаемых элементах. Охлаждаемые боковые элементы жестко закреплены на плите основы. Подвод и отвод воды к элементам происходят с помощью водяной магистрали. Для интенсификации охлаждения диска-холодильника во время диспергирования расплава в зазоры между цилиндрическими выступами диска и соответствующими пазами элементов производится подача инертного газа.

Метод диспергирования сочетает в себе высокую скорость закалки, относительную простоту оборудования, высокую производительность и возможность диспергирования высокорепакционных расплавов. Однако на сегодняшний момент не полностью исследовано затвердевание чешуек в процессе экстракции из расплава. Важнейшим фактором получения аморфной структуры является теплообмен между расплавом металла и вращающимся диском-холодильником. Оптимизация формы и геометрических размеров диска-холодильника является следующим этапом модернизации модуля диспергирования. Выбор этих параметров диска-холодильника должен увеличить скорость закалки и увеличить стабильность технологического процесса диспергирования.

Выводы

1. Аморфные металлы благодаря уникальным, в основном электромагнитным свойствам, нашли применение в промышленности в качестве электрических датчиков и сердечников трансформаторов. Перспективным является применение аморфных материалов в постоянных магнитах.

2. На сегодняшний момент разработано большое количество методов получения аморфных материалов. В зависимости от метода можно получать материалы в виде порошка, лент, проволоки, чешуек. Методы распыления ограничены в применении из-за невысокой скорости охлаждения. В промышленности применяются методы закалки из расплава. Среди них особое внимание заслуживает метод диспергирования из секционного кристаллизатора, в котором отсутствует контакт расплава с тиглем, что дает возможность диспергировать высокорепакционные материалы. Недостатком метода является невысокая скорость закалки. Оптимизация формы и геометрических размеров диска-холодильника позволит устранить этот недостаток.

1. Кекало И.Б. Атомная структура аморфных сплавов и ее эволюция. — М.: Высш. шк., 2006. — 340 с.
2. Жукова Л.А. Строение и свойства двойных металлических сплавов в жидком и аморфном состояниях. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 74 с.
3. Белащенко Д.К. Структура жидких и аморфных металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 192 с.
4. Татарникова Л.И. Структура твердых аморфных и жидких веществ. — М.: Наука, 1983. — 151 с.
5. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. — М.: Металлургия, 1987. — 328 с.
6. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. — М.: Высш. шк., 1980. — 221 с.
7. Рябов А.В., Окишев К.Ю. Новые металлические материалы и способы их производства. Уч. пособие. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. — 64 с.
8. Верещагин М.Н., Горанский Г.Г., Кукарко В.А. Строение и триботехнические свойства аморфных сплавов на основе железа и никеля при трении // Трение и износ. — 2012. — № 3. — С. 232–235.
9. Быстрозакаленные металлические сплавы / Под ред. С. Штиба, Г. Варлинга. — М.: Металлургия, 1989. — 376 с.
10. Зборицк А.М. Новые материалы в металлургии. — Донецк: ГВУЗ ДонНТУ, 2008. — 253 с.
11. Mohri K. Review on sensors and transducers / IEEE Trans. Mag. MAG-20. — 1984. — № 5. — P. 942–947.
12. Сергеев В.В., Булыгина Т.П. Магнитотвердые материалы. — М.: Энергия, 1980. — 224 с.
13. Магнитные свойства и микроструктура порошков Nd-Fe-B, полученных обработкой сплава в водороде / Н.В. Мушников, В.Б. Демин, А.М. Зеткин и др. // Физика металлов и металловедение. — 1994. — 77. — Вып. 6. — С. 53–59.
14. Ramesh R., Thomas G. Interrelationships between structure and property in magnetic materials // Mater. Sci. Eng. — 1989. — В3. — P. 435–441.
15. Croat J.J. Manufacture of Nd-Fe-B permanent magnet by rapid solidification // J. Less-Comm. metals. — 1989. — 148. — P. 7–15.
16. Wecker J., Schultz L. Coercivity after heat treatment of overquenched and optimally quenched Nd-Fe-B // J. Appl. Phys. — 1987. — № 3. — P. 990–993.
17. Croat J. J. Neodymium-iron-boron permanent magnets prepared by rapid solidification // J. Mater. Sci. Eng. — 1988. — 10. — P. 7–13.



