



ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПРОСЛОЕК В СОЕДИНЕНИЯХ ТРУДНОСВАРИВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА АЛЮМИНИЕВОЙ ОСНОВЕ (Обзор)

Д. А. ИЩЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены технологии применения наноструктурных прослоек в виде фольг или покрытий для совершенствования неразъемного соединения трудносвариваемых материалов на основе алюминия в процессах диффузионной, контактной сварки, а также сварки с нагревом за счет экзотермической реакции самораспространяющегося высоко-температурного синтеза.

Ключевые слова: диффузионная сварка, контактная сварка, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, алюминиевые сплавы, наноструктура, присадки, прослойки, покрытия, фольги, порошки, пластическая деформация, экзотермическая реакция

Алюминий и алюминиевые сплавы по производству и применению занимают второе место после стали. Благодаря уникальному сочетанию комплекса физико-механических, коррозионных и технологических свойств сплавы на основе алюминия успешно применяются в различных отраслях промышленности и в строительстве. Значительные объемы применения алюминиевых сплавов в военной технике, в автомобильном, железнодорожном и водном транспорте, электротехнике, при изготовлении криогенной и химической аппаратуры, в сельскохозяйственном и пищевом машиностроении. Кроме того, высокопрочные алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом в летательных аппаратах, в том числе в изделиях ракетно-космической техники (до 80 % объемов по массе). Распространению таких материалов в производстве ответственных изделий способствуют современные интенсивные исследования свариваемости и разработка эффективных мер по повышению прочности и надежности сварных соединений, в частности, по предотвращению образования горячих трещин и пор в швах.

Для совершенствования процессов сварки в твердом состоянии и улучшения свойств неразъемных соединений трудносвариваемых материалов, а также сплавов различных систем легирования разработана эффективная технология применения наноструктурных прослоек между соединяемыми поверхностями свариваемых изделий. Такие прослойки представляют собой одно- или многослойные покрытия, фольги или смеси ультрадисперсных порошков. При диффузионной сварке с применением таких материалов получают

сварные соединения с дисперсной микроструктурой, имеющие высокую прочность. Пластическая деформация локализуется в тонкой прослойке, что позволяет осуществлять сварку при использовании режимов с меньшими давлением, продолжительностью и температурой, т. е. сохраняется исходная структура свариваемых материалов.

Применяемый для сварки давлением самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) интерметаллидных соединений заключается в безгазовом горении металлов (компонентов шихты) в промежутке между свариваемыми материалами. Этот процесс активируется при использовании в качестве шихты ультрадисперсных пленочных или порошковых прослоек, которые состоят из металлов, способных вступать между собой в мгновенную экзотермическую реакцию. Технология СВС обеспечивает качественное формирование соединений благодаря высокой степени локализации нагрева в зоне сварки.

Процесс контактной сварки с применением наноструктурных прослоек также совершенствуется благодаря уменьшению времени сварки и повышенной локализации нагрева с предотвращением разупрочнения материалов.

Цель настоящего обзора — проанализировать современные разработки способов неразъемного соединения в твердом состоянии материалов на основе алюминиевых сплавов с применением наноструктурных прослоек в виде фольг или покрытий, а также с использованием ультрадисперсных присадок, которые обеспечивают получение дисперсной структуры зоны неразъемного соединения с высокими прочностными характеристиками.

Неразъемное соединение с использованием наноструктурных прослоек при сварке взрывом. При производстве слоистых плит из высокопрочных алюминиевых сплавов в качестве исходных заготовок часто применяют предварительно плакированные плиты, причем их исходная



