

Ба 209.772



БЕЛОРУССКИЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ГОСПЛАНА БССР

# ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Серия 55.09.43

В. Г. ГОРОБЦОВ, Р. И. ЕСЬМАН, А. С. КАЛИНИЧЕНКО

ПОЛУЧЕНИЕ  
И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМОΡФНЫХ  
И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Минск 1986

Ба 2097728

Белорусский научно-исследовательский институт  
научно-технической информации и технико-экономических  
исследований Госплана БССР

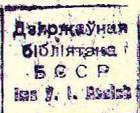
ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Серия 55.09.43

В. Г. Горобцов, Р. И. Есьман, А. С. Калиниченко

ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМОРФНЫХ  
И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Минск 1986



В обзоре дан анализ методов получения аморфных и микрокристаллических материалов, показаны формы получаемых частиц и их типичные размеры, а также рекомендованы сплавы применительно к конкретным технологическим процессам. Рассмотрены области использования новых материалов для различных отраслей промышленности, перспективы повышения эксплуатационных характеристик изделий из аморфных и микрокристаллических материалов.

Обзор представляет практический интерес для широкого круга специалистов, работающих над созданием новых конструкционных материалов, и будет способствовать реализации целевой комплексной научно-технической программы "Интенсификация".

Табл. 4. Рис. 5. Библиогр. 29.

Рецензенты:

канд. техн. наук П. А. Пархутик,

В. В. Бродко

17.06.2011

## ВВЕДЕНИЕ

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года, одобренных XXVII съездом КПСС, указывается на необходимость создания новых конструкционных материалов, а также материалов с заданными свойствами.

Наибольший интерес представляют аморфные и микрокристаллические материалы, разработка которых включена в число важнейших задач, намеченных к выполнению Комплексной научно-технической программой стран - членов СЭВ до 2000 года.

Аморфные и микрокристаллические материалы обладают уникальным сочетанием физико-механических свойств, в результате чего многие из них, в первую очередь аморфные, уже нашли применение в приборостроении, электронной и электротехнической промышленности. Анализ показывает, что значительно большие возможности для практики открывает использование микрокристаллических материалов, так как они позволяют создать изделия с повышенными эксплуатационными свойствами. В настоящее время эти материалы уже начинают применяться для создания жаропрочных, сверхпроводящих, композиционных и высокопрочных сплавов.

Аморфные и микрокристаллические материалы могут найти широкое применение в промышленности Белорусской ССР, где высоко развиты радиотехническая, электронная, приборо- и машиностроительная промышленность.

## ПОЛУЧЕНИЕ АМОРФНЫХ И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Положительное воздействие высокоскоростного охлаждения на измельчение структуры и повышение свойств отливок известно давно, однако лишь в последнее время началось изучение процессов формирования материалов при сверхвысоких скоростях охлаждения (до  $1 \cdot 10^6$  К/с) и, как следствие, свойств изделий, полученных данным методом. К отличительным особенностям процессов высокоскоростного охлаждения относятся:

большие отклонения от равновесных состояний, которые способствуют формированию новых кристаллических метастабильных фаз, а также фиксации аморфного состояния;

более равномерная и мелкозернистая микроструктура, оvoidная от сегрегационных явлений;

улучшение эксплуатационных характеристик, повышение пластичности сплавов, которые использовались ранее только в литом виде, и др.

При высоких скоростях охлаждения могут формироваться материалы с аморфной и микрокристаллической структурами (с размером микрочастиц менее 2 мкм). Причем возможность фиксации первого или второго состояния зависит как от скорости охлаждения, так и от химического состава материала. Аморфные металлические материалы — АММ ("металлические стекла") — это новый класс материалов, характеризующихся уникальным сочетанием физико-механических, коррозионных, магнитных и других свойств. "Металлические стекла" получают не только путем быстрого охлаждения жидкого металла, но и ионно-плазменным распылением, поверхностным оплавлением изделий с использованием электронных или лазерных лучей и т.д.

За рубежом процессы получения аморфных и микрокристаллических материалов объединяются термином Rapid Solidification (высокоскоростное затвердевание). Наиболее легко они осуществляются (в зависимости от химического состава) при скоростях охлаждения жидкой фазы порядка  $10^2$ – $10^{10}$  К/с. Достижение таких скоростей требует малых геометрических размеров охлаждаемого расплава хотя бы в одном направлении. Например, для скоростей охлаждения  $10^2$ ,  $10^6$  и  $10^{10}$  К/с толщина сечения не должна превышать соответственно 10,0 мм, 0,1 мм и 1,0 мкм.

Все методы получения микрокристаллических и аморфных металлургических материалов можно условно разделить на три группы:

диспергирование расплава;

создание тонкого слоя расплава на металлической теплоотводящей поверхности;

локальное оплавление рабочей поверхности изделия.

Затвердевающие металлы и сплавы в зависимости от метода и условий диспергирования могут иметь сферическую или вытянутую форму, быть в виде хлопьев или игл, непрерывных или полунепрерывных штей, плоских полосок или листов.

В технологии получения диспергированных материалов наиболее часто используются в качестве теплоотводящей среды газы или жидкости. Дробление потока расплава может осуществляться одним из следующих методов:

распылением газом (жидкостью);

центробежными методами получения мелкодисперсных частиц и порошков;

ультразвуковым диспергированием;

использованием вращающихся валков для диспергирования струи или охлаждения предварительно распыленных частиц;

распылением с помощью растворенных газов.

Образующиеся частицы могут затвердевать в ходе свободного полета, а также при последующем охлаждении жидкостью или твердой поверхностью.

Наиболее широко применяются методы распыления струи расплава потоком газа или воды (рис. 1, а). Причем струя воды и паровой поток могут использоваться только для металлов, которые затем возможно эффективно очистить от образующихся окислов. Эффективность распыления и скорость охлаждения частиц во многом определяются свойствами применяемого газа. Наиболее часто используются азот и аргон, причем азот предпочтительнее для оплавов, компоненты которых не вступают с ним в реакцию.

Распыление расплава в атмосфере водорода или гелия позволяет увеличить на порядок скорость охлаждения по сравнению с распылением в среде азота или аргона. Давление диспергирующего газа составляет 1-8 МПа при скорости истечения порядка 100-200 м/с. Размер затвердевавших частиц колеблется в широких пределах - от нескольких микрон до 0,5 мм и выше, что является существенным недостатком процесса.

В качестве теплопроводящей среды при диспергировании потока расплава часто используется струя воды под давлением 8–20 МПа, увеличивающая по сравнению с газом скорость охлаждения частиц. С применением данного способа охлаждения был получен порошковый материал из сплава  $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{40}$  с размером частиц не более 100 мкм. На основе измерения расстояний между вторичными ветвями дендритов частиц из сплава  $\text{Al}_{95}\text{Cu}_5$  было установлено, что скорость охлаждения составляла  $10^5$ – $10^6$  К/с, однако она недостаточна для получения аморфных порошковых материалов из высокотемпературных сплавов. Так, порошковый материал из сплава  $\text{Fe}_{74}\text{Si}_{15}\text{B}_{11}$  был только частично аморфен при размере частиц 15–20 мкм, сплав  $\text{Fe}_{81,5}\text{B}_{14,5}\text{Si}_4$  – почти полностью аморфен при размере частиц менее 10 мкм, сплав  $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  имел аморфную структуру при размере частиц 10–20 мкм, а частицы 20–30 мкм характеризовались значительным объемом кристаллической фазы.

