

АМОРФНЫЕ ПРИПОИ — ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПАЙКИ (ОБЗОР)

В. Ф. ХОРУНОВ, д-р техн. наук, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены различные методы получения сплавов в аморфном и нанокристаллическом состояниях. Показано, что главное преимущество аморфных припоев состоит в том, что их получают в виде тонких пластичных фольг, которые можно использовать в виде закладных элементов любой формы для изготовления уникальных конструкций, в первую очередь, в авиакосмической технике и атомной энергетике. Высокая химическая однородность аморфных припоев, узкий интервал плавления обеспечивают хорошее смачивание паяемой поверхности, уменьшение вероятности образования непропаев и хрупких фаз и, таким образом, обеспечивают высокую прочность паяных соединений.

Ключевые слова: пайка, припой, аморфные, наноструктурные сплавы, фольга, структура, интерметаллид, прочность, пластичность

К наноструктурным материалам относятся такие металлы и сплавы, у которых один или несколько структурных параметров (например, величина кристаллического зерна или отдельные фазы, толщина слоя в многослойных покрытиях) имеют размер от долей до 100 нм. Традиционные дисперсно-упрочненные или дисперсионно-упрочняемые сплавы, в структуре которых содержатся очень мелкие частицы, но по объему они занимают всего 5...10 %, не относятся к наноматериалам [1–3].

Созданию теории и практики получения сплавов в аморфном состоянии посвящено много работ [4–22]. Установлено, что получать припой в таком виде можно следующими путями: при затверждении из жидкой или газообразной фазы, химическом или электрохимическом осаждении, различных внешних воздействиях на структуру кристаллического твердого тела (например, воздействием интенсивной пластической деформации). Перечисленные выше способы позволяют получать аморфные металлические материалы в виде фольг, лент, пленок, покрытий, порошков, волокон. Способ сверхбыстрой закалки путем осаждения на подложку из газообразного состояния позволяет формировать некристаллическое состояние даже для составов, не поддающихся аморфизации при закалке из расплава. Следует отметить, что полученные таким образом покрытия и пленки обладают меньшей плотностью, чем у материала, закаленного из расплава. Кроме того, для этого способа требуется очень сложное и дорогое оборудование [7]. Отмеченные особенности обуславливают определенные ограничения при практическом применении. Аморфные материалы, полученные физическим и химическим осаждением, отличаются по структуре от материалов такого же состава, полученных сверхбыстрой закалкой из жидкого состояния. Припой, полученные сверхбыстрой за-

калкой расплава, могут быть в аморфном или мелкокристаллическом (в том числе и нанокристаллическом) состоянии. Для производства припоев в аморфном состоянии наиболее широко применяется метод быстрого ($10^4...10^6$ К/с) затверждения расплава на внешней поверхности быстро-вращающегося диска-холодильника [23, 24]. Жидкий металл под давлением инертного газа проходит через сопло и попадает на внешнюю поверхность вращающегося диска, где затвердевает в виде тонкой ленты, которая снимается с диска благодаря центробежным силам.

Нагрев исходного материала при спиннинговании может осуществляться с помощью высокочастотного, резистивного, электродугового, плазменного и других методов нагрева. Чаще используют высокочастотный нагрев. Он позволяет значительно ускорить процесс нагрева и увеличить производительность, а также способствует лучшему перемешиванию расплава и химической однородности получаемых фольг. Однако при этом сложнее регулировать температуру расплава в заданных узких пределах.

Особые требования предъявляются к материалу диска-холодильника, чистоте обработки его поверхности и биению. Материал диска определяет скорость теплоотвода, адгезию расплава и теплопередачу от него к охладителю. Как правило, используют медные или бронзовые диски. Биение диска не должно превышать 0,01 мм, рабочая поверхность не должна иметь рисок и царапин и обрабатывается до 7-го класса. Иногда на рабочую поверхность диска наносят тонкое покрытие, например, из сульфида молибдена [25].

Для изготовления тиглей используют плавильный кварц, оксидные (на основе Al_2O_3 , ZrO_2 , BeO и др.) или бескислородные (BN , AlN , BCN , Si_3N_4 и др.) керамические материалы. Кварцевые тигли удобны в работе, но стойкие лишь до температуры примерно 1500 °С и могут взаимодействовать со многими расплавами при более низких температурах, чем предел термостойкости [7]. Тигли на основе оксида алюминия работают при более вы-



соких температурах ($>1700\text{ }^{\circ}\text{C}$) и совместимы с большинством технических сплавов, но очень чувствительны к резкому перепаду температур. Для повышения термостойкости керамические тигли покрывают кремнийорганическими соединениями или плавным SiO_2 .