18. *Новые материалы* / Под ред. Ю.С. Карабасова. — М.: МИСИО, 2002. — 736 с.
19. *Материаловедение. Технология конструкционных материалов* / Под ред. В.С. Чердниченко: 2-е изд., перераб. — М.: Омега-Л, 2006. — 752 с.
20. *Особенности активной прецизионной пайки изделий атомной техники быстрозакаленными припоями* / Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков и др. // Сб. докл. VI рос. конф. по реакторному материаловедению (г. Димитровград, 11–15 сентября 2000 г.) в 3-х т. — Димитровград, 2001. — Т. 3. — Ч. 2. — С. 103–114.
21. *De Christofaro N.J., Datta A. Rapidly solidified filler metals in brazing and soldering applications // Rapidly Quenched Metals.* — 1985. — P. 1715–1721.
22. *Аморфные металлические сплавы* / Под ред. Ф.Н. Любурского. — М.: Металлургия, 1987. — 584 с.
23. *Beddow J.K. The production of metal powders by atomization.* — London: Heyden, 1978. — 375 p.
24. *Sudarshan T.S., Srivatsan T.S. Rapid Solidification Technology: An Engineering Guide.* — Technomic Publishing Company, Lancaster, USA, 1993. — 725 p.
25. *Pat. 3099041 USA. Method and apparatus for making powder / A.R. Kaufmann – Publ. 30.06.1963.*
26. *Сверхбыстрая закалка жидких сплавов* / Под ред. В.Т. Борисова. — М.: Металлургия, 1986. — 375 с.
27. *Кан Р.У. Сплавы, быстрозакаленные из расплава // Физическое металловедение: Изд. 3-е в 3 т. — М.: Металлургия, 1987. — Т. 2. — С. 406–469.*
28. *Немошкаленко В.В. Аморфные металлические сплавы.* — Киев: Наук. думка, 1987. — 248 с.
29. *Золотухин И.В. Физические свойства аморфных металлических материалов.* — М.: Металлургия, 1986. — 176 с.
30. *Taylor G.F. Method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses // Physical Review.* — 1924. — 23. — P. 655–660.
31. *А.с. 61325 СССР, МКИ G 01 C 29/00. Способ изготовления металлической микропровода / А.В. Улитовский, Н.М. Аверин. — Оpubл. 19.03.64; Бюл. № 7.*
32. *А.с. 128427 СССР, МКИ H 01 B 13/06. Способ непрерывного изготовления микропровода в стеклянной изоляции / А.В. Улитовский, И.М. Маянский, А.И. Авраменко. — Оpubл. 15.05.60; Бюл. № 10.*
33. *А.с. 149138 СССР МКИ H 01 B 13/06. Способ непрерывного изготовления литых микропроводов в сплошной стеклянной изоляции / В.Г. Красиньков, Л.В. Рейман, В.В. Трояновский. — Оpubл. 05.02.65; Бюл. № 3.*
34. *Плазменно-дуговая установка для производства ленты из аморфных материалов / Г.Ф. Торхов, В.К. Грановский, Н.В. Рейда и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 2. — С. 78–80.*
35. *Получение аморфных и нанокристаллических материалов с применением плазменно-дугового нагрева / М.Л. Жадкевич, В.А. Шаповалов, Г.Ф. Торхов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 29–35.*
36. *Никитенко Ю.А. Получение быстрозакаленных сплавов при плазменно-дуговом плавлении // Там же. — 2010. — № 3. — С. 33–37.*
37. *Никитенко Ю.О. Швидкозагартований метал, отриманий при плазмово-дуговому нагріві і спінінгуванні та його структура // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. — 2006. — Вып. 4. — С. 797–801.*
38. *Influence of annealing on nanocrystal formation in Ni amorphous alloy / G.N. Kozhemyakin, V.A. Shapovalov, Yu.A. Nikitenko et al. // Crystallography Reports. — 2009. — 54, № 7. — P. 142–144.*
39. *Пат. 69514 України. МПК 8 В 22 D 27/00. Спосіб отриманих аморфних та дрібнозернистих металів / Б.С. Патон, Ю.В. Латаш, І.В. Шейко та ін. — Оpubл. 15.09.2004; Бюл. № 9.*
40. *Получение быстрозакаленных металлических материалов с применением процессов индукционной плавки в секционном кристаллизаторе / Б.Е. Патон, Ю.В. Латаш, И.В. Шейко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 2. — С. 50–55.*
41. *Шаповалов В.А., Шейко И.В., Никитенко Ю.А. Получение быстрозакаленных сплавов способом диспергирования при ИПСК // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 3. — С. 32–35.*

Analysis of properties and constitution of amorphous and fine-crystalline materials was made. Described is the method allowing to determine statistically the structure of amorphous materials. Due to unique mechanical, electrical and magnetic properties the amorphous materials are used as permanent magnets, electric sensors, magnetic cores of transformers, brazing alloy in precision brazing. A special attention is paid to the challenging technology of manufacture of permanent magnets. Technological peculiarities of methods of producing amorphous and fine-crystalline materials by using the precision metallurgy were examined. Methods of spraying, hammer and anvil, rolling of melt, surface melting by electron and laser beams, Taylor's method, spinning, extraction from melt were analyzed. Method of dispersion from melt by using induction melting in a sectional mould was investigated in detail. Alongside with positive sides this method has drawbacks, one of which is a low rate of hardening. It is predicted to level this drawback during investigation of thermal processes on a disc-cooler. 41 Ref., 4 Figures.

Key words: *amorphous metallic materials; dispersion; hardening; induction melting in a sectional mould; flake*

Поступила 15.06.2015