В Швеции создана установка, в которой газ, применяемый для разбивания струи расплава, движется со сверхзвуковой скоростью (до 820 м/с). Истечение его происходит в пульсирующем режиме с ультразвуковой частотой около 100 кГц. Средний размер частиц порошка составляет примерно 22 мкм для алюминия и 20 мкм для меди.

Имеется ряд методов центробежного диспергирования с использованием кинетической энергии движущегося расплава, который, например, подается на вращающийся с частотой до 583 об/с диск (рис. 1,б), разбивающий струю на частицы размером не более 200 мкм. Движущиеся частицы охлаждаются потоком газа (чаще аргона или гелия).

Промышленно освоено получение алюминиевых порошков с помощью пористого тигля или вращающейся чаши, в стенке которых просверлено большое количество отверстий. Данный метод использован фирмой Reynolds Metals Co. (США) для организации непрерывного процесса. Расплавы из печи подаются во вращающуюся чашу и через отверстие в ее стенке разбрызгиваются внутри камеры. Охлаждение и кристаллизация летящих частиц (они имеют игольчатую форму, длину 1–5 мм и диаметр примерно 1 мм) происходят в воздухе. Затвердевшие частицы накапливаются в нижней части камеры и порциями подаются в нагревательную печь. После

нагрева до 673 К порошковый материал поступает на одноклетьеваый прокатный стан, где прокатывается в лист шириной 1,0 м и толщиной около 2,5 мм. При необходимости полосу можно прокатывать до меньших толщин. Несмотря на относительно невысокую скорость охлаждения частиц порошка (порядка  $10^3$  К/с) прочностные свойства изделий были заметно улучшены по сравнению с полученными из слиткового материала.

Для получения порошковых материалов, в первую очередь из тугоплавких металлов, применяется также метод с использованием вращающегося электрода (рис. 1, в). Стержень из требуемого сплава или металла — вращающийся расходуемый электрод — расплавляется водоохлаждаемым вольфрамовым электродом, лазером и т. д. Средний размер частиц определяется скоростями вращения и расплавления расходуемого электрода. Скорость охлаждения, основанная на оценке среднего размера частиц, составляет примерно  $10^3$  К/с. Несмотря на высокую стоимость процесса из-за необходимости тщательного изготовления расходуемого электрода и на высокую стоимость оборудования, данный способ нашел широкое применение для получения порошков из металлов и сплавов, которые легко загрязняются при плавке в тиглях (Ti, Zr, Nb, Ta, V).

Когда форма затвердевающих частиц не имеет большого значения, дальнейшее увеличение скорости охлаждения возможно путем подачи потока движущихся частиц или струи расплава на вращающийся валок (или другую металлическую поверхность), который постоянно охлаждается (рис. 1, г). Кинетическая энергия разбивающегося расплава используется для преодоления значительного поверхностного натяжения жидкого металла путем соударения с теплоотводящей поверхностью. При ударе формируются частицы неправильной формы тонкого сечения, скорость их охлаждения зависит от скорости движения и условий контакта. Уровень термического контакта между соударяющимися частицами и теплоотводящей поверхностью определяется, кроме скоростных характеристик, поверхностными свойствами расплава.

Разработан способ получения частиц путем диспергирования струи расплава двумя вращающимися валками, установленными в горизонтальной плоскости. Получены аморфные порошки из сплавов  $Ni_{75}Si_8B_{17}$ ,  $Co_{72,5}Si_{12,5}B_{15}$ ,  $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ . Валки диаметром 80 мм устанавливались с зазором 0,1–0,3 мм (в зависимости от

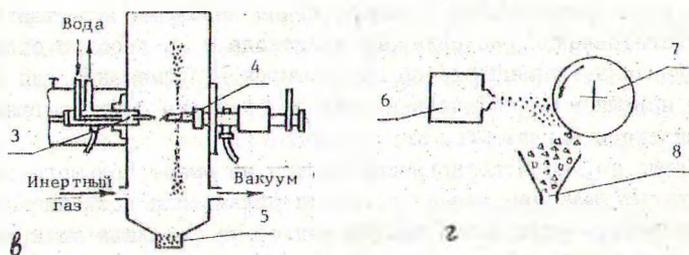
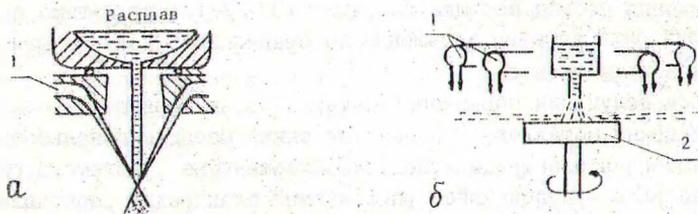


Рис. 1. Схемы получения аморфных и микрокристаллических порошков и частиц:

а - распылением потоком газа или воды; б - центробежным диспергированием; в - с использованием вращающегося электрода; г - охлаждением предварительно распыленных частиц; 1 - охлаждающий газ; 2 - вращающийся диск; 3 - фольгированный электрод; 4 - вращающийся расходуемый электрод; 5 - накопитель частиц; 6 - распылитель; 7 - вращающийся валок; 8 - бункер

требуемого размера частиц), частота их вращения была до 100 об/с. Для предотвращения затвердевания частиц на валках последние покрывались теплоизоляционной пастой. Образовавшиеся в результате разбивания частицы падали в емкость с закалочной жидкостью, установленную на расстоянии 25 мм от нижней поверхности валков.

Фирма Homogeneous Metals Co. (США) разработала процесс получения мелкодисперсных частиц, в котором расплав в атмосфере аргона насыщается под давлением водородом. Затем часть расплава впрыскивается в вакуумную камеру, где растворенный водород практически мгновенно разрывает жидкий металл на мельчайшие частицы, характеризующиеся неокисленной поверхностью. Скорость охлаждения затвердевающих частиц в данном процессе не превышает  $10^2$  К/с.

Сравнительные характеристики некоторых процессов получения аморфных и микрокристаллических порошков приведены в табл. I.

Таблица I

Характеристики процессов распыления

Распыление	Средний размер частиц, мкм	Типичная скорость охлаждения, К/с	Металлы и сплавы на их основе
Газовое (дозвуковое)	50-100	$10^2-10^3$	Чувствительные к окислению металлы (Ti, Zr, Al и др.)
Водой	75-200	$10^2-10^4$	Сплавы на основе Fe, Cu, Ag
Сверхзвуковое газовое	10-50	До $10^6$	Al, возможно Ti, Zr и др.
Центробежное на диске	25-80	$10^5$	Al, Ni
Вращающимися электродами	125-200	$10^2$	Fe, Ti, U, Zr, Nb, V
Вращающимися валками	200 (хлопья)	$10^5-10^6$	Al
Вращающимися перфорированным тиглем	1000-5000 (длина) 1000 (диаметр)	$10^1$	Низкотемпературные сплавы на основе Al, Mg
Растворенными газами	20-100	$10^1-10^2$	Al

Из аморфных и микрокристаллических порошков, полученных вышеописанными методами, в дальнейшем изготавливаются детали различного назначения по традиционной для порошковой металлургии технологии.