На качество аморфных фольг большое влияние оказывают не только перечисленные выше особенности, но и другие технологические параметры процесса спиннингования. К ним относятся температура жидкого металла, сечение сопла, скорость вращения диска, расстояние между диском и соплом, состав и давление окружающей газовой среды, время контакта охлаждаемого расплава с поверхностью диска, угол встречи капилляра с ободом диска. Необходимый перегрев жидкого металла перед выливом уменьшает скорость охлаждения и в то же время уменьшает вязкость и поверхностное натяжение жидкого металла, в результате чего получается более тонкая аморфная фольга [7]. Определение оптимальной величины перегрева (выше температуры плавления сплава) играет важную роль при получении аморфных материалов. При получении сплавов на основе никеля используют перегрев порядка 75... 100, на основе железа, кобальта и никеля — 30... 200, для сплавов системы железо-бор — 100... 450 $^{\circ}\text{C}$.

Метод спиннингования расплава на внешней цилиндрической поверхности диска применяют в Институте металлофизики и Институте проблем материаловедения НАН Украины для получения быстрозакаленных лент в аморфном и микрокристаллическом состоянии [7]. Этот же метод используют авторы работы [23] для получения аморфных и микрокристаллических припоев в виде гибких пластичных лент толщиной 20... 100 мкм и шириной до 50 мм из труднодеформируемых хрупких сплавов.

Главное преимущество аморфных припоев состоит в том, что они, будучи изготовленными из хрупких материалов, пластичны, т. е. им можно придать любую необходимую форму. Кроме того, эти припои легко дозировать, так как они имеют вид тонких фольг, что дает возможность расположить небольшое количество припоя на поверхности большой протяженности. В этих припоях отсутствует сегрегация элементов, возникающая при охлаждении слитка. Использование хрупких припоев в порошковой форме, как это делалось до появления аморфных сплавов, создает трудности их равномерного размещения на большой поверхности, удаления связки при нагреве в вакууме, возникновение в отдельных точках большой концентрации припоя при крупных фракциях и значительное увеличение оксидов при мелких фракциях. Отмеченное не отрицает применение порошковых припоев вообще, например, в виде паст.

Получение аморфных припоев — крупный успех ученых-материаловедов, оказавший влияние на развитие многих отраслей промышленности. Аморфные припои сделали переворот в пайке, обеспечив возможность создания уникальных конструкций в первую очередь в авиакосмической технике, атомной энергетике, при производстве твердосплавного инструмента. В качестве примера можно

привести такие конструкции, как сотовые панели, компактные пластинчато-ребристые теплообменники из различных материалов (нержавеющих сталей, титановых сплавов, тугоплавких металлов и т. д.). Можно априори утверждать, что наличие технологии производства аморфных сплавов является одним из показателей технического уровня страны в целом.

Поскольку подобные изделия изготавливаются в основном из нержавеющей сталей и титановых сплавов, большая часть исследований была посвящена получению аморфных припоев для пайки этих материалов [11–24, 26–34]. Отечественными и американскими учеными наиболее хорошо изучены сплавы системы Ni–Cr–Si–B [11–24]. Такие стандартные припои, как BNi-1, BNi-2, ВПр-11 легко аморфизируются с получением фольг толщиной 0,025... 0,05 мм. Содержание бора в них не менее 2,5 %.

В США припои с бором и кремнием (BNi-1, BNi-2, BNi-3, BNi-4) появились еще во время Второй мировой войны, в период бурного развития авиации. Тогда не ставился вопрос об аморфизации припоев или получении их в нанокристаллическом состоянии. Они были хрупкие и широко применялись как порошковые припои.