толщина в пакете может значительно колебаться в зависимости от конечной толщины плиты и требуемого соотношения слоев, что сказывается на качестве соединения слоев и проявляется в нестабильности свойств при статических и динамических испытаниях. В работе [1] проведена сравнительная оценка качества соединения, полученного сваркой взрывом, при плакировании высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg ($\Sigma \text{Mg} + \text{Zn} \geq 9\%$). Указано, что прочность и ударная вязкость соединения возрастают с увеличением относительной степени деформации ε при плакировании. Наблюдается наиболее интенсивный рост прочности при увеличении степени деформации до 50 % и затем более плавное увеличение до значений, равных прочности прослойки АД1 (рис. 1). Ударная вязкость достигает максимальных значений при более высоких степенях деформации ($\varepsilon = 80\%$), являясь более чувствительной характеристикой к дефектам типа оксидных плен. Существенное влияние на качество соединения, особенно на пластические свойства, оказывает термообработка (рис. 2). При повышении температуры закалки и увеличении времени выдержки ударная вязкость соединения снижается. Излом приобретает более хрупкий характер, особенно после рекристаллизационного отжига при температуре 550 °C и $\varepsilon < 66\%$. При увеличении степени деформации это влияние уменьшается.

СВС-процесс для неразъемного соединения материалов и получения интерметаллидных покрытий. В процессе соединения металлов с помощью СВС нагрев места соединения происходит за счет экзотермической реакции в шихте, предварительно размещенной между соединяемыми поверхностями [2]. При этом СВС-продукт в большей или меньшей степени участвует в образовании материала шва. Различают два варианта осуществления процесса. В первом случае (СВС-пайка) соединяемые материалы и помещенный в зазор между ними слой шихты в исходном состоянии являются холодными или равномерно прогретыми. Кратковременным локальным нагре-

вом в этом слое инициируется волна горения, которая разогревает соединяемые поверхности и расплавляет СВС-продукт. После этого место сварки подвергают сжатию, максимально сближая поверхности материалов и частично удаляя СВС-продукт из зазора. Во втором случае (СВС-сварка) используется электропроводящая шихта и инициирование процесса происходит за счет пропускания через нее и свариваемые материалы тока, при этом экзотермическая реакция происходит одновременно во всем объеме шихты.

В СВС-процессе в тонких двухслойных пленках температура инициирования зависит от скорости нагрева и соотношения толщин каждого слоя. При этом безгазовое горение реализуется при температурах инициирования на 300...350 °C меньших, чем на порошках (например, для Al/Fe и Al/Co в пределах 250...400 °C, а для Al/Ni — 200...300 °C) [3]. Механизм СВС аналогичен процессу взрывной кристаллизации. В начальной стадии твердофазные реакции, возникающие на контактной поверхности пленочных конденсатов, могут быть безгазовым горением. Реакция в тонких пленках может реализовываться и на поверхности порошков, если второй реагент находится в жидкой фазе. Большие скорости охлаждения после прохождения волны СВС в двухслойных пленках приводят к стабилизации высокотемпературных и метастабильных фаз.

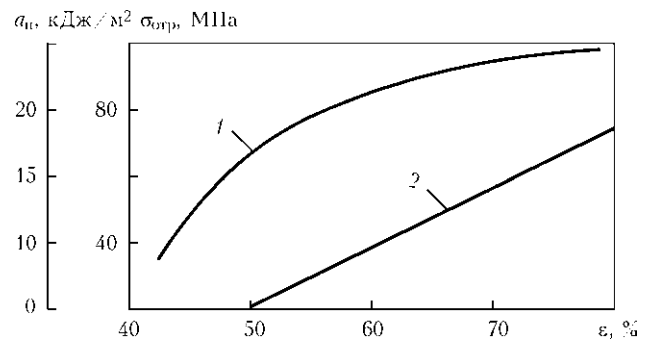


Рис. 1. Зависимость прочности соединения слоев $\sigma_{\text{отр}}$ (1) и ударной вязкости a_n (2) от степени деформации [1]