Разработаны и используются методы получения изделий типа проволоки или ленты закалкой металла из жидкого состояния. Особенностью непрерывных процессов является обеспечение стабильной струи жидкого металла для устойчивого процесса литья.

В настоящее время в основном применяются следующие непрерывные процессы закалки металла из жидкого состояния: одновалковое литье тонких лент и полосок; двухвалковое литье; экстракция из расплава (рис. 2).

В процессе литья на вращающийся валок должна непрерывно подаваться стабильная струя расплава. Получаемое изделие обычно имеет вид тонкой ленты (толщина 10-100 мкм) шириной до 150 мм. Скорость вращения валка, изготовленного чаще всего из меди, превышает 20 м/с. Для получения изделия в виде тонкой нити расплав должен под постоянным давлением вытекать стабильной струей диаметром примерно 1 мм на вращающийся валок и может дополнительно охлаждаться водой. Скорость охлаждения колеблется в пределах  $10^4$ - $10^7$  К/с.

В разработанном фирмой Allied Chemical (США) процессе используются два валка, что увеличивает скорость охлаждения ленты по сравнению с охлаждением на одном валке и одновременно позволяет избежать усадочных дефектов.

Экстракция из расплава осуществляется погруженным в него быстровращающимся медным диском. Поверхность валка гладкая для получения проволоки и нити или рифленая для получения иглообразных частиц длиной до 5-8 мм.

В описанных способах получения аморфных и микрокристаллических изделий для достижения скорости охлаждения расплава  $10^5$  К/с и выше применяются металлические теплоотводящие поверхности.

Важное значение придается вопросам компактирования порошков. Так, фирма Imperial Glucite Inc. (США) разработала процесс прямой прокатки порошковых материалов для получения одно- или многослойной ленты. В процессе использовались сплавы марок IN9021; X7091; Ti - 6% Al - 4% V; Ti - 6% Al - 25% N - 4% Zr -

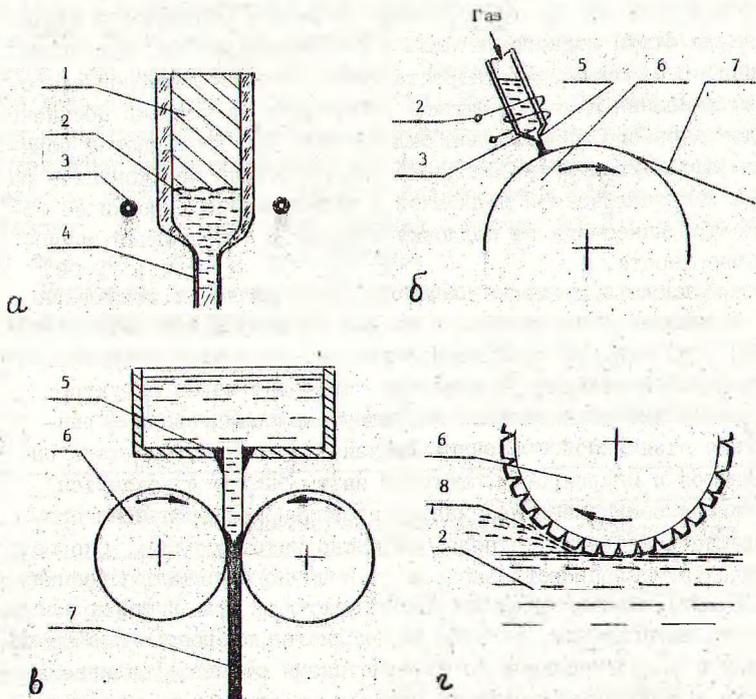


Рис. 2. Схемы процессов заливки металла из жидкого состояния:  
 а - получение микропровода, в стеклянной оболочке; б - литье тонких лент на валке; в - литье лент между двумя валками; г - экстракция из расплава;  
 1 - заготовка; 2 - распыл; 3 - индуктор; 4 - микропровод в оболочке; 5 - сопло; 6 - вращающийся валок; 7 - лента; 8 - закаленные частицы или нити

2% Mo, композиционный материал SiC/Al и др. При прокатке создавалась инертная атмосфера или вакуум. Механические свойства изделий были выше, чем при других процессах формования.

Все непрерывные способы получения аморфных и микрокристаллических материалов и изделий (см. рис.2) характеризуются ограниченным временем контакта охлаждающегося расплава с теплоотводящей средой. Поэтому перегрев и удельный расход расплава, температура охлаждающей среды оказывают значительное влияние на стабильность процесса. При очень высоких температурах рас-

плава и ватка, при большом расходе расплава наблюдается дестабилизация струи жидкого металла и разбивание ее на отдельные частицы. В связи с этим скорость литья, равная линейной скорости вытягивания изделия, должна выбираться из условий обеспечения достаточного времени для охлаждения. Это достигается повышением эффективного коэффициента теплопередачи при контакте расплава с металлической подложкой в результате полировки ее поверхности, нанесения на подложку серебра и непрерывной зачистки поверхности.

Особенностью процесса Taylor (США) является охлаждение струи расплава хладагентом, т.е. без использования металлической подложки. По этой технологии металлический стержень, заключенный в стеклянную оболочку, проходит через индуктор, где происходит расплавление металлической сердцевинки и размягчение стеклянной оболочки. Будучи пластичным, стержень вытягивается в микропровод, который затем быстро охлаждается. Стеклянная оболочка обеспечивает стабильность процесса, предотвращает окисление металла, ее можно затем удалить. Скорость охлаждения микропровода зависит от конечного диаметра (обычно 50–100 мкм), теплофизических характеристик охлаждающей среды и скорости вытягивания, которая определяется скоростью плавления металла и реологическими характеристиками стекла. Разливаемые металлы должны быть химически инертны по отношению к стеклянной оболочке.

Для поверхностного упрочнения деталей путем получения аморфной или микрокристаллической структуры, резко повышающей эксплуатационные свойства, расплавляют тонкий слой поверхности кратковременным импульсом большой мощности. Теплота от расплавленного слоя практически мгновенно отводится нерасплавленным объемом изделия, в результате чего создаются предпосылки для формирования аморфного состояния поверхностного слоя. Подвод импульса большой удельной мощности осуществляется с использованием лазерного или электронного излучения. Глубина расплавленного слоя контролируется тепловой нагрузкой на единицу поверхности и скоростью перемещения луча по этой поверхности. Процесс может использоваться как для оплавления поверхности, так и для поверхностного легирования. Недостатком метода электронно-лучевой закалки является необходимость создания вакуума.