Паяные швы, полученные с применением припоев BNi-2, BNi-3, BNi-4, состоят из трех фаз [18]: γ -твердого раствора на основе никеля, прилегающего к основному металлу, и расположенных в центре паяного шва боридов никеля и эвтектики, состоящей из силицидов и боридов никеля. Хрупкие фазы, расположенные в центре шва, определяют хрупкость соединения в целом, и развитие трещин происходит по этим фазам. Слои γ -Ni, эффективно задерживающий развитие трещин, с повышением температуры пайки и времени выдержки увеличивается за счет других фаз в результате диффузии бора в основной металл. При достаточно больших значениях температуры и времени выдержки паяный шов состоит только из γ -Ni. Эти превращения осуществляются тем быстрее, чем меньше толщина паяного шва. Существенно уменьшить толщину шва позволяет применение припоев в виде тонких аморфных лент [20, 35, 36]. Так, уменьшение толщины фольги припоя 81,2Ni–7,7Cr–4,1B–3,5Si–6,5Fe с 0,125 до 0,025 мм позволяет повысить прочность соединения со 100 до 230 МПа. Кроме малой толщины припоя играет роль то обстоятельство, что фольга расположена непосредственно в зазоре и припою нет необходимости заполнять зазор под действием капиллярных сил, как это происходит при расположении его рядом с зазором.

В 1981 г. фирма «Allied Corporation» (США) получила патент на гомогенную пластичную фольгу припоя толщиной 0,025... 0,06 мм, в которой были охвачены возможные варианты припоев с депрессантами бором, кремнием, фосфором, мас. %: 0... 19B, 0... 12 Si, 0... 22 P, 0... 4 Fe, 0... 21 Cr, Ni — основа. Следует подчеркнуть, что любой из перечисленных элементов в конкретном сплаве может отсутствовать. В рамках этого патента фирма

Таблица 1. Химический состав и интервал плавления аморфных припоев на основе никеля

Марка припоя	Массовая доля элементов, %							Температура (°С) плавления $T_{пл}$ и пайки $T_{п}$, вид припоя
	Cr	Si	B	P	Fe	C	Другие элементы	
MBF 10/10A	13...15	4...5	2,75...3,5	—	4...5	< 0,06	—	970...1040 (фольга)
MBF 15/15A	12...14	4...5	2,5...3,2	—	3,5...5	< 0,03	—	— (фольга)
MBF 30/30A	—	4...5	2,75...3,5	—	≤ 0,5	0,06	—	980...1040 (фольга)
MBF 80/80A	14,5...16	—	3,17...4,2	—	—	< 0,06	—	$T_{п} = 1175$ (лента)
СТЕМЕТ 1301	7	4,6	3,1	—	3	—	—	$T_{пл} = 980$, $T_{п} = 1010...1177$ (лента)
СТЕМЕТ 1311	0,4	4	4	—	5	—	16Co	$T_{пл} = 985$, $T_{п} = 1020...1050$
MBF-50	19	7,3	1,5	—	—	—	—	
MBF-51	15	7,25	1,4	—	—	—	—	1030...1126
ВПр 11	14...16	4...5	1,8...3,2	—	3...5	0,3...1,0	0,1...1Al	980...1050
ВПр 24	6...7	2,5...3,0	0,2...0,3	—	—	—	1 Ti; 10...12 Nb; 8,5...9,5 W; 1,6...2,0 Mo; 4...5 Al	1150...1190, $T_{п} = 1200...1220$ (порошок)
ВПр 27 (Ni-Cr-Al-B)	—	—	—	—	—	—	—	1030...1080, $T_{п} = 1150...1200$, аморфная лента
ВПр 42 (Ni-Cr-Si-B)	—	—	—	—	—	—	—	1050...1070 (порошок, паста, аморфная лента)

«Allied Corporation» предложила ряд сплавов для получения их в аморфном состоянии [14–17]. Они включают сплавы с высоким содержанием бора, кремния, хрома и железа (MBF 10/10A, MBF 15/15A, табл. 1), сплав без хрома (MBF 30/30A) и сплав с высоким содержанием бора и хрома без железа и кремния (MBF 80/80A).

В работе [21] исследована термическая стабильность аморфного припоя BNi-2 методами внутреннего трения, просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, дифференциального термического анализа. Установлено, что кристаллизация начинается с гомогенного зарождения кристаллов твердого раствора на основе никеля, имеющих значительное количество дефектов, на которых впоследствии выделяются интерметаллидные фазы и бориды. Завершается процесс кристаллизации устранением дефектов, исчезновением метастабильных фаз и формированием границ зерен с малой степенью искривленности. Результаты многолетних исследований в этой области приведены в работе [11]. Подчеркивается, что в течение пайки при высокой температуре бор активно диффундирует в нержавеющую сталь, прилегающую к шву, и формирует боридные фазы по границам зерен. Большое количество фаз снижает усталостную прочность и коррозионную стойкость стали. Кроме того, большое количество бора приводит к большой эрозии тонких элементов сотовых панелей и пластинчато-ребристых теплообменников.

