



ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Академик НАН Украины **Б. Е. ПАТОН**, чл.-кор. НАН Украины **А. Я. ИЩЕНКО**,
А. И. УСТИНОВ, д-р физ.-мат. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены возможности получения соединений в твердой фазе новых конструкционных квазикристаллических и интерметаллидных сплавов, алюмокомпозитов и наноматериалов способами диффузионной сварки и сварки трением с перемешиванием с использованием наноструктурных присадок. Показано, что эти способы сварки позволяют получать неразъемные соединения трудносвариваемых материалов, применяемых при изготовлении изделий аэрокосмической техники, деталей газотурбинных двигателей, электротехнических и теплообменных установок, при ремонтных и восстановительных работах.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, алюмокомпозиты, квазикристаллические сплавы, интерметаллидные материалы, свариваемость, неразъемное соединение, соединение в твердой фазе, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, диффузионная сварка, сварка трением с перемешиванием, наноструктура, механические свойства, сварные конструкции, аэрокосмическая техника

В начале XXI века возникла необходимость коренного повышения научно-технического уровня экономики во всем мире. Для решения этой задачи требуется проведение обширных научных исследований, а также массовое внедрение новых прогрессивных технологий в промышленное производство. Согласно прогнозам многих авторитетных организаций, приоритетными являются работы в области создания наноматериалов и нанотехнологий. Именно они в числе прочих будут способствовать существенному повышению эффективности производства в таких сферах, как машиностроение, энергетика, строительство, сельское хозяйство, медицина и др.

К настоящему времени для производства конструкций аэрокосмической техники уже разработаны новые легкие алюминиевые сплавы и композиционные материалы с исключительными свойствами, обусловленными квазикристаллической или нанодисперсной структурой полуфабрикатов [1, 2]. Следует отметить, что при обычных способах сварки осуществляется нагрев металлических материалов до температуры, которая обеспечивает их расплавление или активацию диффузионных процессов в зоне соединения. В случае использования наноструктурных композиционных материалов, сплавов на основе интерметаллидных соединений и других высоколегированных сплавов нагрев до высокой температуры приводит к необратимым структурным превращениям [3] и деградации первоначальных физико-ме-

ханических свойств материала [4]. В связи с этим актуальной является проблема снижения температуры и сокращения продолжительности процесса формирования швов с целью сохранения исходной структуры и уровня свойств материала в зоне соединения. Среди различных современных способов сварки заслуживают более широкого применения процессы соединения в твердой фазе, т. е. без расплавления металла. К ним относятся прежде всего диффузионная сварка и сварка трением с перемешиванием [5].

Идея решения такой задачи в целом базируется на том, что температуру процесса соединения в твердой фазе можно снизить, если в качестве сварочных присадок применить быстрокристаллизующиеся аморфизированные гомогенные ленты [6] или композиционные тонкопленочные материалы с нанослойной структурой [1]. В таких материалах вследствие неравновесного состояния тонкой структуры имеет место существенное снижение температуры, при которой интенсивно протекают диффузионные процессы. Формированию доброкачественных соединений способствует использование многослойных наноструктурных пленок, которые состоят из металлов, вступающих в экзотермическую реакцию синтеза интерметаллидных соединений.

Рассмотрим ряд конкретных примеров использования нанослойных присадок и результаты работ, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона в этой области применительно к легким материалам аэрокосмического назначения.

Для соединения в твердой фазе жаростойких материалов, включая интерметаллидные сплавы, в качестве сварочных присадок разработаны и используются тонкие наноструктурные фольги из многослойных композиций различных металлических элементов Ti/Al, Ni/Al, Cu/Al и др. В основе их производства лежит процесс послойной

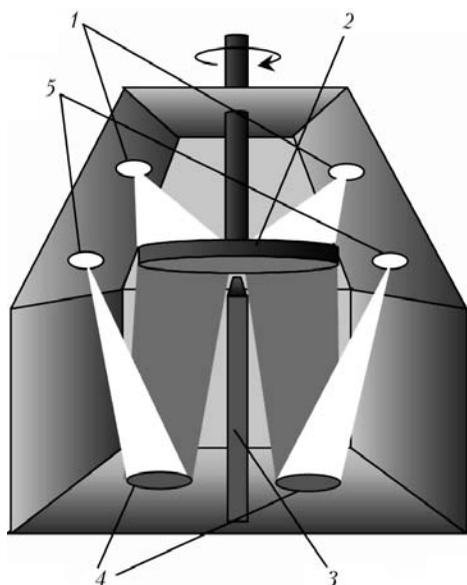


Рис. 1. Схема процесса электронно-лучевого осаждения конденсатов с многослойной структурой: 1 — электронно-лучевые источники (пушки) для нагрева; 2 — подложка; 3 — разделительный непроницаемый экран; 4 — тигли для испарения слитков; 5 — электронно-лучевые пушки для испарения

консолидации элементов из паровой фазы с использованием электронно-лучевой вакуумной технологии (рис. 1). Технология осаждения дает возможность регулировать процесс образования слоистых структур в широком диапазоне толщин отдельных слоев — от нескольких нанометров до десятка микрометров (рис. 2, а).

При нагреве наноструктурные фольги склонны к реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) интерметаллидных соединений, которая протекает очень быстро и характеризуется экзотермическим эффектом. Необходимым условием для соединения материалов без расплавления за счет активации диффузионных процессов в твердом состоянии является устойчивое протекание реакции СВС. Как показал опыт, для этого необходимо применять многослойные фольги толщиной более 30 мкм (рис. 2, б).