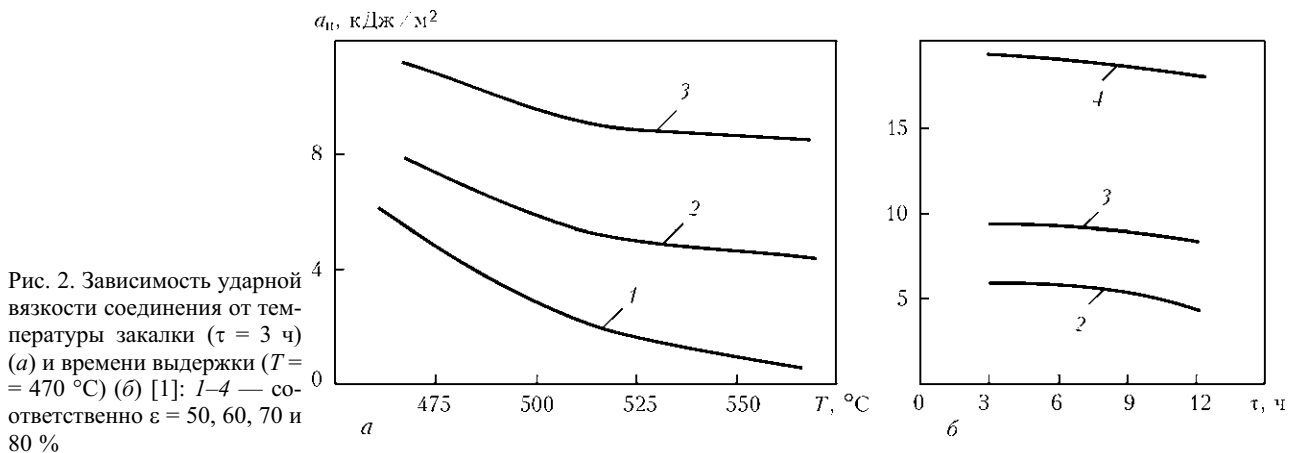


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости соединения от температуры закалки ($\tau = 3$ ч) (а) и времени выдержки ($T = 470$ °C) (б) [1]: 1-4 — соответственно $\varepsilon = 50, 60, 70$ и 80 %

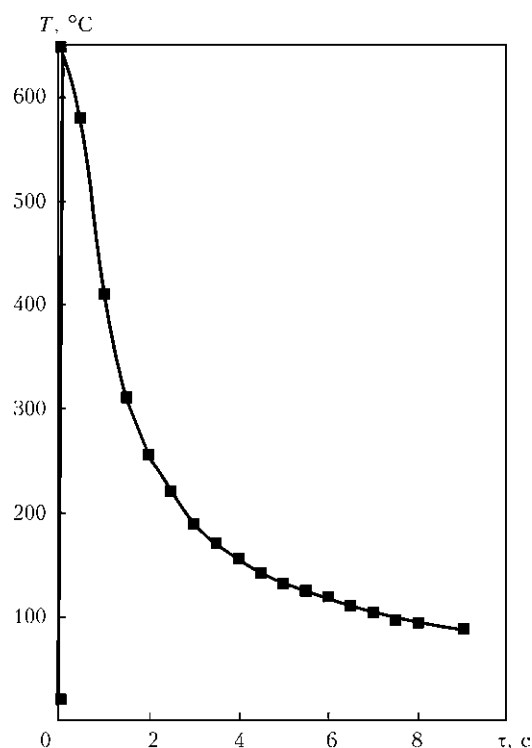


Рис. 3. Термограмма реакции СВС в образце системы Ni–Al (61,2 мас. % Al) [4]

В области неразъемного соединения интерес к многослойным фольгам на основе элементов, образующих интерметаллиды, обусловлен также их применением в качестве присадок и для источников локального нагрева металлов при реализации реакции СВС (безгазового горения) в сварочном зазоре. В работе [4] проведена оценка интенсивности тепловыделения в процессе СВС в слоистых фольгах Ni/Al, помещенных между двумя соединяемыми медными фольгами. Показано, что в зависимости от химического состава, толщины и характеристик исходной микроструктуры слоистых фольг интенсивность тепловыделения может изменяться в широких пределах от 70 до 400 Вт/см². Скорость распространения волны безгазового горения также зависит от толщины слоев компонентов: при их уменьшении до нанометрового масштаба скорость распространения волны реакции СВС по фольге может достигать 10 м/с. На термограмме (рис. 3) видно, что после иницирования реакции СВС температура пакета быстро возрастает (за 0,1 с) до значения, зависящего от количества выделившегося тепла, массы образца и медной фольги, которые подбирались так, чтобы разогрев всего пакета не превышал температуру плавления меди. Как правило, эта температура находилась в пределах 500...700 °C.