С учетом отмеченного выше, авторы работы [11] предлагают сплав на основе припоя BNi-5 (MBF-50, табл. 1), где снижено содержание бора до 1,5%. Предложенный авторами сплав системы Ni-15Cr-7,25Si-1,4B (MBF-51, табл. 1) позволяет

получить аморфную фольгу толщиной 0,05...0,06 мм при ширине до 200 мм, что явилось огромным достижением. Авторами работы [11] подробно исследованы свойства соединений после сложных режимов термообработки и достигнуты удовлетворительные свойства паяных соединений. Однако даже после оптимальной термообработки по границам зерен основного металла, прилегающего к шву, обнаруживаются бориды.

Тем не менее, аморфные припои обеспечивают более высокие свойства паяных соединений, чем порошковые, и могут заменять остродефицитные золото-никелевые припои. В работе [37] исследованы свойства соединений из нержавеющей стали AISI 410, полученных с помощью припоев систем Ni-82Au и Ni-Cr-Si-B (типа BNi-1, BNi-2 и BNi-3). Последние применяли в виде фольги толщиной 0,036 мм. Образцы паяли в вакуумной печи, после пайки их подвергали термической обработке путем аустенизации при температуре 982 °С с последующей закалкой в азоте и отпуском при температуре 565 °С. Сравнивали результаты механических испытаний (сопротивления на срез при температуре 538 °С), пластичности, исследовали коррозионные свойства в парах 10%-го раствора NaCl в H₂O при температуре 538 °С в течение 336 ч. Все образцы при прочностных испытаниях разрушались по основному металлу. Показано, что деформация образцов при угле скручивания 90° не приводит к образованию трещин при использовании золото-содержащего припоя и BNi-1. Соединения, полученные с помощью припоя BNi, характеризуются менее интенсивной питтинговой коррозией основного металла относительно соединений, полученных с помощью припоев системы Ni-82Au. На-



Таблица 2. Припой для пайки сплавов на основе титана и их свойства

Марка припоя	Состав, мас. %	Температура пайки, °С	Температура плавления, °С	
			солидус	ликвидус
TiBraze 375	Ti-37,5Zr-15Cu-10Ni	850...880	825	835
TiBraze 240	Ti-24Zr-16Cu-16Ni-0,5Mo	890...920	835	850
TiBraze 260	Ti-26Zr-14Cu-14Ni-0,5Mo	880...920	840	860
TiBraze 200	Ti-20Zr-20Cu-20Ni	870...900	848	856
TiBraze 15-15	Ti-15Cu-15Ni	980...1050	902	950
TiBraze 15-25	Ti-15Cu-25Ni	930...950	901	915
TiBraze70Ag	Ag-27Cu-(4-5)Ti	850...900	780	800
СТЕМЕТ 1201	Ti-12Ni-12Zr-24Cu	900...1000	830	955
СТЕМЕТ 1202	Ti-12Ni-12Zr-22Cu-1,5Be-0,8V	850...950	748	857
СТЕМЕТ 1203	Ti-50Cu	1000...1050	950	990
СТЕМЕТ 1204	Cu-28Ti	1000...1100	—	875
СТЕМЕТ 1406	Zr-11Ti-14Ni-13Cu	900	770	833
СТЕМЕТ 1409	Zr-11Ti-14Ni-12Cu-2Nb-1,5Be	750...859	685	767
ВПр16	Ti-(22-24)Cu-(8,5-9,5)Ni-(12-13,5)Zr	920...970	880	890
ВПр28	Ti-16,5Cu-15,5Ni-23Zr	850...870	830	840

именной коррозионной стойкостью характеризуются соединения, полученные с помощью припоев, в которых содержание хрома меньше 6 % или отсутствует.

Для пайки титана и его сплавов применяется большое количество припоев, например, серебряных, алюминиевых, титановых. В то же время нужно отметить, что в последние годы на мировом рынке преобладают припои на основе титана. В США это в основном система Ti-Cu-Ni в различном виде (быстрокаленном, прокатанном или порошковым), в странах СНГ — система Ti-Zr-Cu-Ni также в различном виде. Все эти сплавы (табл. 2) по составу близки к эвтектическим и обеспечивают хорошие механические свойства и коррозионную стойкость паяных соединений. Наиболее приемлемыми для пайки тонкостенных конструкций являются припои системы Ti-Zr-Cu-Ni, которые обладают малой эрозионной активностью по отношению к основному металлу.