Диффузионное соединение микродисперсного высокопрочного алюмокомпозита системы $AMg5+27\% Al_2O_3$ с применением прослоек из наноструктурных многослойных фольг оказалось более эффективным по сравнению с дуговой сваркой [4]. В металлической матрице этого материала содержится большое количество упрочняющей фазы в виде нерастворимых частиц оксида алюминия, и поэтому он является труднообрабатываемым и трудносвариваемым. На рис. 3, а представлена структура композита в исходном состоянии, отличающаяся комплексом ценных свойств: высокими удельным модулем упругости, прочностью при комнатной и повышенных температурах, износостойкостью, низким коэффициентом линейного расширения. Этот материал широко

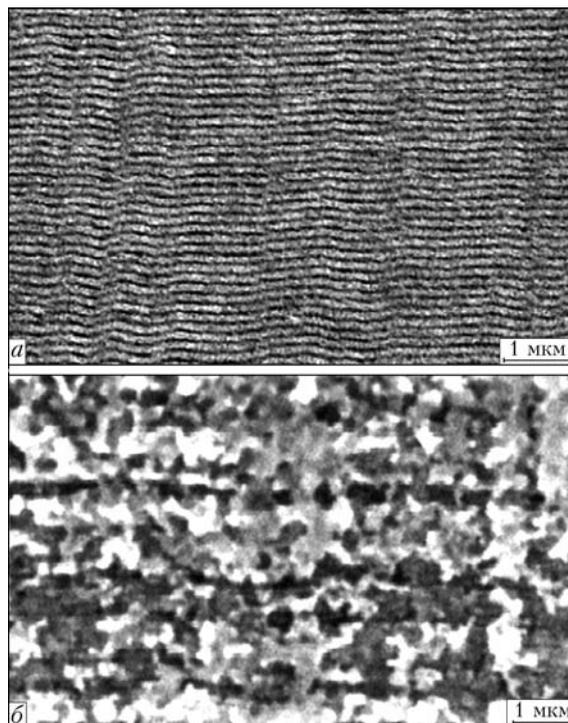


Рис. 2. Микроструктура многослойного наноструктурного конденсата Ni/Al, полученного электронно-лучевым паровым способом в вакууме, в исходном состоянии (а) и после реакции СВС при температуре 500 °С (б)

применяют в изделиях для авиакосмической техники и транспортного машиностроения.

Выполнение сварки плавлением рассматриваемого алюмокомпозита затруднена ввиду повышенной вязкости металла сварочной ванны и склонности к агломерации армирующих частиц Al_2O_3 . Образующиеся в шве конгломераты упрочняющих частиц приводят к снижению прочности и коррозионной стойкости полученных соединений [7]. При диффузионной сварке в условиях более низких температур сегрегация частиц упрочнителя и химические реакции между составляющими композитного материала практически отсутствуют. В связи с этим предпочтительнее твердофазный способ соединения микродисперсного композита на основе алюминия, упрочненного керамическими частицами Al_2O_3 [8]. Прочность швов при обычной диффузионной сварке с использованием однослойной пластичной алюминиевой фольги не превышает 50...60 % прочности основного материала (рис. 3, б).

Для активизации процесса диффузионной сварки и повышения прочности швов использованы промежуточные прослойки (присадки) из многослойных наноструктурных фольг двух типов — Ti/Al и Cu/Al (рис. 4), первая из них имела толщину от 60 до 150 мкм при толщине составляющих нанослоев никеля и алюминия от 50 до 500 нм и соответствовала стехиометрическому составу интерметаллидного соединения Ni_3Al , а вторая примерно