Процесс с использованием лазерной энергии не требует особых условий. Часть энергии лазерного излучения теряется из-за отражения, что снижает КПД установки. Плотность энергии, создаваемой лазерным потоком, достигает 100 кВт/см<sup>2</sup>. Глубина слоя плавления выбирается из условия обеспечения достаточной скорости охлаждения для фиксации аморфного состояния и зависит от свойств металла или сплава. Для железа и никеля она составляет 18-108 мкм, для кремния - обычно 200 Å, а для сплава  $Pd_{90,7}Cu_{4,2}Si_{5,1}$  - до 400 мкм.

Некоторые характеристики процессов получения образцов толщиной 10 мкм из сплавов на основе Al, Fe и Ni приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Теплофизические параметры быстрой закалки сплавов  
на основе Al, Fe и Ni без переохлаждения

Показатель	Метод	
	Литье на вращающийся валок	Локальное оплавление и самозакалка
Коэффициент теплопередачи, Вт/м <sup>2</sup> ·К.....	10 <sup>6</sup>	10 <sup>9</sup>
Максимальная скорость охлаждения в расплаве, К/с.....	2,5·10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>
Максимальная скорость продвижения фронта кристаллизации, м/с	0,60-0,75	1,50-2,30 (для Al) 0,35-0,65 (для Fe)

Таким образом, методы закалки из расплава с высокими скоростями охлаждения позволяют значительно расширить область сложных сплавов, которые могут быть получены без химической неоднородности и с микрокристаллической (в пределе с аморфной) структурой. В зависимости от разливаемых сплавов, требуемой производительности, формы литых изделий и заданного уровня скорости охлаждения можно из имеющихся выбрать метод, наиболее отвечающий поставленной задаче.

В табл. 3 приведены некоторые характеристики процессов закалки металла из жидкого состояния.

Таблица 3

Характеристики процессов закалки металла  
из жидкого состояния

Метод	Форма изделия	Средний размер, мкм	Типичная скорость охлаждения, К/с	Металлы и сплавы на их основе
Taylor	Микропро-вод	20-100 (диаметр)	$10^3-10^5$	Сплавы, инертные к материалу оболочки
Литье на один валок	Ленты, полосы	10-100 (толщина)	$10^5-10^7$	Сплавы на основе черных и цветных металлов
Литье на два вала	Ленты, полосы	20-100 (толщина)	$10^5-10^8$	То же
Экстракция из расплава	Ленты, проволока, частицы	20-1000 (толщина), 3000-5000 (длина)	$10^5-10^6$	"

ПРИМЕНЕНИЕ АМОРФНЫХ И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ

Развитие процессов получения аморфных и микрокристаллических материалов способствовало созданию промышленных технологий, использующих эти материалы для конструирования изделий с повышенными характеристиками. Широкие исследования по созданию и применению новых материалов проводятся как в СССР, так и за рубежом. Для нужд приборостроительной, электронной, электротехнической отраслей народного хозяйства нашей страны получены аморфные сплавы 71КР, 10НСР, 71КНС. Проведены исследования по производству изделий из быстроохлаждаемых порошков сплава Р6М6, нержавеющей стали.

Анализ применения новых материалов в народном хозяйстве СССР показывает их преимущество перед стандартными по многим технологическим характеристикам и открывает перспективы создания изделий с высокими эксплуатационными свойствами. Сочетание высоких физико-механических свойств (твердость, корро-

зионная стойкость, прочность, пластичность и др.) таких материалов способствовало расширению диапазона практического их применения. Основные области использования разрабатываемых аморфных и микрокристаллических материалов относятся к созданию высокопрочных конструкционных материалов, инструментальных и высокотемпературных сплавов, электрических, магнитных и других материалов.

Электромагнитные материалы. Различают магнитно-мягкие и магнитно-твердые материалы. Основными требованиями, предъявляемыми к магнитно-мягким материалам, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях, являются высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила и малые потери при перемагничивании. Для кристаллических магнитных материалов типичные значения магнитного насыщения составляют 0,2–1,6 Тл, максимальная проницаемость –  $10^3$ – $10^6$ , а коэрцитивная сила – 0,8–8 А/м.

Анализ показывает, что аморфные металлические материалы по сравнению с традиционными имеют значительно меньшую петлю гистерезиса. Это свидетельствует о том, что у них более высокая проницаемость и меньшая коэрцитивная сила. Для большинства АММ коэрцитивная сила близка к 1 А/м, а магнитное насыщение составляет 0,5–1,8 Тл. При этом необходимо учитывать, что магнитные свойства лучших прецизионных кристаллических сплавов получены после сложной предварительной обработки (литья, прокатки иликовки, термической, термомеханической, магнитной обработки), т.е. традиционных операций. Методы литья, использующие вращающиеся валки, позволяют за счет эффекта скоростного затвердевания получать непосредственно из расплава ферромагнитные аморфные материалы в виде непрерывных лент со свойствами, не уступающими пермаллоюм (с соотношением Ni:Fe = 5:1). При этом экономится относительно дорогостоящий никель. Удельные потери энергии в сердечниках трансформаторов составляет примерно 30% при использовании АММ по сравнению с текстурованными железокремниевыми листовыми сплавами.

Высокое электрическое сопротивление аморфных металлических материалов сравнимо с такими кристаллическими сплавами, как нихром, что позволяет использовать их в качестве прецизионных резисторов, высокопрочных низкотемпературных нагреватель-

ных элементов или низкотемпературных термометров, стойких к релаксации. АММ на основе сплавов Pd-Cr-Si и Ti-Zr-Be были предложены для термометрических целей. Плохая обрабатываемость обычных резисторных сплавов на основе Fe-Cr-Al ограничивает добавки Cr и Al соответственно не более 15 и 6 ат.%. Более высокое удельное сопротивление получено для ленты из сплава Fe - 30 ат.% Cr - 15 ат.% Al, имеющего микрокристаллическую структуру. Данный сплав обладает высокой прочностью и хорошей пластичностью. Равномерность поверхностной эмиссии АММ предполагает возможность их применения в качестве электронных источников в электронно-оптических приборах. Радиационная стойкость сверхпроводниковых аморфных металлических материалов позволяет потенциально использовать их в больших сверхпроводящих магнитах для термоядерного синтеза.

Впервые переплетенная лента шириной 2 м из сплава Fe-Ni-P-V была применена для магнитных экранов электронных устройств. Ее преимущество по сравнению с пермаллоем заключалось в получении сложной формы без ухудшения свойств. Ограниченная экранирующая эффективность сплава Fe-Ni-P-V была улучшена путем использования более дорогих кобальтовых АММ с более высокой начальной проницаемостью и нулевой магнитоотрицательностью.

Сочетание высокой проницаемости, сопротивления коррозии и износу обусловили применение АММ в воспроизводяще-записывающих головках. Высокая плотность потока намагничивания и износоустойчивость улучшают качество записи. Срок службы головок по сравнению с обычными кристаллическими ферритами, пермаллоями увеличивается и зависит от шероховатости поверхности АММ.

Наилучшие результаты получены при разливке сплава  $Co_{70,5}Fe_{4,5}Si_{15}B_{10}$  в вакууме. Шероховатость поверхности характеризовалась  $Ra = 0,3$  мкм и  $Rz = 1$  мкм.