Во второй половине 1970-х годов в ИМЕТ им. А. А. Байкова были начаты исследования по разработке научных основ создания аморфных сплавов на основе черных, цветных и редких металлов, не содержащих элементов аморфизаторов-неметаллов (бора, фосфора, кремния и др.). Было создано оборудование для производства аморфных металлических сплавов в вакууме и инертной атмосфере, разработаны новые аморфные сплавы на основе легких, тугоплавких, в том числе химически активных металлов. При изучении склонности сплавов к аморфизации принимался во внимание определенный комплекс физико-химических параметров, характеризующих индивидуальные свойства исходных компонентов сплава (размерные соотношения атомных радиусов и положение в периодической системе Д. И. Менделеева), характер их взаимодействия в данной системе, а также расчет термодинамических параметров и температуры стеклования [22, 32]. Установлена связь между

склонностью сплавов к объемной аморфизации, их химическими свойствами и диаграммами состояния. Установлено, что объемно-аморфизирующиеся сплавы можно получить в эвтектических системах, в которых при медленном затвердевании расплава велика вероятность образования двух, трех и большего количества интерметаллических фаз со сложной кристаллической структурой типа Франка — Каспера, например σ - или μ -фазы, фазы Лавеса, а также тройных интерметаллидов (при наличии нонвариантных превращений) наряду с образованием указанных выше двойных интерметаллидов. К числу металлических объемно-аморфизирующихся сплавов относятся сплавы системы Ti-Cu-Ni, Ti-Zr-Cu-Ni, Zr-Ti-Ni, Cu-Zr-Ti и др. Так, в сплаве Ti10-Zr40-Cu50 удалось получить ленты толщиной более 1,5 мм и стержни диаметром до 4 мм с аморфной структурой. Высокая способность этих сплавов к объемной аморфизации обусловлена взаимодействием двойных интерметаллических соединений TiCu, Zr₂Cu, ZrCu_{3,6} и ZrCu с тройной фазой Лавеса TiZrCu₄ [22].

В последние годы отмечено дальнейшее исследование сплавов этой серии. Так, разработаны припои системы Zr-Ti-Cu-Ni-Mg [33, 38], которые имеют низкую критическую скорость охлаждения ($10^3...10^4$ К/мин), что позволяет получать с помощью литья полосу шириной 2...20 мм и плоскую проволоку шириной 0,8...2 мм при толщине 0,15...0,3 мм с аморфной структурой. Сравнительно низкая температура плавления (805...825 °С) и сходный с титаном и цирконием коэффициент линейного расширения обеспечивают образование паяного соединения без остаточных напряжений и химической неоднородности, а также имеющее прочность, пластичность, вакуумную плотность и коррозионную стойкость, подобные основному металлу. Лента выдерживает до десяти перегибов и обеспечивает высокие свойства паяных соеди-

нений: сопротивление срезу 330 МПа, ударная вязкость 60 Дж/см² [38]. Отмечается [39, 40], что аморфные припои на основе титана и циркония позволяют производить пайку при температуре ниже температуры α - β -превращения (880 °С), когда полностью сохраняется мелкодисперсная структура основного металла. Некоторое дополнительное снижение температуры пайки припоями на основе системы Ti-Zr-Cu-Ni достигнуто путем легирования бериллием (СТЕМЕТ 1202 и 1409) [34].

Авторы работы [26] отмечают, что при закалке металлических расплавов со скоростями 10⁴...10⁶ м/с фиксируется состояние пересыщенного твердого раствора с соответствующей концентрацией элементов в расплаве. Благодаря быстрому охлаждению однородного расплава в закристаллизованном сплаве формируется аморфная или нанокристаллическая структура с гомогенным по объему распределением легирующих элементов.

Высокая химическая однородность припоя обеспечивает узкий интервал плавления и равномерное плавление припоя по объему, хорошее смачивание поверхности и высокую капиллярную активность припоя, а также высокую диффузионную активность компонентов. Это обуславливает равномерное распределение компонентов в зоне пайки, уменьшает вероятность образования как непропаев, так и хрупких фаз, и в итоге обеспечивает оптимальную прочность соединений и их высокую коррозионную стойкость. В классическом понимании зона пайки отсутствует, а имеется узкая зона, обогащенная компонентами припоя, что представляет собой гомогенный сплав переходного состава [26].