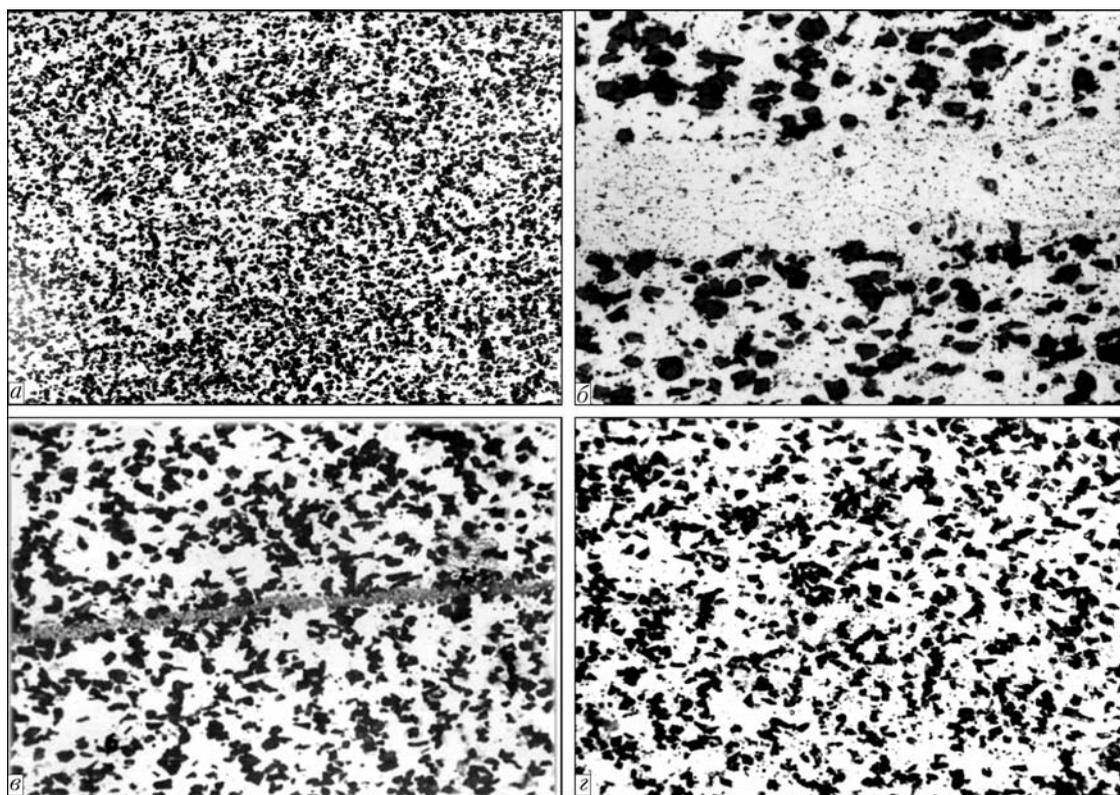


Рис. 3. Микроструктура основного металла — композита AMg5+27 % Al₂O₃ (а) и неразъемных его соединений, полученных диффузионной сваркой с использованием однослойной алюминиевой прослойки (б), а также многослойной наноструктурной фольги, соответствующей интерметаллидному составу Ni₃Al (в) или эвтектической композиции Al + 33 % Cu (г): а, ×200; б–г, ×400

такой же толщины соответствовала составу эвтектики Al+33 % Cu [9].

Установлено, что замена прослойки обычного алюминия (базовый вариант) на фольгу из нанослойных конденсатов позволяет снизить температуру сварки композита на 80...100 °С, обеспечить качественное формирование неразъемного соединения при меньшем сварочном давлении, которое не вызывает заметной макропластической деформации в свариваемых материалах. При использовании фольги композиции Cu/Al отмечается также полное растворение присадки в зоне соединения (см. рис. 3, в, г). При этом прочность металла швов повышается до уровня основного металла (рис. 5). Коэффициент прочности соединения составляет 0,87...0,90.

Диффузионная сварка интерметаллидного сплава на основе алюминиды титана γ-TiAl с использованием прослоек из многослойных фольг наноструктурных Ti/Al, Ni/Al, Ti/Ni является практически реальным и эффективным способом соединения перспективных жаропрочных материалов [10–12]. В качестве примера рассмотрим интерметаллидный сплав Ti–48Al–2Nb–2Mn (ат. %), работающий при 700...1100 °С, т. е. значительно выше температуры, при которой работают современные титановые суперсплавы (T ≤ 600 °С) [13]. Это позволяет применять указанный сплав для газотурбинных двигателей, обшивки лета-

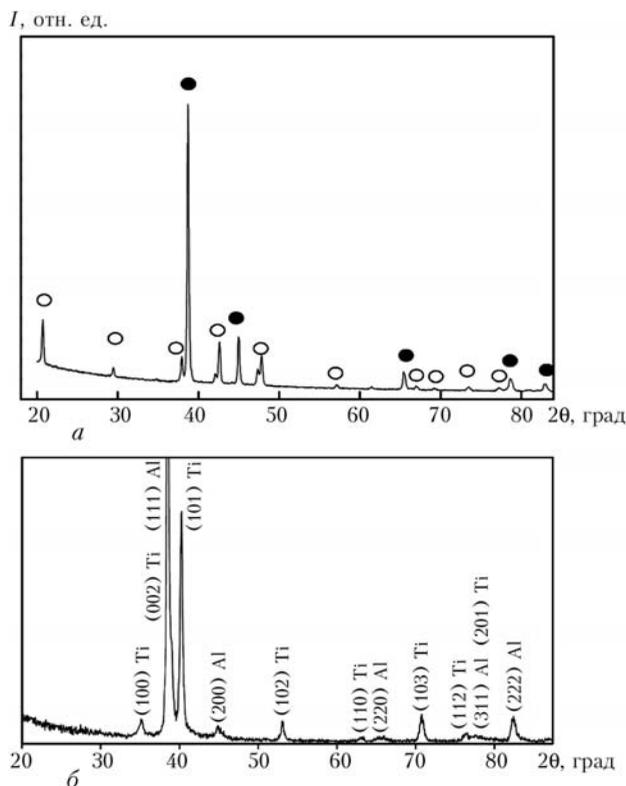


Рис. 4. Спектры рентгеновской дифракции фольг интерметаллида γ-TiAl (а) и нанодисперсной эвтектической композиции Al+33 % Cu (б): ● — Al; ○ — Al₂Cu; I — интенсивность излучения; θ — угол дифракции

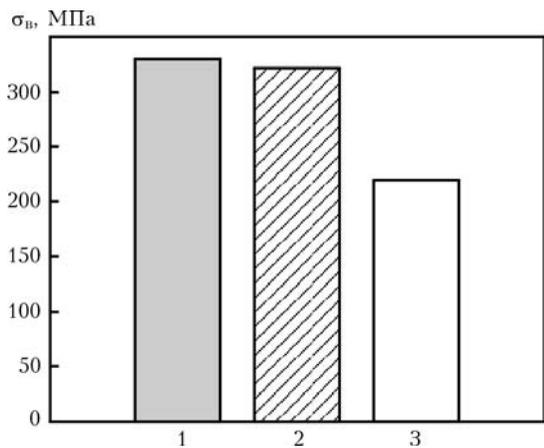


Рис. 5. Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$ основного металла (1) и соединений алюмокомпозиата $\text{AMg5}+27\% \text{Al}_2\text{O}_3$, полученных диффузионной сваркой с использованием нанослойной фольги системы Al-Cu (2) и однослойной алюминиевой ленты (3)