Работа [5] посвящена исследованию механизмов диффузии, формирования и стабильности зародышей новых фаз в реакциях, соответствующих СВС в системе Ni–Al. При сравнении количественного и качественного изменения фазового сос-

тава для различного содержания внедренных частиц алюминия (30 и 50 %) в никелевую матрицу показано преобладание фазы Ni₃Al для 30 % Al и 50 % NiAl. Скорость растворения внедренных частиц алюминия в первом случае, когда система импульсно разогревалась в нарастающей серии последовательных интервалов времени и запоминалась конечная структура материалов, после процесса закалки ниже, чем во втором случае, когда запоминалась динамическая структура системы, полученная при импульсном разогреве, и вновь подвергалась импульсному разогреву в течение нового интервала времени.

В работах [6–8] изучены микро- и наноструктуры многослойных пленок, полученных с использованием метода магнетронного напыления и состоящих из чередующихся слоев титана и алюминия, в широком диапазоне значений толщины слоев. Рассмотрены микроскопические особенности распространения в них волн безгазового горения. В процессе безгазового горения в многослойных пленках системы Al–Ti наиболее вероятным механизмом самораспространяющейся реакции является диффузия алюминия в β-Ti при температуре, близкой к температуре перехода α-Ti в β-Ti. В результате СВС образуются интерметаллидные соединения титана с алюминием, которые представляют собой сильно текстурированные беспористые поликристаллические материалы, в которых присутствуют две взаимно перпендикулярные системы границ: между слоями и межзеренные. Слои реагентов сплошные и достаточно ровные, перемешивание вдоль их границ незначительное (рис. 4). Столбчатые зерна ориентированы нормально к плоскости фольги. По мере уменьшения толщины слоев они становятся слабаразличимыми, однако зеренная структура сохраняется, а иногда становится более явной (рис. 5). Поскольку коэффициент диффузии алюминия в титане весьма малый, межзеренные границы могут служить путями для аномально быстрой диффузии, так как ориентированы параллельно диффузионному потоку. По сравнению с горением порошковых смесей «растекание» волны СВС в фольге проходит более равномерно. В то же время межзеренные границы могут замедлять поток тепла, направленный от горячих продуктов в несгоревшую часть образца, т. е. вдоль фольги.

В работе [9] описаны режимы фазовых образований при гетерогенной реакции безгазового горения в многослойных нанопленках системы Al–Ti. Указано, что взаимодействие элементов происходит в следующем порядке: разупорядочение кристаллической структуры титана с одновременным увеличением межплоскостных расстояний и насыщением твердого титана атомами алюминия; упорядочение кристаллической решетки с обра-

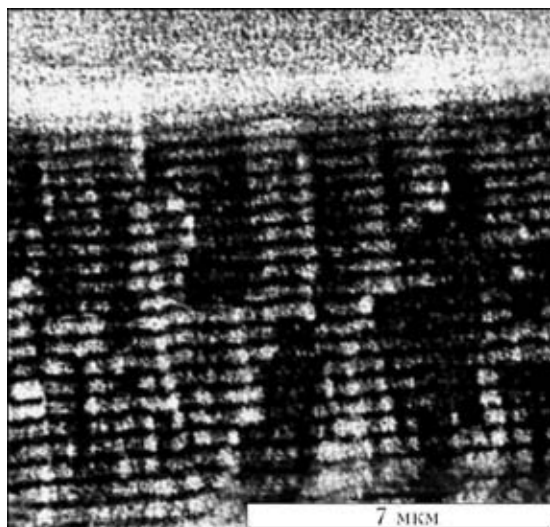


Рис. 4. Микроструктура многослойных пленок Al/Ti в результате СВС (растровая электронная микроскопия) [8]