Работ, посвященных разработке аморфных припоев на основе меди, заметно меньше, чем на основе никеля и титана, но успехи в этом отношении значительны.

В 1981 г. фирмой «Allied Corporation» [41] для применения в качестве припоя для пайки деталей из меди и ее сплавов предложена гомогенная пластичная стекломаталлическая фольга следующего состава (ат. %): 5...10 Ni, 15...20 P, Cu — основа. Наиболее технологичный состав фольги (мас. %): 9...11 Ni, 17...19 P, Cu — основа. Толщина фольги 0,025...0,625 мм. Температура солидуса сплава примерно 630, ликвидуса 680...814 °С в зависимости от состава. В 1985 г. той же фирмой предложен состав на основе меди [42], содержащий (ат. %): 10...52 Ni, 2...10 Sn, 10...15 P, Cu — остальное при соблюдении условия 85...90 % (Cu + Ni + Sn). Температура ликвидуса сплавов 645...863, солидуса 610...825 °С. Аморфная структура получается при сверхбыстрой закалке со скоростью более 10⁵ °С/с на поверхность охлаждаемого барабана, вращающегося с большой скоростью.

В работе [43] исследовали физические, технологические и механические характеристики припоев MBF 2002P (78Cu-10Ni-4Sn-8P) (мас. %) и MBF 2005P (77Cu-6Ni-10Sn-7P) (мас. %) в виде полос фольги толщиной 0,025 мм и шириной 25...50 мм, полученной способом кристаллизации струи расплава на вращающийся медный валок

для достижения скорости охлаждения 10⁶ °С/с и получения аморфной структуры припоя. Температурные интервалы плавления этих припоев соответственно равны 610...645 и 585...647 °С. Припои могут успешно использоваться взамен серебряных. Они дешевле и не содержат токсичного кадмия. Главными областями их применения является производство теплообменников, электрических контактов, медных изделий. Смачиваемость и растекаемость этих припоев лучше, чем у припоев VAg-1 (~40 % Ag) и VCuP-5. Прочностные свойства соединений из меди, паяных этими припоями (временное сопротивление разрыву, прочность на срез, ударная вязкость), такие же или лучше, чем у соединений с припоями VAg-1 и VCuP-5. Количество никеля и скандия в них не ухудшает прочностные характеристики соединений и не повышает эрозионную активность припоев. Оптимальное количество никеля в этих припоях составляет 6 %.

В работе [44] измерено электросопротивление паяных соединений Cu-Cu, полученных с использованием традиционных серебряных припоев VAg-1 (45Ag15Cu16Zn24Cd), VAg-4 (40Ag30Cu25Zn5Ni) и VCuP-5 (15Ag80Cu5P), а также аморфных припоев на основе меди MET-GLAS серии 2002 (78Cu10Ni4Sn8P) и 2005 (77Cu6Ni10Sn7P). Пайку производили в атмосфере азота при температуре, на 100 °С превышающей температуру ликвидуса сплава, время пайки составляло 16 мин. Электропроводность соединений, паянных аморфными сплавами и припоями с высоким содержанием серебра, имеют близкие значения.

Приведенные выше данные свидетельствуют, что аморфные и нанокристаллические припои перспективны для применения во многих отраслях промышленности, поэтому целесообразно продолжить исследования в этом направлении.

1. Андриевский Р. А., Глезер А. М. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. 1. Особенности структуры. Термодинамика. Фазовые равновесия. Кинетические явления // Физика металлов и металловедение. — 1999. — № 1. — С. 50-73.
2. Андриевский Р. А. Направления современных исследований в области наночастиц // Порошк. металлургия. — 2003. — № 11/12. — С. 96-101.
3. Носкова Н. И. Структура, прочность и пластичность нанокристаллических и аморфных материалов // Физика металлов и металловедение. — 1998. — № 2. — С. 101-116.
4. Ковнеристый Ю. К. Аморфные стеклообразные металлические материалы. — М.: Наука, 1992. — 190 с.
5. Аморфные металлические сплавы / Ф. Е. Люборский, Х. А. Дэвис, Х. Х. Либерман и др. / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1987. — 582 с.
6. Аморфные металлические материалы / Под ред. А. И. Манохина. — М.: Наука, 1984. — 156 с.
7. Аморфные металлические сплавы / В. В. Немощкаленко, А. В. Романов, А. Г. Ильинский и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 248 с.
8. Шпак А. П., Куницкий Ю. А., Лысов В. И. Кластерные и наноструктурные материалы. — Т. 2. — Киев: Академперіодика, 2002. — 540 с.
9. Куницкий Ю. А., Коржик В. Н., Борисов Ю. С. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике. — Киев: Техника, 1988. — 198 с.
10. Ковнеристый Ю. К., Оситов Э. К., Трофимова У. А. Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов. — М.: Наука, 1983. — 145 с.
11. Rabinkin A., Wenski E., Ribaud A. Brazing stainless steel using a new MBF-series of Ni-Cr-B-Si amorphous brazing foils // Welding J. — 1998. — № 2. — P. 66-75.

12. Wittke K. Loeten mit «Amorphen» Loeten // Schweisstechnik. — 1986. — **36**, № 3. — S. 97, 100–102.
13. Szwieczek D., Tyrlík-Held J. Application of amorphous ductile tapes of nickel based alloys in brazing processes // Zvaranie-Svarovani (Welding). — 1999. — **48**, № 1. — P. 3–5.
14. METGLASS MBF 10/10A (metallic-glass brazing alloy) // Alloy Digest. — 1981. — № 7–9.
15. METGLASS MBF 15/15A (metallic-glass brazing alloy) // Ibid. — 1983. — № 7.
16. METGLASS MBF 30/30A (metallic-glass brazing alloy) // Ibid. — 1981. — № 11–12.
17. METGLASS MBF 80/80A (metallic-glass brazing alloy) // Ibid. — 1983. — № 5–6.
18. Johnson R. The use of TETIG diagrams in high temperature brazing // Welding J. — 1981. — **60**, № 10. — P. 185–193.
19. Amorphous foils — a natural for jet tailpipe brazing // Ibid. — 1983. — **62**, № 10. — P. 57–58.
20. Pat. 4314661 USA. Homogeneous ductile brazing foils / N. J. De Cristofaro, P. Sexton (Allied Corp.). — Заявл. 09.04.81. — Оpubл. 09.02.82.
21. Cieslak L., Poloczek T., Griner S. Thermal stability of amorphous BNi-2 alloy // Arch. hutn. — 1986. — **31**, № 3. — P. 439–455.
22. Ковнеристый Ю. К. Объемно-аморфизующиеся металлические сплавы. — М.: Наука, 1999. — 80 с.
23. Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки. Опыт разработки технологии производства и применения / Б. А. Калинин, В. Т. Федотов, О. Н. Севрюков и др. // Свароч. пр-во. — 1996. — № 1. — С. 15–19.
24. Влияние структурного состояния припоя на физико-механические свойства паяных соединений / Б. А. Калинин, А. Н. Плющев, В. Т. Федотов и др. // Там же. — 2001. — № 8. — С. 38–41.
25. Пат. 296862 ГДР, МКИ³ В 21 В 1/00, В 22 D 11/06. Verfahren zur Herstellung von Halbzeug, insbesondere von Metallbandern durch Schnellerstarrung / H. Mulbach, L. Illgen, H. Pfannkuchen, Alius Eberhard. — Заявл. 06.02.89; Оpubл. 19.12.91.
26. Опыт применения быстрозакаленных припоев для соединения конструкционных материалов / Б. А. Калинин, В. Т. Федотов, О. Н. Севрюков и др. // Перспективные материалы. — 2001. — № 6. — С. 82–87.
27. Разработка аморфного ленточного припоя для пайки дистанционирующих решеток / А. Н. Плющев, Т. Т. Мамедова, В. Т. Федотов, О. Н. Севрюков // Новые конструкционные материалы: Материалы науч.-практ. конф. материаловедческих обществ России. — М.: МИФИ, 2000. — С. 58–59.
28. Использование аморфных припоев серии «СТЕМЕТ» при изготовлении из разнородных материалов малогабаритных изделий в атомной технике / А. Д. Юрченко В. Ф. Соколов, С. М. Кутузов и др. // Там же. — С. 63.
29. Калинин Б. А., Федотов В. Т., Севрюков О. Н. Опыт применения быстрозакаленных припоев для соединения конструкционных материалов // Там же. — С. 91–92.
30. Севрюков О. Н., Федотов В. Т. Новые аморфные припои для пайки титана и его сплавов // Там же. — С. 107–108.
31. Применение быстрозакаленных припоев для пайки конструктивных элементов термоядерных реакторов / Б. А. Калинин, О. Н. Севрюков, В. Т. Федотов, А. Н. Плющев // Свароч. пр-во. — 2004. — № 12. — С. 45–50.
32. Лада И. А., Ковнеристый Ю. К., Юрьев А. А. Расчет термодинамических и кинетических характеристик расплавов переходного металла методом нелокального модельного псевдопотенциала // Расплавы. — 1991. — № 2. — С. 20–38.
33. Amorphous solders for brazing products made of titanium and zirconium / J. Korolev, A. Sukhachyov, V. Molokanov, V. Chebotnikov // DVS. — 1992. — **148**. — P. 116.
34. Аморфные припои «СТЕМЕТ» для высокотемпературной пайки / Б. А. Калинин, В. Т. Федотов, О. Н. Севрюков и др. // Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной пайки, М.: 24–25 нояб. 2004 г. — М., ЦРДЗ, 2004. — С. 29–31.
35. А. с. 1673352 СССР, МКИ³ В 23 К 35/32. Припой для пайки коррозионно-стойкой стали / И. П. Чекунов, С. В. Орлов, В. С. Арапов и др. — Заявл. 29.09.89; Оpubл. 30.08.91, Бюл. № 32.
36. Biessame Folie zum Hartloeten hat eine Breite von 152 mm // Maschinenmarkt. — 1991. — **97**, № 46. — S. 172.
37. Comparison of gold-nickel with nickel base metallic glass brazing foils / D. Bose, A. Datta, N. De Cristofaro // Welding J. — 1981. — **60**, № 10. — P. 29–34.
38. А. с. 1580722 СССР, МКИ³ В 23 К 35/32. Припой для пайки титана и его сплавов / В. Н. Чеботников, А. П. Сухачев, В. В. Молоканов и др. — Заявл. 09.12.88; Оpubл. 15.05.91, Бюл. № 18.
39. Brazing of titanium using low melting point Ti-base filler metals / M. W. Ko, A. Suzumura, T. Onzama // Titanium 1990; Prod. and Appl.: Proc. Techn. Program. Intern. conf., Dayton, Ohio, 1990. — Dayton (Ohio), 1990. — Vol. 2. — P. 592–601.
40. Watanabe Takehiko, Hoshimo Manabu. Brazing of titanium using Zr-base filler metals // Есэцу гакай ромбунсю = Quart. J. Jap. Weld. Soc. — 1991. — **9**, № 3. — P. 372–379.
41. Pat. 4209570 USA, МКИ С 22 С 9/10, С 25 D 7/06, НКИ. Homogeneous brazing foils of copper based metallic glasses / N. J. De Cristofaro, Henschel Clanobe, Mt.; Allied Chemical Corp. — Заявл. 02.10.78. — Оpubл. 24.06.80.
42. Pat. 4460658 USA МКИ С 22 С 9/06, В 22 D 15/02, НКИ 428/606. Homogeneous low melting point copper based alloys / Bose Debasis, Datta Amitava, J. De Cristofaro; Allied Corp. — Заявл. 20.09.82; Оpubл. 17.07.84.
43. Datta A., Rabinkin A., Bose D. Rapidly solidified copper-phosphorus base brazing foils // Welding J. — 1984. — **63**, № 10. — P. 14–21.
44. Rabinkin A. Resistance of copper/copper joints brazed with silver-base and amorphous Metglas alloys // Mater. Lett. — 1984. — **2**, № 6A-6B. — P. 487–491.

Different methods for production of alloys in the amorphous and nanocrystalline states are considered. It is shown that the main advantage of amorphous brazing filler alloys consists in the fact that they are produced in the form of thin plastic foils, which can be used as inserted elements of any shape to fabricate unique structures, primarily for aerospace and atomic power engineering. High chemical homogeneity of amorphous brazing filler alloys and their narrow melting point ranges provide good wetting of the surface treated, decrease in the probability of formation of lacks of penetration and brittle phases, thus ensuring high strength of the brazed joints.

Поступила в редакцию 25.03.2005