тельных аппаратов, деталей силового набора изделий авиакосмической техники и др. Сплавы на основе $\gamma\text{-TiAl}$ легкие (плотность $3,8...4,0 \text{ г/см}^3$) и стойкие к окислению при температуре до $900...1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Их модуль упругости при комнатной температуре составляет $160...175 \text{ ГПа}$, при $900...1000 \text{ }^\circ\text{C}$ снижется до 150 ГПа . Промышленное использование указанного материала сдерживается его низкой пластичностью при обычной температуре ($\delta = 0,1...0,5 \%$). Обрабатываемость полуфабрикатов затруднена по причине высокого сопротивления материала деформированию.

В исходном состоянии в сплаве Ti-48Al-2Nb-2Mn (ат. %) формируется полностью lamellar структура, которая представлена практически равноосными зёрнами размером $60...120 \text{ мкм}$ с пластинами (ламелями) γ - и α -фазы, имеющими в пределах каждого зёрна различную ориентацию. На фоне lamellar структуры образуются равномерно распределенные в объеме матрицы дисперсные включения с повышенным содержанием

ниобия. Микротвердость сплава составляет $3000...4000 \text{ МПа}$.

Неразъемные соединения узлов из этого материала получены диффузионной сваркой в вакууме с использованием многослойных фольг Ti/Al , Ti/Ni , Ni/Al общей толщиной от 10 до 20 мкм путем послойного осаждения из паровой фазы отдельных наноразмерных слоев соответствующих компонентов с помощью электронно-лучевой технологии. Сварку выполняли на установке У-394, предназначенной для диффузионной сварки и оборудованной кольцевым электронно-лучевым нагревателем заготовок. Равнопрочные соединения с благоприятной структурой получены с использованием нанослойной фольги Ti/Al общей толщиной 20 мкм на следующем режиме сварки: температура сварки $T_{\text{св}} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$; время сварки $\tau = 20 \text{ мин}$; давление $P = 45 \text{ МПа}$.

При металлографическом анализе структуры выявлен сплошной однородный шов шириной $15...18 \text{ мкм}$ (рис. 6, а), металл которого по химическому составу соответствует основной интерметаллидной фазе $\gamma\text{-TiAl}$ (рис. 7). Рядом со швом на расстоянии $5...10 \text{ мкм}$ выявлена зона с мелкозернистой структурой, формирование которой обусловлено процессом рекристаллизации. Значения микротвердости в зоне соединения $3500...4200 \text{ МПа}$ близки аналогичному показателю основного металла ($3000...4000 \text{ МПа}$) в исходном состоянии, что свидетельствует о равнопрочности металла шва с основным материалом (рис. 6, б).

В случаях использования в качестве прослоек фольг систем Ni/Al и Ti/Ni в зоне соединения формируются структурные составляющие, микротвердость которых в $2...3$ раза больше, чем у основного материала — сплава Ti-48Al-2Nb-2Mn (ат. %). Повышение микротвердости (рис. 8) может способствовать снижению пластичности соединения.

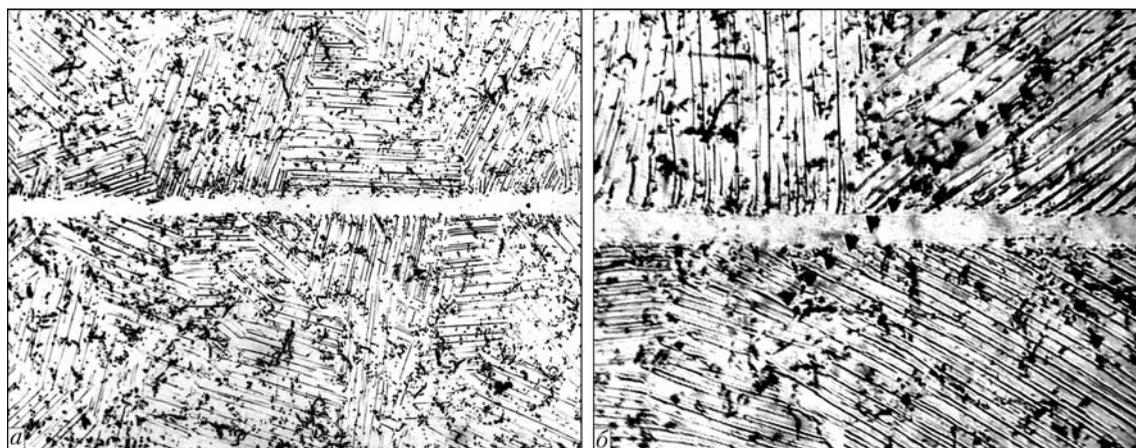


Рис. 6. Микроструктура зоны соединения сплава на основе интерметаллида $\gamma\text{-TiAl}$ (Ti-48Al-2Nb-2Mn), полученного диффузионной сваркой (температура $1200 \text{ }^\circ\text{C}$) с использованием нанослойной фольги, соответствующей по химическому составу интерметаллидному соединению $\gamma\text{-TiAl}$: а, $\times 200$; б, $\times 300$; \blacktriangledown — отпечатки алмазного индентера