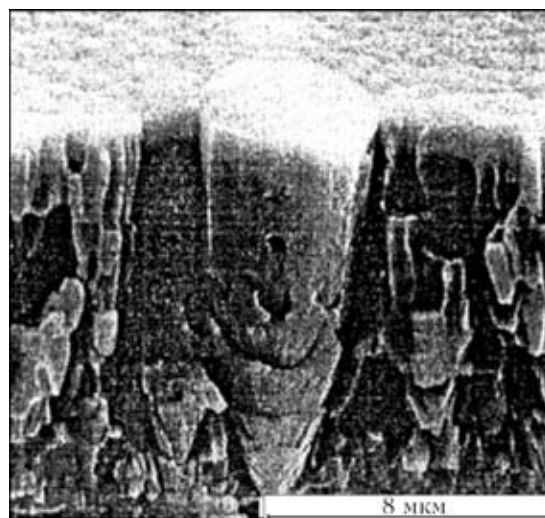


Рис. 5. Микроструктура излома пленки Al/Ti при толщине слоев 95 нм [8]

зованием твердого раствора на основе α -Ti и параллельное образование фазы $TiAl_3$; упорядочение перемешанных атомов титана и алюминия в кристаллическую структуру конечного продукта сплава TiAl. В режиме горения все стадии процесса происходят почти мгновенно — менее чем за 0,04 с. При применении обоих режимов происходит наследование текстуры исходных слоев промежуточными и конечной фазами.

В работах [10–12] рассмотрены преимущества объединения СВС-процесса и механического воздействия при соединении ультрадисперсных материалов из интерметаллидов AlNi и AlTi. Продолжительность и режим механической активации при диспергировании в порошковых смесях никеля с алюминием и титана с алюминием влияет на характеристики процесса и состав продуктов безгазового горения. Горение для данных составов происходит в микрогетерогенном режиме, а скорость прогрева определяется временем прогрева композиционных частиц. В случае режима термического взрыва, где горение нельзя остановить сразу после достижения точки воспламенения, его можно замедлить за счет различной длительности горения после воспламенения, изменяя скорость нагрева и используя грубый порошок никеля в качестве источника тепла *in situ*. Этот косвенный метод успешно имитирует операцию волновой закалки, которая применима только к режиму распространения плоской волны.

Контактная сварка. В работе [13] приведены результаты исследования особенностей формирования соединений по технологии контактной сварки сопротивлением с использованием наноструктурных Al/Ni и Al/Cu фольг в качестве вставок между соединяемыми деталями из алюминиевых сплавов АД0, 1460 и АМг6. Такая технология характеризуется высококонцентрированным выделением тепла в стыке, что уменьшает время свар-

ки и предотвращает разупрочнение металла. При использовании фольги, состоящей из слоев алюминия и никеля, происходит дополнительное выделение тепла в зоне контакта, обусловленное протеканием экзотермической реакции между металлами, которая сопровождается образованием интерметаллидных фаз. Развитие экзотермической реакции зависит от скорости нагрева при сварке. С повышением последней под воздействием усилия сжатия увеличивается объем грата. Оптимальной для получения качественных соединений является скорость нагрева 500...800 °C/с. Фрагменты фольги сохраняют слоистую структуру, т. е. реакция алюминия и никеля протекает локально (рис. 6). Использование алюминиево-медных наноструктурных фольг позволяет заметно уменьшить температуру сварки (на 100...150 °C) благодаря протеканию процесса формирования в фольге эвтектики Al_2Cu . Это имеет особое значение при сварке термически нестабильных алюминиевых сплавов.