АММ применяются также в устройствах электрозащиты, трансформаторах тока, датчиках температур или усилий, акустических задерживающих линиях и т.д.

Коррозионно-стойкие и каталитические материалы. Высокая коррозионная стойкость АММ, содержащих хром и фосфор, создает предпосылки для широкого применения этих материалов в морской среде (кабели морских самолетов, торпедные корпуса), для химических и биомедицинских целей (химические фильтры, реакционные емкости, электроды, скальпели и т.д.). Использование АММ на основе железа в качестве фильтра, характеризующегося коррозионной стойкостью, высокой твердостью и высокой магнитной индуктивностью, дало возможность увеличить выход продукта (частиц гидроокиси железа) в 3 раза по сравнению с обычным фильтром из нержавеющей стали. Процесс быстрого затвердевания позволил улучшить коррозионную стойкость сплава, применяемого в зубопротезной технике (Ag-Sn-Cu), за счет более высокого уровня содержания меди. Кроме того, более высокие прочность и пластичность материала были достигнуты резким уменьшением величины микротрепа.

Изделия, полученные экотрузией из сплава Al - 6-8% Fe с добавками хрома, марганца и магния, имели сопротивление к коррозии в морской воде выше, чем сплавы систем Al-Mn и Al-Mg. В сочетании с лучшей термпрочностью, теплопроводностью и невысокой стоимостью по сравнению с медно-никелевыми сплавами это позволяет применять аморфные сплавы (Al-Fe) для конденсаторов и теплообменников на заводах по обессоливанию морской воды.

Стойкость к окислению и коррозии нержавеющей сталей обычного химического состава была увеличена использованием процесса быстрого затвердевания, который позволил резко уменьшить размеры неметаллических включений и зерен матрицы. Повышение коррозионной стойкости изделий из нержавеющей стали и алюминиевой бронзы достигается также путем поверхностной обработки лазером.

Активно исследуются каталитические возможности материалов, полученных закалкой из расплава. АММ в виде лент сплава Fe-Ni-P(-B) на 2 порядка более эффективны по сравнению с катализатором такого же состава в кристаллической форме при гидрировании окиси углерода для получения углеводородов.

Поверхностно-активные АММ на основе палладия обладают такими же, а иногда и более высокими свойствами, чем платина.

Палладиевые АММ показали высокую электрокаталитическую активность при электролизе  $\text{NaCl}$ .

Улучшенные каталитические свойства характерны не только для АММ, но и для микрокристаллических материалов. Например, активированный микрокристаллический порошковый материал  $\text{Al} - (30-50 \text{ ат.}\%) \text{ Ni}$ , полученный в процессе быстрого затвердевания, более эффективен в каталитических процессах гидрирования ряда органических веществ, чем такие же сплавы в обычной литой форме.

Высокопрочные алюминиевые сплавы. Использование процессов скоростного затвердевания следует считать одним из важных путей решения проблемы улучшения прочностных свойств алюминиевых сплавов. Это обусловлено тем, что по сравнению с улучшением свойств литых материалов путем повышения чистоты исходных материалов процесс скоростного затвердевания позволяет получать изделия из  $\text{Al}$ -сплавов при наличии большого количества примесей, в первую очередь железа и кремния, без ухудшения их прочностных свойств (рис. 3).

Сравнение физико-механических свойств обычных литых изделий и из быстрозакаленных материалов (табл. 4) показало преимущество нового сплава  $\text{In9021-T4}$  перед литым  $7075-T73$  (типа В95) по механическим и эксплуатационным свойствам. Сплав  $\text{In9052}$  характеризуется более высокой скоростью роста усталостных трещин, чем сплав  $7075-T73$ .

Сравнение слиткового сплава  $2219 (\text{Al} - 6,3\% \text{ Cu} - 0,3\% \text{ Mn} - 0,2\% \text{ Zr})$  и порошкового ( $\text{Al} - 5,5\% \text{ Cu} - 0,35\% \text{ Mg} - 0,3\% \text{ Mn}$ ) показало увеличение предела прочности от 405 до 525 МПа, предела текучести - от 300 до 456 МПа. Удлинение возросло с 10 до 30%. Термообработка, применявшаяся для порошкового материала, включала выдержку при температуре 800 К в течение 2 ч, охлаждение и последующее старение при 350 К в течение 4 ч.

Увеличение объема переходных металлов в алюминиевой матрице повышает модуль упругости для сплава  $\text{Al} - 16\% \text{ Mn}$  (значение его выше 100 МПа) при некотором росте удельной плотности. Для чистого алюминия и обычных деформируемых сплавов модуль упругости равен примерно 70 МПа. Добавление лития снижает плотность сплава на 3% при одновременном повышении модуля упругости на 6% на каждый процент лития (до 4%  $\text{Li}$ ). Поэтому

Бд 209772

$\sigma_0$ , МПа

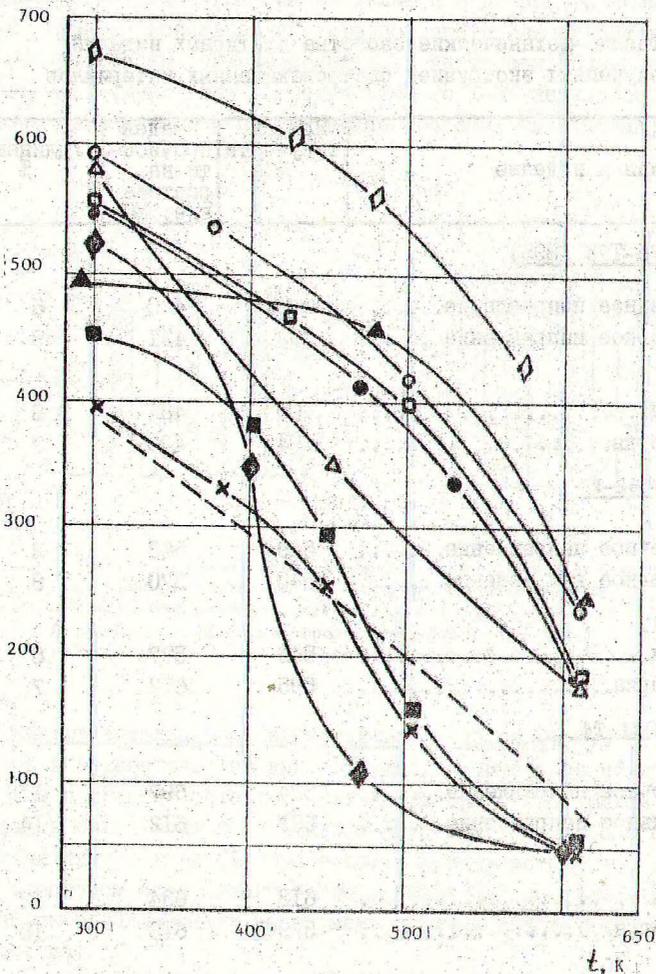


Рис. 3. Изменение предела прочности алюминиевых сплавов от температуры:

- - 7075-16; --- 2219; -x- 2618; - - 2024-Т31 полоса;
- - Al - 8% Fe; --- Al - 11,6% Fe - 1,4% Cr; - - Al - 8% Fe - 3,4% Ce;
- o- Al - 8% Fe - 1% Zr; - - Al - 8% Fe - 2% Mo;
- - Al - 6% Cr - 1% Fe

Таблица 4

Физико-механические свойства слитковых изделий  
и полученных экструзией быстрозакаленных материалов

Сплав и изделие	Предел текучести МПа	Предел прочности на растяжение. МПа	Удлинение, %
<u>Сплав 7075-T73 (B95)</u>			
Образец:			
поперечное направление.....	342	420	5
продольное направление.....	392	431	9
Лонжерон:			
фланец.....	409	484	8
переборка.....	404	426	7
<u>Сплав IN9052-F</u>			
Образец:			
поперечное направление.....	549	568	2
продольное направление.....	540	570	8
Лонжерон:			
фланец.....	542	577	8
переборка.....	595	612	7
<u>Сплав IN9021-T4</u>			
Образец:			
поперечное направление.....	584	597	11
продольное направление.....	591	612	14
Лонжерон:			
фланец.....	613	634	12
переборка.....	579	616	15

процессы создания алюминиевых сплавов с добавками лития находят- ся в стадии исследований. Процесс экструзии порошков, полу- ченных скоростным затвердеванием, в частности сплава системы Al-Si-Mg (-лп или -zr), содержащего I-3% лития, обеспечил лучшие прочностные и пластические свойства материала (рис. 4).

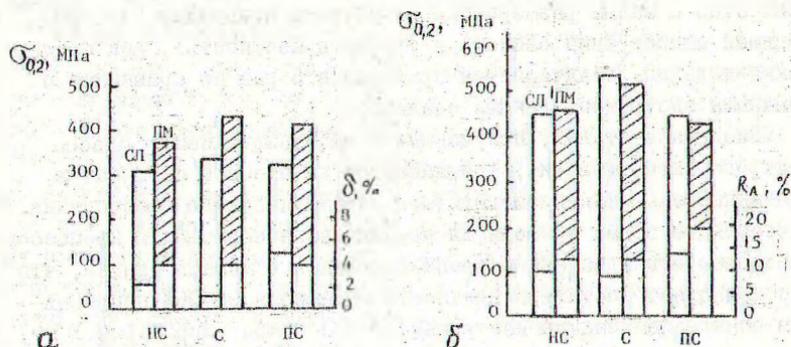


Рис. 4. Зависимость предела текучести  $\sigma_{0.2}$  и пластической деформации ( $\delta$ ) слитковых /СП/ и порошковых /ПМ/ изделий для различных режимов старения сплавов Al-Li-Mn /а/ и Al-Si-Li /б/: NS - ниже предела прочности, С - при пределе прочности, ПС - перестаревший режим

Инструментальные и подшипниковые материалы. Эти материалы сложны в обработке, так как содержат значительное количество твердых и крупных эвтектических карбидов, образующихся в результате сегрегации и остающихся слоистыми даже после сильного обжатия при горячей обработке. К преимуществам, обеспечиваемым процессом скоростного затвердевания при получении аморфных и микрокристаллических инструментальных и подшипниковых сталей, относятся:

устранение больших обжатий при горячей обработке, что требовалось для преодоления наследственности литой структуры;

улучшение обрабатываемость в отожженном состоянии и шлифуемость (благодаря отсутствию грубых карбидов, которые увеличивают сопротивление абразивному износу), особенно для высоколегированных сталей;

улучшенная обрабатываемость в горячем состоянии, что позволяет увеличить содержание углерода и легирующих добавок;

большая стойкость в ходе термообработки, что дает возможность проводить данный процесс до более высокой твердости без нежелательных корослений или появления трещин.

Равномерное распределение дисперсных карбидных включений совместно с малым размером зерна матрицы позволяет достичь меньшей анизотропии свойств и улучшить жесткость. Срок службы таких изделий увеличивается примерно в 5 раз по сравнению с обычными инструментальными сталями.

Внедрение сталей, полученных с использованием процесса быстрого затвердевания, сдерживается их высокой стоимостью, связанной с применением горячего изостатического прессования. В настоящее время проводятся исследования совмещения процессов быстрого затвердевания и компактирования. Имеются данные, что это позволяет достигать плотности материала 96–98% непрерывным осаждением капель инструментальной стали (диаметром 1 мм) на движущийся водоохлаждаемый коллектор. Скорость охлаждения достигает  $10^6$  К/с.

При использовании в качестве исходного материала аморфной полосы или ленты сначала проводится ее термообработка, при которой образуется микрокристаллическая структура, затем осуществляют измельчение, компактирование с использованием горячего изостатического прессования или экструзии. Полученное изделие характеризуется равномерной микрокристаллической структурой, в которой размер частиц боридов или карбидов составляет примерно 0,15 мкм, что способствует стабилизации структуры.

Применение горячего изостатического прессования требует материалов с повышенными эксплуатационными свойствами: термостойкостью и твердостью при 423 К, коррозионной стойкостью при 973 К и хорошей ударной вязкостью при 813 К. Такой материал имеет химический состав, близкий к составу быстрорежущей стали М2, но с добавкой 1,1% В и с содержанием углерода 0,85%. Дальнейшее повышение стойкости материалов к износу осуществляется введением карбидов и боридов в тонкую расплавленную зону на поверхности изделия путем плазменного наплавления или поверхностным легированием при заливке. Значительное повышение сопротивления износу достигнуто лазерной и электро-лучевой обработкой поверхности.

Жаростойкие сплавы. Процесс скоростного затвердевания значительно повышает свойства, включая малоцикловую усталостную прочность, литых или деформируемых сплавов - Astroloy, IN100, Rene 95. Прочность этих сплавов, полученных скоростным затвердеванием, выше, чем самого прочного сплава Waspaloy, применяемого в настоящее время для получения турбинных дисков.

Примером успешного использования преимуществ скоростного затвердевания является никелевый сплав Rene 95, полученный газовым распылением. Это усовершенствованный высокопрочный сплав, содержащий примерно 45% высокотемпературной  $\gamma$ -фазы. Изделия из него практически невозможно получить традиционными методами из-за значительной сепрегации. Анализ структур частиц, полученных распылением, показал, что расстояние между вторичными ветвями дендритов составляло менее 100 мкм. Использование при распылении гелия позволило повысить скорость охлаждения частиц, в результате чего частицы размером менее 20 мкм были частично аморфными.

Существенным моментом является устранение сетки карбидов на поверхности частиц и захват атомов аргона или вольфрама в процессе электронно-лучевого распыления. Изготовление турбинных лопаток на основе Ni - 17% Al (с добавками 9-10% Mo или Cr) с использованием процесса скоростного затвердевания увеличило температуру эксплуатации на 85 °C (рис. 5). При добавках Mo и Cr существенно повысилась стойкость к окислению и сопротивление ползучести (оно сравнимо со сплавом MAR M200 (Ni - 10% Cr - 10% Co - 13% W - 1% Nb - 2% Ti - 5% Al+Hf)).