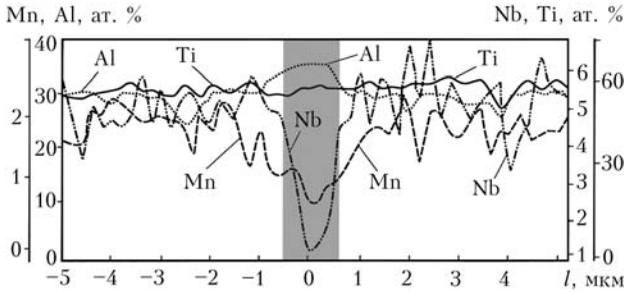


Рис. 7. Характер распределения марганца, алюминия, ниобия и титана в зоне соединения сплава на основе интерметаллида γ -TiAl (Ti-48Al-2Nb-2Mn), полученной диффузионной сваркой при 1200 °С с использованием нанослойной фольги, соответствующей по химическому составу интерметаллидному соединению γ -TiAl: l — расстояние от оси шва

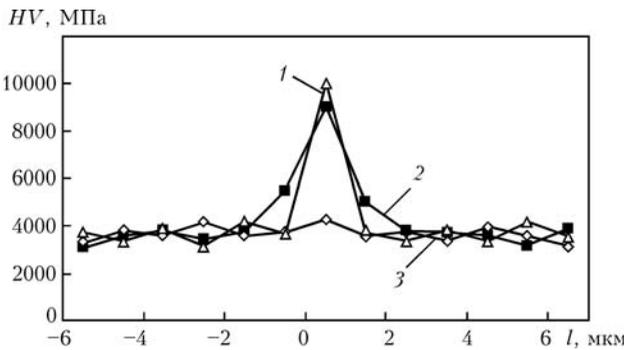


Рис. 8. Характер распределения микротвердости HV в зоне шва при диффузионной сварке интерметаллидного сплава Ti-48Al-2Nb-2Mn с применением прослоек из нанослойных фольг различных систем: 1 — Ni-Al; 2 — Ti-Ni; 3 — Ti-Al

Изложенное выше подтверждает, что с помощью диффузионной сварки в вакууме с использованием нанослойных фольг Ti/Al можно получить качественные однородные равнопрочные с основным материалом соединения интерметаллидного сплава Ti-48Al-2Nb-2Mn.

Сварка трением с перемешиванием без присадки квазикристаллического жаропрочного сплава системы Al-Fe-Cr-Ti является примером получения оригинального сплава с квазикристаллическим упрочнением и нового способа сварки трением с послойным перемешиванием металла шва (рис. 9, а). Благодаря интенсивной пластической деформации в условиях трехмерного сжатия при сварке трением с перемешиванием улучшается структура металла шва и его механические свойства.

Жаропрочный алюминиевый сплав на основе системы Al-Fe-Cr-Ti представляет собой экструдированные полуфабрикаты с наноструктурной матрицей, образовавшейся при быстрой кристаллизации исходного материала в виде мельчайших гранул (фактически порошков) с частицами размером менее 100 мкм. Упрочнение сплава обусловлено наличием в его составе наноразмерных квазикристаллических частиц интерметаллидов [14]. Интерметаллидные фазы, входящие в состав указанного сплава, содержат переходные тугоплав-

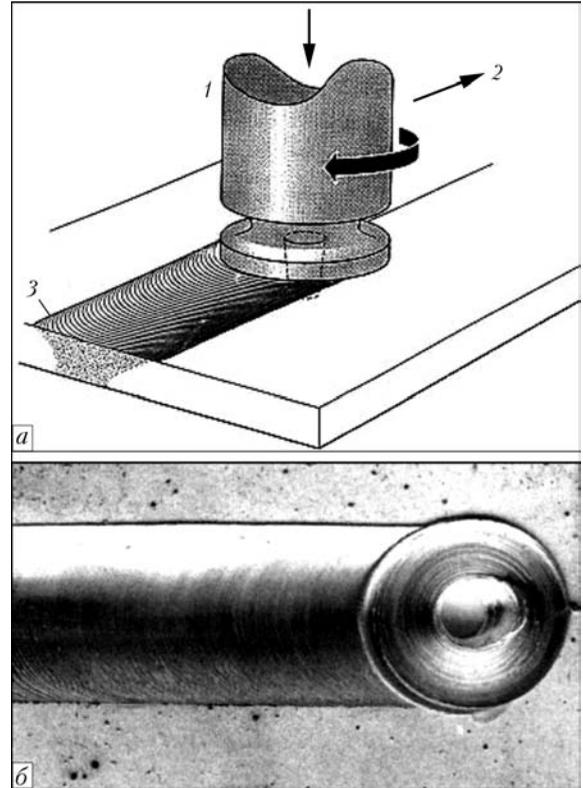


Рис. 9. Схема процесса сварки трением с перемешиванием нанодисперсного алюмокомпозита Al+7% Al_2O_3 (а) и внешний вид шва (б): 1 — вращаемый рабочий инструмент; 2 — направление перемещения инструмента при сварке; 3 — шов

кие элементы, которые упрочняют твердый раствор (алюминиевую матрицу) и уменьшают в нем скорость диффузии (рис. 10, 11). Экструдированные полуфабрикаты характеризуются следующими механическими свойствами: $\sigma_{0,2} = 485$ МПа; $\sigma_B = 542$ МПа; $\delta = 7\%$ (при комнатной температуре); $\sigma_{0,2} = 283$ МПа, $\sigma_B = 297$ МПа и $\delta = 3,5\%$ (при 300 °С). Сплав представляет собой новый класс материалов, предназначенный для использования в технике в случаях, когда необходимы уменьшение массы конструкции, работающей при повышенной (до 300..400 °С) температуре и достаточно высокой удельной прочности. Эти требования актуальны для многих видов транспортных конструкций, например, в авиации и двигателестроении.

Результаты исследований процесса сварки трением с перемешиванием и свойств полученных соединений позволили установить, что в металле швов формируется более дисперсная и однородная структура зерен с размером матрицы ($d \leq 300$ нм) и частиц квазикристаллов ($d \leq 100$ нм), чем в основном металле, временное сопротивление разрушению соединений составляет 370 МПа.

Методом сканирующей электронной микроскопии установлен специфический характер структуры основного металла и швов, которая формируется в условиях интенсивной пластической деформации (рис. 12, а, б).

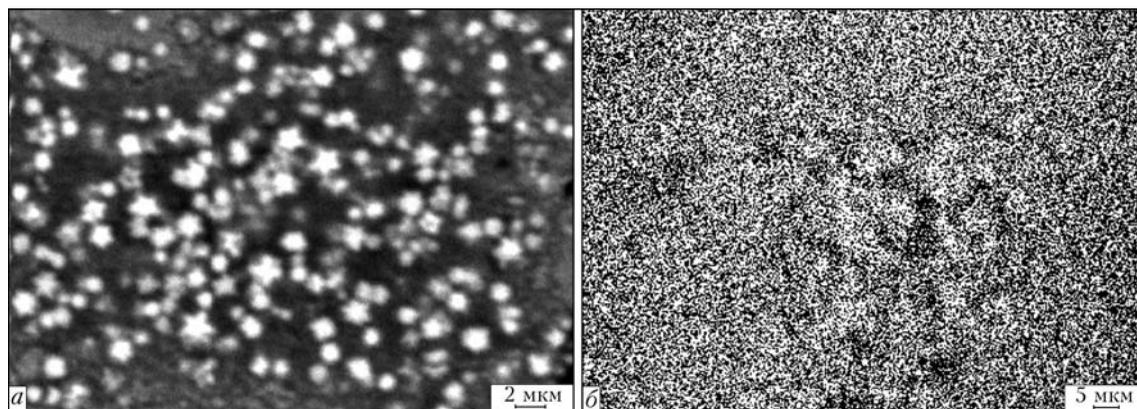


Рис. 10. Квазикристаллические частицы интерметаллидной фазы, выделившиеся в быстрозакристаллизованных мелких гранулах сплава Al-3Fe-3Cr: *a, б* — изображения, полученные соответственно методом сканирующей электронной микроскопии в обратно рассеянных электронах (*a*) и характеристическом рентгеновском излучении (*б*)

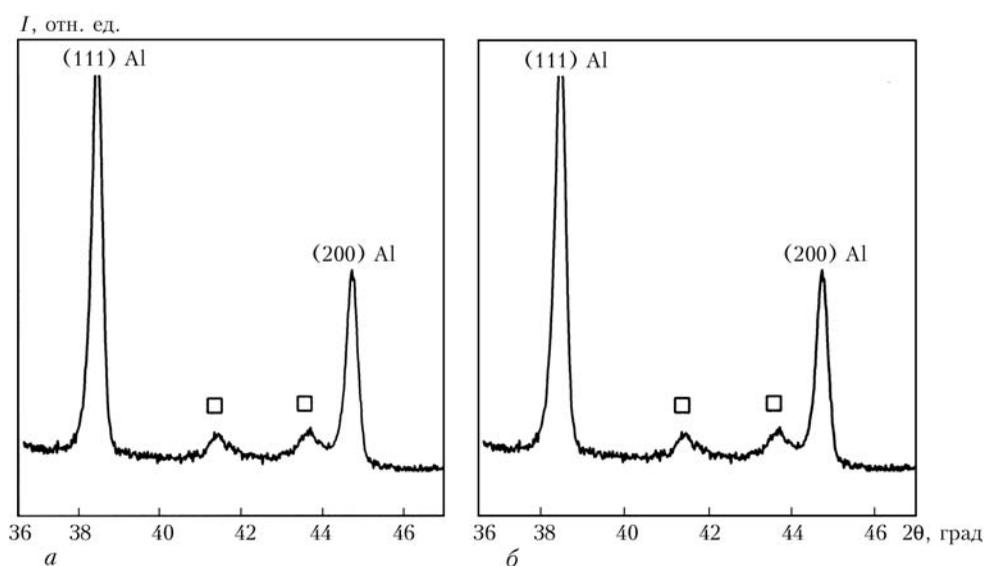


Рис. 11. Рентгеновская дифракция мелких гранул сплавов Al-3Fe-3Cr (*a*) и Al-2,5Fe-2,5Cr-0,5Ti-0,5Zr (ат. %) (*б*): □ — квазикристаллическая фаза

Сварка трением с перемешиванием без присадок нанодисперсного алюмокомпозита Al+Al₂O₃ является еще одним примером внедрения в производство новых разработок. Электронно-лучевая парофазная технология дает возможность изготовить компактные заготовки наноструктурного материала в виде листов [7, 15], а также других форм, типичных для объемных конструкций (цилиндрических, конических, полусфер). При этом сварка трением с многослойным перемешиванием обеспечивает их соединение в условиях, при которых в значительной мере сохраняются свойства основного металла.

Экспериментальная проверка этой идеи была начата со сварки трением с перемешиванием образцов тонколистового алюмокомпозита, армированного нерастворимыми частицами оксида Al₂O₃. Такой материал работает при более высокой температуре, чем обычные алюминиевые сплавы.

Структура композита характеризуется столбчатыми кристаллами, направленными нормально

по отношению к поверхности плоских образцов (рис. 12, *в, г*). Оксидные включения имеют размеры 10...50 нм, распределены равномерно, расстояние между частицами составляет 60...100 нм. Твердость композита HRB 99...100 МПа, а его прочность — $\sigma_b = 340$ МПа.

Пластины нанодисперсного композита Al+7 % Al₂O₃ соединяли сваркой трением с перемешиванием со скоростью 14 м/ч, скорость вращения рабочего инструмента составляла 1420 об/мин. Внешний вид полученного шва приведен на рис. 9, *б*. Металлографическими исследованиями установлено, что в процессе сварки в зоне соединения происходит превращение столбчатых кристаллов алюминия в равноосные зерна, их размер при этом уменьшается в 3...5 раз (рис. 12, *в, г*). Твердость основного металла составляет 680...700 МПа, а металла шва — 780...900 МПа. Сварка трением с перемешиванием обеспечивает равнопрочные с основным материалом соединения благодаря улучшению однородности и дисперсного состояния структурных составляющих.

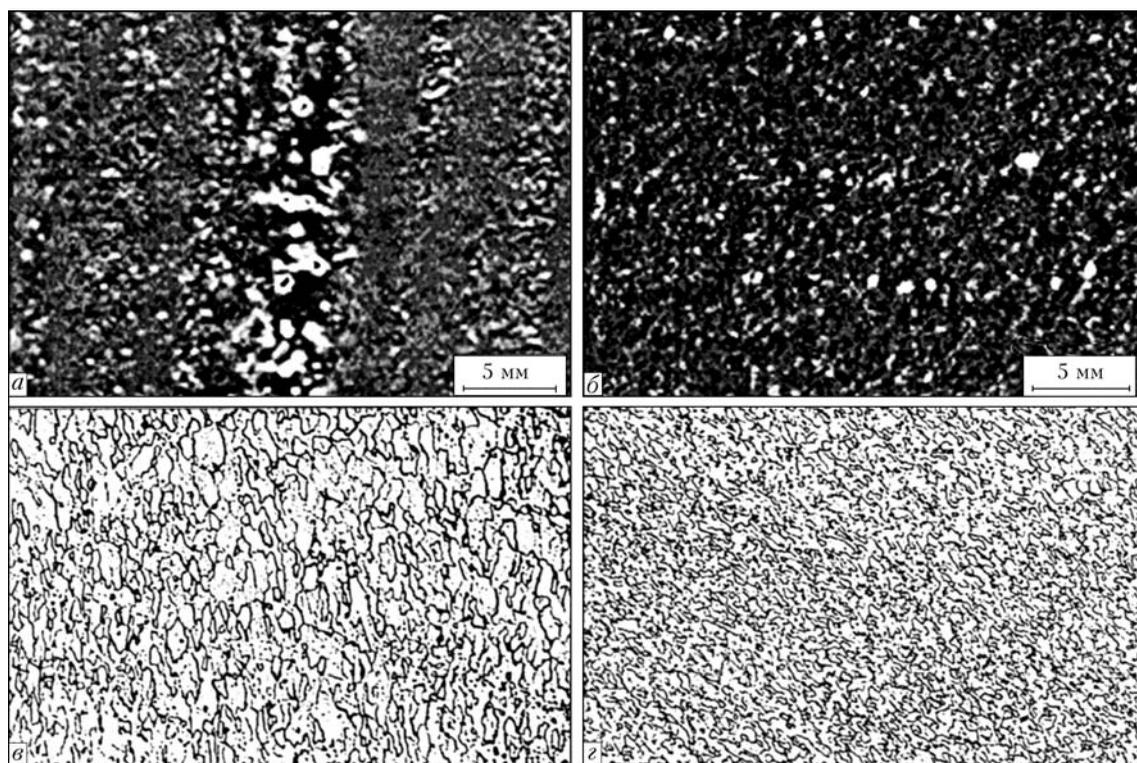


Рис. 12. Микроструктура основного металла (*a, б*) и металла швов (*б, з*), выполненных сваркой трением с перемешиванием: *a, б* — экструдированная полоса из квазикристаллического сплава системы Al–Cr–Fe; *в, з* — нанодисперсный алюмокомпозит Al+7% Al₂O₃ (×400)

Таким образом, рассмотрены примеры неразъемного соединения трудносвариваемых обычных и нанодисперсных материалов с использованием наноструктурных присадок в виде лент, фольг и пленок, изготовленных способом послышной консолидации металлов из паровой фазы с применением электронно-лучевой технологии. Для их практического применения при сварке различных металлических материалов созданы тонкие фольги из активированных многослойных наноструктурных композиций Ti/Al, Ni/Al, Ni/Ti и других из металлов, склонных к реакции СВС интерметаллидных соединений.

Новые технологии соединения различных видов наноструктурных материалов реализуются с помощью диффузионной сварки или сварки трением с перемешиванием. Благодаря использованию новых присадок и технологий сварки появилась возможность успешно соединять новые конструкционные материалы с особыми свойствами, такими, как у интерметаллида систем Ni–Al и Ti–Al, высокопрочные квазикристаллические алюминиевые сплавы, нанодисперсные или нанослойные легкие композиционные материалы. Диффузионная сварка позволяет соединять преимущественно компактные малогабаритные изделия и узлы для авиационных и ракетных двигателей, а также применяется при изготовлении оборудования для атомной энергетики, электротехники, электроники. Сварку трением с перемешиванием используют при изготовлении изделий, име-

ющих большие размеры и разнообразную форму, например, плоские полотнища и оболочки, панели и объемные каркасы, емкости для жидкого топлива, корпуса различных машин. При этом выполняют стыковые, угловые или нахлесточные швы (прямые и криволинейные, протяженные, прерывистые, точечные) [5].

Авторы приносят искреннюю благодарность за активное участие в проведении данного исследования члену-корреспонденту НАН Украины Ю. В. Мильману, кандидатам техн. наук А. И. Сирко и Л. А. Олиховской, доктору техн. наук Г. К. Харченко, кандидатам техн. наук Ю. В. Фальченко и А. Г. Покляцкому, инженерам В. Е. Федорчуку, А. Н. Муравейник, Ю. А. Хохловой, А. А. Чайке.

1. Мовчан Б. А. Электронно-лучевая технология испарения и осаждения из паровой фазы неорганических материалов с аморфной, нано- и микроразмерной структурой // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. — 2004. — 2, № 4. — С. 1103–1126.
2. Inoue A., Kimura H. High-strength aluminum alloys containing nanoquasicrystalline particles // Mater. Sci. and Eng. A. — 2000. — 286, № 1. — P. 1–10.
3. Устинов Ф. И., Олиховская Л. А., Полищук С. С. Метастабильные наноструктурные состояния в покрытиях системы Ni–Al, полученных осаждением из паровой фазы // Металлофиз. и новейшие технологии. — 2006. — № 6. — С. 32–37.
4. Исследование структуры сварных соединений дисперсно-упрочненного алюминиевого сплава / В. Р. Рябов, А. Н. Муравейник, А. А. Бондарев и др. // Технология легких сплавов. — 1999. — № 1/2. — С. 139–144.



5. Ищенко А. Я., Подъяельников С. В., Поляцкий А. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2007. — № 11. — С. 32–38.
6. Milman Yu. V. Mechanical behavior of nanostructured aluminum alloys containing quasicrystalline phase // Mater. Sci. Forum. — 2005. — 482. — P. 77–82.
7. Свариваемость нанодисперсного материала системы Al–Al₂O₃, полученного конденсацией из паровой фазы / А. Я. Ищенко, Н. Г. Третьяк, А. В. Лозовская, М. Р. Яворская // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 16–19.
8. Твердофазное соединение в вакууме дисперсно-упрочненных композиционных материалов / А. Я. Ищенко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко и др. // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. — 2006. — 4, № 3. — С. 747–756.
9. Диффузионная сварка микродисперсного композита AMg5+27 % Al₂O₃ с применением нанослойной фольги NiAl / А. Я. Ищенко, Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 7. — С. 5–9.
10. Поварова К. Б., Банных О. А. Принципы создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов // Материаловедение. — 1999. — Ч. 1. — № 2. — С. 27–33; Ч. 2. — 1999. — № 3. — С. 29–37.
11. Сварка давлением интерметаллидного сплава γ -TiAl / А. Н. Юштин, В. Н. Замков, В. К. Сабокарь, П. Н. Чвертко // Автомат. сварка. — 2001. — № 1. — С. 16–19.
12. Solid-state diffusion bonding of gamma-TiAl alloys using Ti/Al thin films as interlayers / L. I. Duarte, A. S. Ramus, M. F. Vieira et al. // Intermetallics. — 2006. — № 14. — P. 1151–1156.
13. Diffusion welding of gamma-TiAl based alloys through nanolayered foil of Ti/Al system / A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, A. Ya. Ishchenko et al. // Ibid. — 2008. — № 16. — P. 1043–1045.
14. High strength aluminum alloys reinforced by nanosize quasicrystalline particles for elevated temperature application / Yu. V. Milman, A. I. Sirko, M. O. Iefimov et al. // High Temperature Materials and Processes. — 2006. — 25, № 12. — P. 19–29.
15. Поляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Яворская М. Р. Прочность соединений тонколистовых алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием // Автомат. сварка. — 2007. — № 9. — С. 50–53.

The paper deals with solid-phase joinability of advanced structural quasi-crystalline and intermetallic alloys, alumocomposites and nanomaterials by diffusion bonding and friction stir welding in the presence of nanostructured fillers. It is shown that these processes allow producing permanent joints of difficult-to-weld materials applied in fabrication of aerospace products, gas turbine engine parts, electrical engineering and heat exchanger units, in repair and restoration operations.

Поступила в редакцию 05.09.2008

ГОРНАЯ ТЕХНИКА НКМЗ ВОСТРЕБОВАНА В РОССИИ

Новокраматорский машиностроительный завод (г.Краматорск, Донецкой обл.) реализовал крупный контракт по разработке, производству и поставке в Россию очередной партии современной горной техники.

В адрес одного из крупных на постсоветском пространстве — Стойленского горно-обогатительного комбината (г. Старый Оскол, Белгородской обл.) — отгружена последняя из четырех заказанных рудоразмольных мельниц нового поколения.

Мельницы модели МШЦУ 550056500А производительны, надежны в эксплуатации и экономичны. Этому способствовала реализация в них прогрессивных технических решений по обеспечению большей жесткости и несущей способности, увеличению объема помольной камеры и т. д. Машины оснащены современными средствами механизации монтажа и ремонтных работ, что делает их удобными в работе, значительно увеличивает межремонтные циклы.