На основе исследований механизма формирования зоны соединения авторы работы [14] разработали методы получения точечной контактной сваркой работоспособных соединений из стали и алюминиевых сплавов АМг6 и АМц с использованием биметаллических пластин сталь–алюминий, которые изготавливали прокаткой или сваркой взрывом. При этом показано, что при изготовлении прокладок предпочтение следует отдавать сварке взрывом, так как она позволяет получить качественное соединение с самоочисткой поверхности в процессе косоугольного соударения листовых заготовок. Используя биметаллический переходник, осуществляли точечную контактную сварку сплава АМг6 со сталью Ст3. Закономерности процессов расплавления, кристаллизации, взаимной диффузии и химического взаимодействия компонентов, а также их изменения с повы-

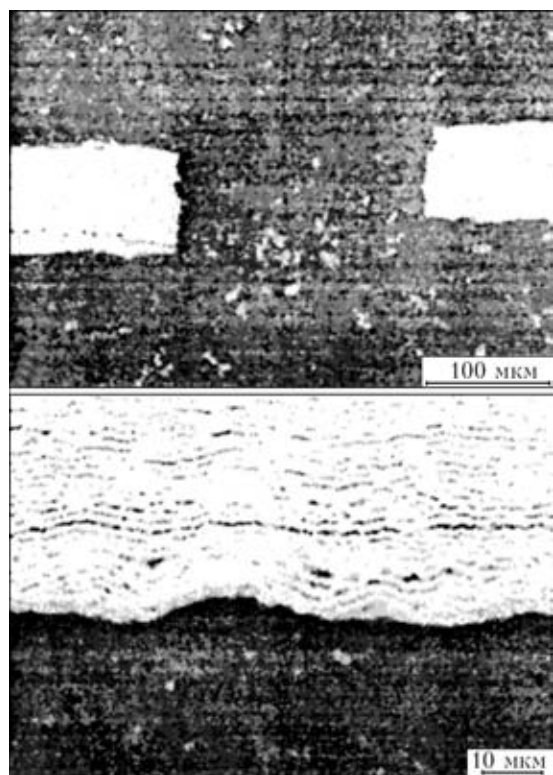


Рис. 6. Фрагменты фольги Al/Ni в металле сварного шва [13]

шением температуры и давления позволяют определять оптимальные режимы сварки и получать прочное соединение между биметаллом и основным материалом.

Способы изготовления наноструктурных фольг и покрытий. На качество соединений, полученных с использованием наноструктурных фольг и покрытий, наряду с параметрами сварочных процессов и последующей обработкой влияют химический и фазовый состав, размер ультрадисперсных частиц и толщина наноструктурных фольг или покрытий. Соответственно важное значение имеют и особенности процессов их получения. Наноструктурные фольги и покрытия изготавливаются следующими методами: закалка из расплава спинингованием [15–20]; детонационное нанесение [21, 22]; конденсация [23]; осаждение после газотермического [24], магнетронного [25], вакуумно-дугового [26] распыления; ионная имплантация [27, 28]; гальваническое осаждение.

Заключение. Представленные выше результаты опубликованных работ свидетельствуют о высокой эффективности применения наноструктурных прослоек для соединения трудносвариваемых алюминиевых сплавов. Такими прослойками могут быть элементарные или многослойные покрытия, фольги или смеси ультрадисперсных порошков. Сварные соединения при этом получают высокопрочными с дисперсной микроструктурой.

В условиях диффузионной сварки с использованием фольг или покрытий, имеющих ультра-

дисперсную структуру, пластическая деформация локализуется в тонкой прослойке. Это позволяет прикладывать меньшее усилие сжатия и ускорять процесс сварки без нагрева, что способствует сохранению исходной структуры свариваемых материалов.

Для СВС характерны высокотемпературные фазовые образования в зоне контакта при аномально быстрой реакции и диффузии. При этом обеспечивается качественное формирование швов при сравнительно мягких температурных режимах благодаря высокой степени локализации нагрева в зоне сварки.

Применение наноструктурных многослойных фольг при контактной сварке вызывает дополнительное высококонцентрированное выделение тепла в зоне соединения. Этому способствует инициируемая электрическим током локальная экзотермическая реакция между металлами прослойки, позволяющая сохранять структуру и прочностные свойства основного материала.