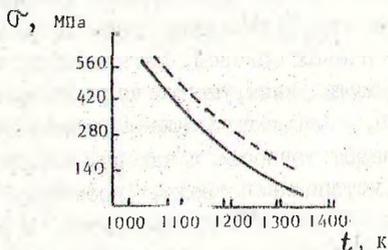


Рис. 5. Зависимость напряжения, давшего 1% деформации ползучести за 1000 ч, от температуры:  
— MAR M200 + Hf; --- диспергированный сплав RSR 185

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМОРФНЫХ И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В БЕЛОРУССИИ

Наличие в Белорусской ССР высокоразвитых электронной, электротехнической, приборо- и машиностроительной и других отраслей промышленности способствует развитию работ по получению и применению аморфных и микрокристаллических материалов для нужд республики. Работы ведутся в направлении получения быстрозакаленных порошков и частиц, их компактирования, получения лент и полос методами закалки металла из жидкого состояния, поверхностного упрочнения изделий.

Наиболее широкие и интенсивные исследования проводятся в Белорусском республиканском научно-производственном объединении порошковой металлургии, Академии наук БССР, Белорусском политехническом институте. В настоящее время накоплен определенный опыт получения и использования новых материалов.

Проведены исследования по переработке вторичных цветных сплавов с применением высоких скоростей охлаждения (порядка  $10^3$ – $10^4$  К/с). Эти сплавы, имеющие повышенное содержания нежелательных примесей (железо, кремний и др.), характеризуются мелкодисперсным строением, свободным от грубых включений кремния и интерметаллидов. Изделия, полученные из переработанных вторичных алюминиевых сплавов, почти не уступают по свойствам изделиям из первичных сплавов, что позволяет экономить дефицитные цветные материалы.

Создана установка для получения частиц толщиной 10–300 мкм со скоростями охлаждения до  $10^6$  К/с методом диспергирования двумя вращающимися валками. Проведены опыты по разливке быстро-режущих сталей, алюминиевых сплавов, магнитоабразивных материалов. Показано, что режущий инструмент, изготовленный из быстрозакаленных материалов, обладает улучшенными эксплуатационными свойствами, что повышает точность и чистоту обрабатываемых деталей. Разработанная установка позволяет проводить разливку как в среде воздуха, так и в среде инертных газов. В результате возможно получение, например, алюминиевых распыленных материалов с высоким уровнем легирующих элементов, в том числе высокотемпературных, которые в обычных процессах распыления

могут сильно окислиться из-за требуемых высоких температур. Газливались и специальные сплавы, которые были успешно испытаны для магнитообразивной обработки. Установка может послужить прототипом промышленного агрегата по производству дисперсных материалов на строящихся мощностях.

Белорусским республиканским ЦПО порошковой металлургии проводятся успешные исследования по компактированию аморфных материалов с использованием энергии взрыва. Быстротечность импульсного метода компактирования обеспечивает сохранность в получаемом изделии аморфной структуры исходного материала. Проведенные работы подтвердили экономическую целесообразность процесса импульсного компактирования. В то же время необходимо отметить, что и другие методы компактирования могут оказаться полезными для расширения номенклатуры получаемых изделий.

Построены математические модели процесса охлаждения расплава при его закалке, разработаны программы, позволяющие определить взаимосвязи между условиями процесса литья и возможностями аморфизации сплава, что открывает пути управления процессом получения аморфных и микрокристаллических материалов, а также его оптимизацию.

Создана установка для непрерывного получения лент толщиной от 0,5 до 3,0 мм (в основном из цветных сплавов) с использованием эффекта закалки из жидкого состояния. Она обеспечивает переработку как первичных, так и вторичных сплавов. При этом требуются небольшие капитальные вложения при довольно высокой удельной производительности. Механические свойства проката, полученного из этих лент, на 10-20% выше традиционного получаемого.

В настоящее время проводятся исследования по получению аморфных и микрокристаллических материалов методом сплинигования (закалкой из жидкого состояния на одном вращающемся валке). Получаемые материалы в виде лент могут быть использованы для изготовления ткани, трубок путем сплетения, укладки их параллельно или ортогонально, подобно кирпичам, или по спирали. В таком виде аморфные металлические материалы применяются в электротехнической промышленности для производства кабелей и кабельных обмоток, в машиностроении - для валов, передающих крутящий момент, передаточных ремней, маховиков.

Значительный интерес для электротехнической промышленности Белоруссии представляет использования ферромагнитных аморфных материалов в сердечниках трансформаторов. При этом производственная стоимость изделий снижается, одновременно уменьшаются гистерезисные потери.

Учитывая, что в Белоруссии развита химическая промышленность, представляет интерес применение хромосодержащих аморфных материалов, обладающих высокой коррозионной стойкостью, для химических фильтров, реакторов и других узлов химического машиностроения, подверженных воздействию агрессивных сред. В электронной и приборостроительной отраслях аморфные материалы могут использоваться для изготовления усилителей, блоков памяти, записывающих головок, датчиков, а также для экранирования.

Кроме получения аморфных и микрокристаллических материалов методами диспергирования и закалки из жидкого состояния в БССР проводятся работы по поверхностному упрочнению деталей и изделий с применением лазеров, а также методом ионной имплантации. Использование лазеров позволяет проводить не только поверхностное упрочнение деталей за счет создания аморфного слоя, но и поверхностное легирование, что дополнительно повышает эксплуатационные свойства изделий. Проводятся исследования по дальнейшему расширению номенклатуры обрабатываемых деталей и повышению качества упрочненного слоя.

Учитывая необходимость и перспективы развития в Белорусской ССР производственных мощностей по получению аморфных и микрокристаллических материалов, Белорусскому республиканскому НИО порошковой металлургии, Академии наук БССР, Белорусскому политехническому институту следует интенсифицировать и скоординировать усилия по усовершенствованию уже имеющихся установок (в первую очередь по повышению их производительности), а также продолжать работы по созданию новых высокоэффективных установок высокоскоростного литья.

АН БССР имеет лазерные установки, поэтому возможно внедрение академических разработок в производство для поверхностной обработки ответственных и тяжело нагруженных деталей и агрегатов.

Разработки белорусских ученых могут и должны найти широкое применение на предприятиях республики, например, на Грод-

пенском заводе "Радиоприбор", Краснокамском электроламповом заводе, в ЛПО "Горизонт", Минском производственном объединении вычислительной техники, на Горьковском заводе "Автогидроусилитель" и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение высокоскоростной закалки из жидкого состояния позволит создавать изделия с улучшенными эксплуатационными характеристиками при одновременном повышении экономических показателей за счет сокращения количества операций, т. е. укорочения технологического цикла. При этом представляется возможным получение изделий со специально заданными свойствами, что нельзя сделать методами традиционной технологии.

Аморфные и микрокристаллические материалы уже нашли довольно широкое применение в нашей стране и за рубежом. Высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила и малые потери при перемагничивании создают предпосылки для их широкого использования в электронно-оптических приборах, устройствах электрозащиты, трансформаторах и т. д. Повышенная коррозионная стойкость позволяет применять эти материалы в качестве химических фильтров, для облучивки реакционных емкостей, электролизеров. Аморфные и микрокристаллические инструментальные материалы получают в основном с использованием дорогостоящей операции горячего изостатического формования, однако их применение по сравнению с литыми обеспечивает улучшенную механическую обрабатываемость. Алюминиевые высокопрочные сплавы позволяют изготавливать крыльчатки для ветряных станций, механические передаточные ремни и другие изделия, испытывающие циклические нагрузки.

Рассмотренные методы получения аморфных и микрокристаллических материалов могут найти применение при изготовлении деталей ответственного назначения на ряде предприятий Белоруссии, что позволит повысить эффективность производства изделий, сэкономить дорогостоящие и дефицитные материалы, уменьшить мощность используемого оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

Аморфные металлические материалы. - М.: Наука, 1984. - 160 с.

Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. - М.: Металлургия, 1982. - 168 с.

Завваге S.J., Фроев P.H. Production of Rapidly Solidified Metals and Alloys//Journal of Metals.- 1984.- V. 36.- 4.- P. 20-33.

Гронт M.J. Rapid Solidification of Metallic Particulates//Journal of Metals. - 1983.- V. 35.-1.- P. 20-27.

Phase Transformations in Crystalline and Amorphous Alloys// Ed. B.L.Mordike.- Deutsche Gesellschaft für Metallkunde E.V., 1983.- 266 с.

Ияһи Н., Нака М., Масумото Т. Amorphous Metallic Powder Prepared by Roller Atomization//Rapidly Quenched Metals IV, The Japan Institute of Metals, Sendai.- 1982.- P. 35-38.

Моллер P.R. The Rationale for Continuous Casting of Finished Products//Journal of Metals.- 1982.- V. 34.- 3.- P. 57-62.

Сохен М., Кеар В.Н., Мехрабиан R. Rapid Solidification Processing - an Outlook//Rapid Solidification Processing: Principles and Technology II, Claitor's Publ. Div., Baton Rouge, La., 1980.- P. 1-24.

Морди́ке B.H., Бергма́н H.W. Structure of Laser-Melted Steel Surfaces//Rapidly Quenched Metals IV, The Japan Institute of Metals, Sendai, 1982.- P. 197-200.

M e h r a b i a n R. Rapid Solidification//International Metals Reviews.- 1982.- V. 27.- 4.- P. 185-208.

B r e i n a n E.M., S n o w D.B., B r o w n C.O., K e s r B.H. New Developments in Laser Surface Melting Using Continuous Prealloyed Powder Feed//Rapid Solidification Processing: Principles and Technologies II, Claitor's Publ., Baton Rouge, La., 1980.- P. 440-452.

L i e b e r m a n n H., W a l t e r J. Rapid Solidification of Metastable Materials//Rapidly Solidified Amorphous and Crystalline Alloys., Elsevier Science Publ. Co., Inc., 1982.- P. 111-122.

C o h e n M. Rapid Solidification Processing and the Control of Structure/Property Relation Ships//Speciality Steels and Hard Materials, Pretoria, Pergamon Press Ltd., 1983.- P. 1-22.

G l a s s y M e t a l s I//Eds. H.-J. Güntherodt, H. Back.- Springer-Verlag, Berlin, 1981.

J o n e s H. Rapid Solidification of Metals and Alloys.- London, The Institution of Metallurgists, Monograph N 8, 1982.- 86 p.

R o b e r t s o n J.M., B r o u h a M. Surface Quality and Thickness Effects of Amorphous Ribbons for Recording Head Applications//Rapidly Quenched Metals V.- Würzburg, 1984.- A 146.

C o c k e D.L. Catalysis by Amorphous Materials//Rapidly Quenched Metals V.- Würzburg, 1984.- J 145.

S c h l ö g l R. Application of Metallic Glasses in Heterogeneous Catalysis//Rapidly Quenched Metals V.- Würzburg, 1984.- N 36.

M i l l e n P.P. Jr. Applications of High-Temperature Powder Metal Aluminium Alloys to Small Gas Turbines//Journal of Metals.- 1983.- V. 35.- 3.- P. 76-81.

R o s e n s t e i n A.H. A Review of US Air Force Research Related to Airframe and Engine Materials//Journal of Metals.- 1982.- V. 34.- 3.- P. 14-23.

A d a m C.M. Structure/Property Relationships and Applications of Rapidly Solidified Aluminium Alloys//Rapidly Solidified

dified Amorphous and Crystalline Alloys, Elsevier Science Publ. Co., Inc., 1982.- P. 411-422.

G y s l e r A., C r o o k s R., S t a r k e E.A., I r. A Comparison of Microstructure and Tensile Properties of P/M and I/M Al-Li-X Alloys//Aluminium - Lithium Alloys, The Metallurgical Society of AIME, 1981.- P. 263-291.

R o s e n s t e i n A.H. Highlights of US Air Force Metallurgical Research Programs//Journal of Metals.- 1983.- V. 35.-3.- P. 64-73.

E r i c h D.L., D o n a c h i e S.J. Benefits of Mechanically Alloyed Aluminium//Metal Progress.- 1982.- 2.- P. 22-25.

L i s a g o r W.B., S t e i n B.A. Advanced Powder Metallurgy Aluminium Alloys and Composites//Advanced Materials Technology, NASA, Langly Research Center, Hampton, Virg.- 1982.- P. 183-200.

B a l m u t h E.S., S c h m i d t R. A Perspective on the Development of Aluminium - Lithium Alloys//Aluminium - Lithium Alloys, The Metallurgical Society of AIME, 1981.- P. 69-88.

R o D.H., T o a z M.W., M o x s o n V.S. The Direct Powder - Rolling Process for Production Thin Metal Strip//Journal of Metals.- 1983.- V. 35.- 1.- P. 34-39.

Amorphous Metallic Alloys//Ed. F.E.Luborsky.- Butterworths Monographies in Materials, 1983.

L e e M.C. Formation of Metallic and Metallic - Glass Hollow Spheres and its Application//Rapidly Quenched Metals V.- Würzburg, 1984.- A 160.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Получение аморфных и микрокристаллических материалов.....	4
Применение аморфных и микрокристаллических материалов.....	14
Использование аморфных и микрокристаллических материалов в Белоруссии.....	27
Заключение.....	27
Литература.....	28

Валерий Георгиевич Горобцов,  
Руслан Иосифович Есьман,  
Александр Сергеевич Калиниченко

ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
АМОРФНЫХ И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Спецредактор Н. В. Мулева  
Редактор Т. М. Овчаренко

Техн. редактор Л. М. Максименко      Корректор Е. Л. Мальникова

Подписано к печати 05.08.86.    АТ 07433.    Формат 60x84 1/16.

Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,86.    Уч.-изд. л. 1,43. Тираж 260 экз.

Заказ 1751.    Цена 30 к.

БелНИИТИ. 220676. Минск, пр. Машерова, 7

ИПП БелНИИТИ. 220004, Минск, пр. Машерова, 23