1. Шленский А. Г. Исследование качества соединения при плакировании сплавов системы Al–Zn–Mg // *Технология машиностроения*. — 2008. — № 8. — С. 20–23.
2. Клубович В. В., Кулак М. М., Самолетов В. Г. Получение неразъемных соединений материалов с помощью СВС // *Сварка и родственные технологии: Сб. науч. тр.* — Минск, 2005. — С. 62–63.
3. *Самораспространяющийся* высокотемпературный синтез и твердофазные реакции в двухслойных тонких пленках / В. Г. Мягков, В. С. Жигалов, Л. Е. Быкова, В. К. Мальцев // *Журн. техн. физики*. — 1998. — **68**, № 10. — С. 58–62.
4. Шшикин А. Е., Роговченко Д. С., Устинов А. И. Оценка интенсивности тепловыделения в процессе быстрораспространяющейся реакции СВС в многослойных фольгах Ni/Al // *Металлофизика и новейшие технологии*. — 2009. — **31**, № 9. — С. 1179–1188.
5. Денисова Н. Ф., Старостенков М. Д., Холодова Н. Б. Исследование формирования и стабильности зародышей новых фаз в реакциях, соответствующих СВС-синтезу в системе Ni–Al // *Тр. 9 Междунар. науч.-техн. конф. «Композиты — в народное хозяйство» («Композиты-2005»)*. — Барнаул, нояб., 2005. — Барнаул: АлтГТУ, 2005. — С. 100–105.
6. *Безгазовое* горение многослойных биметаллических нанопленок Ti/Al / А. С. Рогачев, А. Э. Григорян, Е. В. Илларионова и др. // *Физ. горения и взрыва*. — 2004. — **40**, № 2. — С. 45–51.
7. *Автоволновое* распространение экзотермических реакций в тонких многослойных пленках системы Ti–Al // А. Э. Григорян, Н. Г. Елистратов, Д. Ю. Ковалев и др. // *Докл. РАН*. — 2001. — **381**, № 3. — С. 368–372.
8. *Структурные* особенности тонких многослойных пленок Ti/Al для самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А. Э. Григорян, Е. В. Илларионова, Б. А. Логинов и др. // *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. — 2006. — № 5. — С. 31–36.
9. *Формирование* кристаллической структуры продуктов при гетерогенной реакции в многослойных биметаллических наносистемах / А. С. Рогачев, Ж. К. Гашон, А. Э. Григорян и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* — 2006. — **70**, № 4. — С. 609–611.
10. *Самораспространяющийся* высокотемпературный синтез и механическое сплавление при получении монофазных высокодисперсных интерметаллидов / Т. Ф. Григорьева, М. А. Корчагин, А. П. Баринаова, Н. З. Ляхов // *Материаловедение*. — 2000. — № 5. — С. 49–53.



11. *Biswas A., Roy S. K.* Comparison between the microstructural evolution of two modes of SHS of NiAl: key to a common reaction mechanism // *Acta Mater.* — 2004. — **52**, № 2. — С. 257–270.
12. *Шкодич Н. Ф., Кочетов Н. А., Сачкова Н. В.* О влиянии механической активации на СВС-составы Ni–Al и Ti–Al // *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* — 2006. — № 5. — С. 44–50.
13. *Особенности* контактной сварки алюминиевых сплавов с использованием наноструктурных алюминиево-никелевых и алюминиево-медных фольг / В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швец, А. Г. Сахацкий, А. А. Наконечный // *Свароч. пр-во.* — 2007. — № 9. — С. 12–14.
14. *Ковалевский В. Н., Демченко Е. Б., Лопатко И. Г.* Использование нанопокрывтий при сварке разнородных материалов давлением // *Сварка и родственные технологии.* — 2006. — Вып. 8. — С. 84–87.
15. *Нанослоистые* фрагменты в алюминиевых сплавах / А. П. Шпак, В. П. Майборода, Ю. А. Куницкий и др. // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии.* — 2004. — **2**, № 2. — С. 681–687.
16. *Неумержицкая Е. Ю., Шепелевич В. Г.* Структура, свойства и термическая стабильность быстрозатвердевших фольг сплава алюминия с хромом, никелем и марганцем // *Перспект. материалы.* — 2005. — № 4. — С. 69–73.
17. *Особливості* фазоутворення в швидкозагартованих сплавах Al–Fe–Cr при наявності квазікристалів / М. В. Карпець, С. О. Фірстов, Л. Д. Кулак // *Фіз. і хімія твердого тіла.* — 2006. — **7**, №1. — С. 147–151.
18. *Гутько Е. С., Шепелевич В. Г.* Исследование быстрозатвердевших фольг бинарных и тройных сплавов на основе алюминия, содержащих цинк и магний // *Физ. и химия обработки материалов.* — 2005. — № 4. — С. 81–85.
19. *Ташлыкова-Бушкевич И. И., Шепелевич В. Г.* Элементный послыйный анализ распределения компонентов в объеме быстрозатвердевших низколегированных сплавов алюминия // *Там же.* — 2000. — № 4. — С. 99–105.
20. *Структурный* и фазовый анализ быстрозатвердевших сплавов Al–Fe / И. И. Ташлыкова-Бушкевич, Е. С. Гутько, В. Г. Шепелевич, С. М. Барайшук // *Поверхность.* Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2008. — № 4. — С. 69–75.
21. *Влияние* свойств порошков алюминидов титана и условий детонационного напыления на фазо- и структурообразование покрытий / В. Е. Олиker, В. Л. Сироватка, И. И. Тимофеева и др. // *Порошк. металлургия.* — 2005. — № 9/10. — С. 74–84.
22. *Романьков С. Е., Калошкин С. Д., Пустов Л. Ю.* Синтез титаноалюминидных покрытий методом механического сплавления и последующего отжига на поверхности титана и алюминия // *Физ. металлов и металловедение.* — 2006. — **101**, № 1. — С. 65–73.
23. *Перекрестов В. И., Косминская Ю. А., Кравченко С. Н.* Закономерности структурообразования конденсатов слабopersыщенных паров Cu, Ti, Al и Cr // *Металлофизика и новейшие технологии.* — 2003. — **25**, № 6. — С. 725–735.
24. *Структурные* особенности квазикристаллических покрытий из сплава Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂ / Е. И. Буженец, В. П. Майборода, А. П. Шпак и др. // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии.* — 2004. — **2**, № 4. — С. 1323–1329.
25. *Hampshire J., Kelly P. J., Teer D. G.* The tribological properties of co-deposited aluminium-titanium alloy coatings // 30 Intern. conf. on metallurgical coatings and thin films. — San Diego, Calif., Apr. 28–May 2, 2003. — P. 392–398.
26. *Budilov V., Kireev R., Kamalov Z.* Intermetallic products formed by joint cold cathode vacuum arc sputtering of titanium and aluminium / *Mater. Sci. and Eng. A.* (11 Intern. conf. on rapidly quenched and metastable materials), Oxford, 25–30 Aug., 2002. — 2004. — 375–377. — P. 656–660.
27. *Формирование* поверхностных слоев, содержащих интерметаллидные соединения систем Ni–Al и Ti–Al, при высокоинтенсивной ионной имплантации / И. А. Курзина, И. А. Божко, М. П. Калашников, Ю. П. Шаркеев // *Перспект. материалы.* — 2005. — № 1. — С. 13–23.
28. *Высокоинтенсивная* имплантация ионов алюминия в титан / И. А. Курзина, И. А. Божко, М. П. Калашников и др. // *Металлофизика и новейшие технологии.* — 2004. — **26**, № 12. — С. 1645–1660.

Considered are the technologies for application of nanostructured interlayers in the form of foils or coatings to improve permanent joints on hard-to-weld aluminium-base materials in processes of diffusion bonding and resistance welding, as well as welding with heating due to an exothermic reaction of self-propagating high-temperature synthesis.

Поступила в редакцию 08.12.2010

Уважаемые соискатели!

Сообщаем, что в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины создан специализированный ученый совет (Д26.182.02), принимающий к защите диссертации на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук по специальности:

05.0201 «Материаловедение»

05.16.02 «Металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов»