



СВАРКА СПЛАВОВ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА (Обзор)

С. В. ЧЕРНОБАЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Одним из наиболее перспективных направлений в области разработки новых металлических материалов с высоким уровнем жаростойкости и термической стабильности является создание интерметаллидных сплавов системы Ti–Al. Эти сплавы в ближайшем будущем могут составить серьезную конкуренцию суперсплавам на основе никеля, так как алюминиды титана более легкие, не требуют для легирования дорогостоящих и дефицитных элементов. Кроме того, они обладают высокой коррозионной стойкостью, стойкостью к высокотемпературному окислению, а также имеют высокий модуль упругости и прочности. Алюминиды титана можно успешно использовать в виде литых изделий, например, клапанов сверхмощных двигателей внутреннего сгорания; в качестве жаростойких покрытий на лопатках газотурбинных двигателей, подвергающихся воздействию высокотемпературных газовых потоков; как конструкционный материал, работающий при статических нагрузках и больших температурах. Широкому промышленному применению алюминидов титана препятствует их низкая пластичность при комнатной температуре. Это значительно усложняет технологическую обработку и тормозит промышленное применение указанных сплавов. Поэтому использование алюминидов титана в конструкциях различного назначения зависит от создания эффективных процессов их обработки, в том числе и сварки. В связи с этим цель настоящего обзора — анализ современных разработок способов соединения материалов на основе алюминидов титана с помощью различных видов сварки. Анализ литературных данных, приведенных в обзоре, показал, что формирование сварных соединений с применением традиционных способов сварки, основанных на локальном плавлении материала, имеет ряд недостатков, которые можно устранить при использовании разных способов сварки в твердой фазе. Результаты, представленные в опубликованных работах, свидетельствуют о перспективности использования промежуточных вставок для соединения трудносвариваемых сплавов на основе алюминидов титана. Библиогр. 36, рис. 5.

Ключевые слова: алюминид титана, сварка плавлением, температура, способы соединения, сварка давлением, структура, вставка, сварной шов, микроструктура

Создание современного авиационного двигателя — сложнейший комплексный процесс, базирующийся на новейших достижениях в области аэро- и термодинамики, материаловедения, технологии, прочности, электроники, информатики. Важные задачи, решаемые при проектировании двигателей новых поколений, — снижение стоимости производства и эксплуатации, в том числе путем упрощения конструкции и снижения количества деталей и узлов [1].

Повышение эффективности авиадвигателей и аналогичных силовых установок становится невозможным без использования принципиально новых конструкционных материалов. К таким материалам относятся сплавы на основе интерметаллидных фаз γ -TiAl. Благодаря уникальному комплексу физических и механических свойств [2, 3] (высокой прочности и модулю упругости, низкой плотности, жаропрочности и жаростойкости, высоким антикоррозионным свойствам, хорошему сопротивлению усталостному разрушению и ползучести), они много лет сохраняют свои позиции в разряде перспективных для авиационной, транспортной промышленности и в энергостроении.

Широкому промышленному применению алюминидов титана препятствует их низкая пластич-

ность при комнатной температуре [4], связанная с низкой кристаллографической симметрией и недостаточным числом систем скольжения; низкой прочностью скола; слабостью границ зерен, а также низкие технологические свойства [2].

Улучшение технологических свойств этих материалов может быть обеспечено не только микро- и макролегированием [5], но и микроструктурным строением сплава. В работе [6] показаны три основных типа структур интерметаллида титана: lamellar (пластинчатая), рекристаллизованная и смешанная (дулексная). Авторы работы [7] показывают, что мелкодисперсная двухфазная дулексная структура сплавов на основе Ti–Al обладает наилучшей пластичностью, но при этом снижается другая не менее важная характеристика — вязкость сплава. Оптимальным вариантом является получение сплавов с полностью lamellar двухфазной $\gamma+\alpha_2$ структурой с определенным количеством γ и α_2 фаз в сплаве [7].

Сплавы на основе алюминидов титана с различными типами структур, кроме авиационной [5, 8–10], могут применяться в различных отраслях промышленности: газо- и нефтеперерабатывающей, химической, а также в атомном и транспортном машиностроении [11, 12].

Распространению сплавов на основе γ -TiAl в производстве способствуют современные интен-



сивные исследования по их свариваемости и разработка эффективных мер по повышению прочности и надежности сварных соединений.

В связи с этим цель настоящего обзора — анализ современных разработок способов соединения материалов на основе алюминидов титана с помощью различных видов сварки.

Дуговая сварка. В работе [13] приведены результаты исследований свариваемости сплава с литой структурой γ -TiAl (48 ат. % Al и по 2 ат. % Cr и Nb). Сварку алюминидов титана проводили без предварительного подогрева с регулированием тока в диапазоне 50...1500 А. В результате было установлено, что микроструктура металла зоны шва состоит из столбчатых и равноосных дендритных структур.

Механические свойства металла шва оказались ниже чем у основного металла, что и было установлено в результате испытаний на растяжение (рис. 1). В то же время при сварке на низких токах, в соединении были обнаружены трещины, которые образовывались в результате увеличения количества α_2 -фазы.

В работе [14] исследована свариваемость указанного выше сплава. Перед сваркой все образцы поддавали горячему изостатическому прессованию, часть из них термически обработали при температуре 1300 °С в течение 20 ч. В результате образовалась кристаллическая структура, состоящая из γ -фазы, колонии $\gamma+\alpha_2$ и фаз Лавеса. Растрескивание наблюдали во всех сварных швах, как после изостатического прессования, так и без него.

Bharani и Acoff проводили сварку указанного выше сплава алюминида титана и деформированного сплава γ -TiAl (46 ат. % Al, 2 ат. % Cr, 2 ат. % Nb, 0,9 ат. % Mo) без предварительного подогрева. Установлено, что можно добиться уменьшения протяженности длины трещины в

сварном соединении только за счет проведения термообработки после сварки при температуре 615 °С [15].

Электронно-лучевая сварка. По мнению авторов работ [16, 17] сварка плавлением алюминидов титана может осуществляться лишь с предварительным подогревом до 250...650 °С. Это связано с тем, что в связи с низкой пластичностью (вплоть до 700 °С) алюминиды титана весьма чувствительны к напряжениям, которые появляются в условиях неравномерного нагрева при сварке и, следовательно, склонны к возникновению холодных поперечных трещин в сварных соединениях.

В работах [16,17] указана температура предварительного подогрева без каких-либо дополнительных уточнений, а в работе [18] для предотвращения возникновения поперечных трещин в сварных соединениях рекомендуется предварительный подогрев свариваемых образцов до температуры 400...500 °С. На деталях локальных швов или наплавов в ремонтных целях температура предварительного подогрева должна быть не менее 600 °С. Однако эти параметры установлены только для сплава γ -TiAl (31 ат. % Al и по 2 ат. % Nb и Mn), а предварительный нагрев образцов осуществляется в сварочной камере.

Сварка давлением в вакууме. При проведении исследовательских работ авторы [19] для экспериментов использовали образцы алюминидов титана (диаметр и высота 20 мм), вырезанные из слитка, подвергнутого изостатической обработке при температуре 1260 °С и давлении 170 МПа в течение 4 ч с последующим стабилизирующим отжигом при 1000 °С (50 ч). Массовая доля легирующих элементов и примесей в сплаве составляла, %: 60,95 Ti; 31,15 Al; 4,65 Nb.

Сварку проводили при температуре ниже температуры $\alpha+\gamma$ -перехода, поэтому структура материала практически не изменялась. Этим были устранены явления, обусловленные быстрым охлаждением соединения. В контакте соединяемых поверхностей зафиксирована четко выраженная граница. Образование общих зерен не обнаружено. В ряде образцов по линии контакта имелись как отдельные микропоры, так и их цепочки.

Дальнейшие исследования выполняли с целью выявить особенности структурных превращений в алюминиде титана под воздействием термомодеформационного цикла сварки на следующих режимах: температура $T = 900$ и 1100 °С, время сварки $t = 4...5$ ч, давление $P = 200...300$ МПа [20]. Установлено, что при температуре сварки ниже 900 °С под действием сжимающего сварочного усилия в сплаве возникают транскристаллитные трещины без видимых следов пластической деформации. С увеличением температуры сварки от 900 до 1100 °С морфология структур-

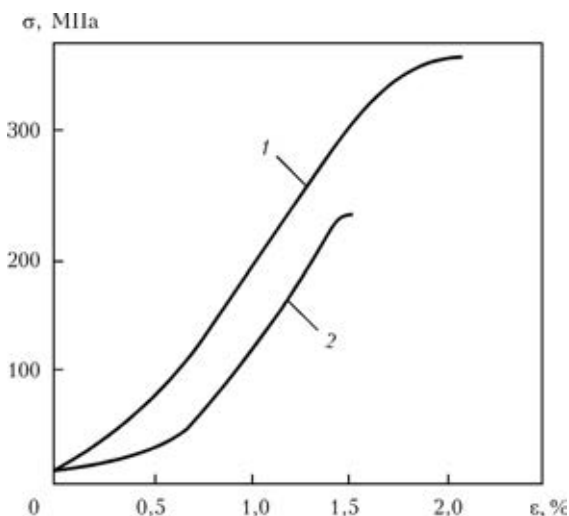


Рис. 1. Зависимость деформаций σ от напряжения ϵ [13] основного металла (1) и зоны шва (2)

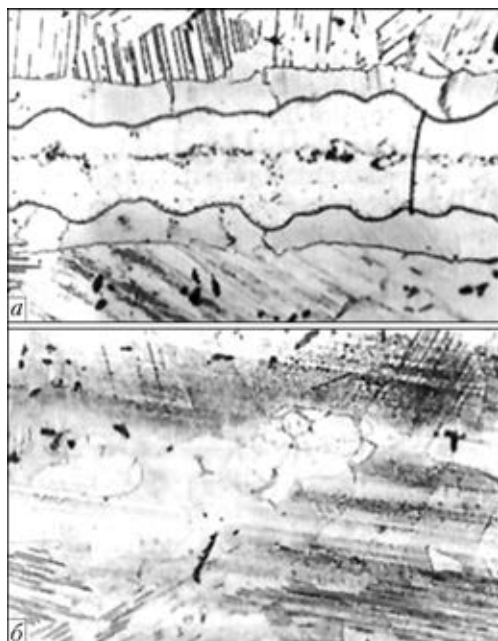


Рис. 2. Микроструктуры сварного соединения сплава γ -TiAl с прослойкой алюминия: *a* — после сварки ($\times 400$); *b* — после сварки и отжига ($\times 200$) [19]

ных элементов изменяется от крупнозернистой пластинчатой до мелкозернистой глобулярной. При температуре 1100 °С в зоне соединения наблюдаются общие зерна, возникающие в результате пластической деформации и последующей рекристаллизации приконтактных объемов металла.

В последующем была изучена возможность сварки алюминидов титана с использованием «мягкой» прослойки [19]. Авторы предположили, что отжиг деталей после сварки с прослойкой приведет к ее растворению в основном металле и к диффузионному выравниванию химического состава в зоне соединения. Поэтому в качестве прослоек были выбраны алюминий и титан — основные легирующие элементы сплава. Толщина прослоек алюминия и титана составила соответственно 0,15 и 0,20 мм. Для экспериментов использовали образцы алюминидов титана (диаметр и высота 20 мм).

Микроструктуры сварных соединений, выполненных с применением алюминиевой и титановой фольги в качестве прослойки, приведены на рис. 2, 3. Установлено, что сварка сплава на основе γ -TiAl с применением алюминиевой и титановой фольги в качестве промежуточных прослоек не обеспечивает необходимого качества соединений. При использовании алюминиевой прослойки удается получить (после сварки и отжига) фазовый и химический составы металла по линии соединения близкие к основному. Но эти соединения не работоспособны из-за наличия дефектов (трещин и микропустот), которые возникают при сварке (рис. 2). В случае же применения титановой фольги сварные соединения как после сварки, так и после сварки и отжига, отличаются оп-

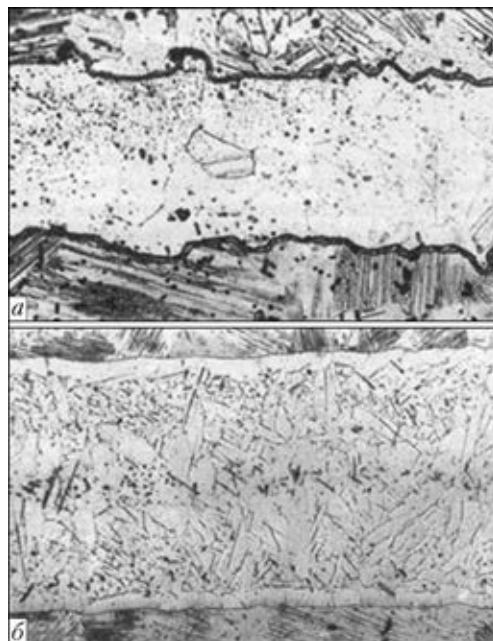


Рис. 3. Микроструктуры сварного соединения сплава γ -TiAl с прослойкой титана: *a* — после сварки ($\times 250$); *b* — после сварки и отжига ($\times 100$) [19]

ределенным уровнем прочности при нормальной температуре. Однако обеспечить жаропрочность таких соединений, близкую к жаропрочности сплава γ -TiAl, не представляется возможным, поскольку зона соединения имеет однофазное строение — α_2 (Ti₃Al) (рис. 3).

Сварка трением. Основными проблемами при получении работоспособных соединений алюминидов титана при сварке трением [21–23] являются: образование микротрещин в зоне термомеханического влияния в процессе деформации [21], растрескивание металла шва в процессе охлаждения [22], значительное повышение твердости зоны соединения [21–23], а также отсутствие оптимальных параметров режима сварки [21–23].

Описание структурных и фазовых изменений, проходящих в плоскости взаимодействия и зоне термического влияния при двух различных режимах (конвенционном и комбинированном) приведено в работе [24]. Установлено, что структура металла в плоскости соединения, полученного при конвенционной сварке, отличается от структуры металла зоны соединения при комбинированном режиме, при котором образуются чрезвычайно мелкие динамически рекристаллизованные зерна γ -TiAl без наличия ламелярной составляющей, незначительным количеством α_2 -фазы и структурным градиентом в радиальном направлении.

Известно, что качество сварного соединения зависит от времени сварки и величины осадки. В работах [25, 26] описаны исследования по свариваемости сплавов γ -TiAl и α_2 -TiAl с использованием нанослойной прослойки фольги Ti/Al при различном времени нагрева. Установлено, что в соединениях, полученных при времени нагрева



$t_n = 1,0$ с, обнаруживается прослойка шириной до 100 мкм, имеющая мелкозернистую структуру. С увеличением времени t_n до 4,0 с обнаруживается структура металла в плоскости соединения и зоне термического влияния свариваемых сплавов характеризуется наличием чрезвычайно мелких, динамически рекристаллизованных зерен. Авторы работы предположили, что формирование мелкозернистой структуры металла в плоскости соединения способствует повышению стойкости металла стыка образованию трещин в процессе охлаждения.

Диффузионная сварка. В работе [27] рассматривали сплав γ -TiAl (49 % Ti, 47 % Al и по 4 % Cr, Mn, Nb, Si, B), полученный способом прецизионного литья и горячего прессования с последующим гомогенизирующим отжигом. Как показали результаты исследований, формирование lamellarной структуры в области сварного шва обеспечивается при следующем режиме сварки: $T = 1000...1100$ °C, $t = 3$ ч, $P = 20...40$ МПа с последующей термообработкой.

В работе [28] представлены результаты исследований, которые проводили на сплаве Ti — 48 ат. % Al, легированном ниобием и марганцем. Соединения алюминиды титана получены диффузионной сваркой в вакууме без прослойки при $T = 1200$ °C и $P = 70$ МПа с последующей выдержкой в течение 20 мин. Микроструктура металла зоны соединения представлена на рис. 4.

Авторы работы установили, что граница раздела представляет собой прослойку интерметаллида, состав которого, по данным локального химического анализа, близок к составу интерметаллида Ti_3Al . Наличие хрупкой интерметаллидной прослойки снижает прочность сварного соединения, что приводит к снижению его эксплуатационных характеристик.

Для совершенствования процессов сварки и улучшения свойств неразъемных соединений сплавов γ -TiAl, авторы работ [29–32] применяли наноструктурные прослойки, которые помещали между свариваемыми поверхностями изделий. Такими прослойками могут быть одно- или многослойные покрытия [29–31] или фольги [32].

В работах [29–31] изучали свариваемость сплава γ -TiAl с применением различных нанослойных покрытий, которые наносили на свариваемые поверхности магнетронным напылением. В работе [31] показано использование покрытий из титана, ванадия, ниобия, хрома и марганца толщиной 0,5...1,5 мкм. В работах [29, 30] — покрытий системы Ti/Al состава Ti — 48...50 ат. % Al, толщина которых составляла 2,0...2,5 мкм при толщине отдельных слоев до 4 нм.

Было установлено [31], что использование покрытий из ванадия, хрома и марганца улучшает пластичность сварных соединений сплавов γ -TiAl,

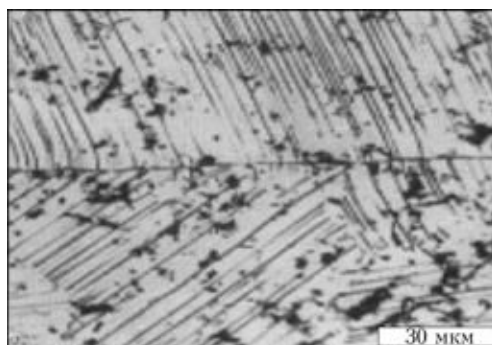


Рис. 4. Микроструктура металла зоны соединения сплава γ -TiAl, полученного диффузионной сваркой в вакууме [28]

при атомной доле указанных выше элементов в сварном соединении на уровне 1...3 %.

В работах [29, 30] показано, что осаждение тонких нанослойных покрытий Ti/Al на соединяемых поверхностях обеспечивает в процессе диффузионной сварки при температуре 1000 °C формирование в зоне соединения однородной микроструктуры. Авторы сделали заключение, что формирование прочного сварного соединения в области температур 700...1100 °C связано с динамической рекристаллизацией сплава γ -TiAl, которая приводит к измельчению структуры и обеспечивает прохождение пластической деформации.

Исследование свариваемости сплава на основе γ -TiAl с применением нанослойных прослоек, полученных по технологии, описанной в [33], провели авторы работ [32]. Сварку проводили на образцах размером 10×10×6 мм из интерметаллида γ -TiAl (48 ат. % Al, 2 ат. % Nb, 2 ат. % Mn), для которого были выбраны следующие промежуточные прослойки: Ti/Al (Ti — 38 ат. % Al), Ni/Ti (Ti — 44 ат. % Ni) и Ni/Al (Al — 46 ат. % Ni) (рис. 5).

Авторами установлено, что в процессе диффузионной сварки образцов γ -TiAl с использованием нанослойных прослоек Ni/Ti и Ni/Al в зоне соединения формируется переходная зона, неоднородная по структуре и составу [32]. При использовании нанослойной прослойки Ti/Al в зоне соединения формируется интерметаллид, состав которого соответствует исходному интерметаллиду γ -TiAl, послойно с нанометрическими периодами (меньше 200 нм) переходящий в γ -TiAl. Такие изменения состава и структуры металла в зоне соединения свидетельствуют о высокой диффузионной подвижности компонентов, что может быть обусловлено процессами тепловыделения, сопровождающими твердофазные реакции, инициированные в нанослойной фольге при нагреве [34].

Контактная сварка. В работе [35] приведены результаты исследований особенностей формирования сварных соединений на основе γ -TiAl по технологии контактной стыковой сварки сопро-

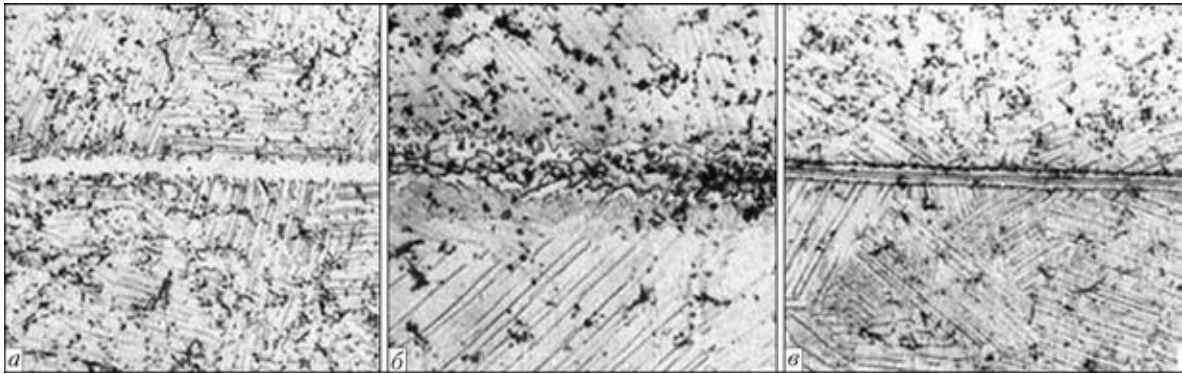


Рис. 5. Микроструктуры зоны соединения сплава γ -TiAl при диффузионной сварке с использованием нанослойных прослоек [32]: а — Ti/Al ($\times 200$), б — Ni/Ti ($\times 200$), в — Ni/Al ($\times 400$)

тивлением. Такая технология обеспечивает локальный высокоскоростной ввод тепла в зону соединения [36], что предотвращает разупрочнение металла. Учитывая опыт предыдущих разработок по контактно-стыковой сварке сложносвариваемых материалов [37], сварку сплавов на основе γ -TiAl проводили с использованием наноструктурных фольг системы Ti/Al. При использовании фольги, состоящей из слоев титана и алюминия, происходит дополнительное выделение тепла в зоне контакта, обусловленное протеканием экзотермической реакции между металлами, благодаря чему время сварки уменьшается в среднем на 0,5...0,7 с. Дополнительно в работе показано, что для обеспечения однородности нагрева, улучшения формирования и свойств сварных соединений необходимо использовать нанослойные фольги. Толщина фольги может изменяться от 60...100 мкм.

Выводы

1. Применение традиционных способов сварки, основанных на локальном плавлении материала в зоне соединения, показало, что качество полученного сварного соединения существенно зависит от фазовых превращений в участке зоны термического влияния. При отклонении режима сварки от оптимального в зоне соединения происходят фазовые превращения, сопровождающиеся объемными эффектами, что приводит к возникновению напряжений в участке зоны термического влияния и, как результат, вблизи нее образуются трещины.

2. Наиболее высокие показатели механических свойств соединений алюминидов титана получены при диффузионной сварке с использованием тонких прослоек. Однако, промышленного применения этот способ сварки не нашел. Одним из главных недостатков диффузионной сварки является необходимость длительного нагрева до высоких температур ($T = 1000...1100$ °C) всего свариваемого изделия и наличие вакуума.

3. Применение композиционных прослоек при использовании контактной стыковой сварки сопотвляением позволяет получить более равномер-

ный и концентрированный нагрев, и, как результат, — качественные соединения деталей небольшого сечения ($100...200$ мм²) из алюминидов титана, что свидетельствует о возможности использования таких технологий при промышленном изготовлении различных узлов массового производства.

4. Результаты, представленные в опубликованных работах, свидетельствуют о высокой эффективности применения наноструктурных прослоек для соединения трудносвариваемых сплавов γ -TiAl.

1. Мухин В. С. Основы технологии машиностроения (авиадвигателестроения). — Уфа: Изд-во УГАТУ, 2007. — 459 с.
2. Павлич С. П., Зайцев М. В. Применение интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений // Вест. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. — 2011. — 15, №4. — С. 200–202.
3. Иванов В. И., Ясинский К. К. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti₃Al и TiAl для работы при температурах 600...800 °C в авиационной технике // Технол. легк. сплавов. — 1996. — № 3. — С. 7–12, 93.
4. Lipsitt H. A., Shechtman D., Schafrick R. E. The plastic deformation of TiAl // Met. Trans. A. — 1975. — 6. — P. 1991–1998.
5. Froes F. H., Suryanarayana C., Eliezer D. Production, characteristics and commercialization of titanium aluminides // ISIJ Intern. — 1991. — 31, № 10. — P. 1235–1248.
6. Польшин И. С., Колачев Б. А., Ильин А. А. Алюминиды титана и сплавы на их основе // Технол. легк. сплавов. — 1997. — № 3. — С. 32–39.
7. Микроструктура и пластическая деформация орторомбических Ti₂AlNb сплавов II. Структура и фазовые превращения при сильной деформации / Н. В. Казанцева, Б. А. Гринберг, Н. П. Гуляева и др. // Физ. металла и металловедение. — 2003. — 96, № 4. — С. 23–32.
8. Kim Y.-W., Dimiduk D. M. Progress in the understanding of gamma titanium aluminides // JOM. — 1991. — № 8. — P. 40–47.
9. Механические свойства литых сплавов γ -TiAl / О. А. Банных, К. Б. Поварова, Г. С. Браславская и др. // Металловедение и терм. обработка мет. — 1996. — № 4. — С. 11–14.
10. Boggs Robert N. Titanium aluminide true space-age material // Des. News. — 1989. — 45, № 12. — P. 51–53.
11. Анташаев В. Г., Иванов В. И., Ясинский К. К. Разработка технологии получения литых деталей из интерметаллидного сплава TiAl и их использование в конструкциях // Техн. легк. сплавов. — 1996. — № 3. — С. 20–23.



12. *Хино Н., Нисияма Ю.* Использование алюминидов титана // *Metals Technol.* — 1990. — **60**, № 7. — P. 70–76.
13. *Arenas M. F., Acoff V. L.* Analysis of gamma titanium aluminum welds produced by gas tungsten arc welding // *Welding J.* — 2003. — № 5. — P. 110–115.
14. *Kelly T.* Repair welding of gamma titanium aluminide castings // *Proc. of the 3rd Intern. SAMPE metals conf., Covina, 25–30 May 1992.* — Covina: SAMPE, 1992. — P. 183–191.
15. *Bharani D. J., Acoff V. L.* Autogenous gas tungsten arc weldability of cast alloy Ti–48Al–2Cr–2Nb (atomic percent) versus extruded alloy Ti–46Al–2Cr–2Nb–0,9Mo (atomic percent) // *Met. and Mater. Trans. A.* — 1998. — **29**, № 13. — P. 927–935.
16. *Titanium aluminide: electron beam weldability* / R. A. Paterson et al. // *Welding J.* — 1990. — № 1. — P. 39–44.
17. *The effect of postweld heat treatment on the structure and properties of electron beam welded Ti–48Al–2Cr–2Nb* / C. M. Jensen, H. Zhang, W. A. Baeslack, T. J. Kelly // *Abs. of papers, presented at 79th AWS annual meeting.* — Miami: AWS, 1998. — P. 179–180.
18. *Выбор температуры предварительного подогрева γ -алюминидов титана при ЭЛС* / Г. К. Харченко, А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко и др. // *Автомат. сварка.* — 2001. — № 11. — С. 20–23.
19. *Сварка давлением интерметаллического сплава γ -TiAl* / А. Н. Юштин, В. Н. Замков, В. К. Сабокаръ и др. // *Там же.* — 2001. — № 1. — С. 33–37.
20. *Особенности структурных изменений жаропрочного сплава на основе Ti₃Al при сварке давлением в вакууме* / В. Н. Замков, Л. И. Маркашова, Л. С. Киреев, И. К. Тяпко // *Там же.* — 1992. — № 9–10. — С. 13–16.
21. *Baeslack W., Threadgill P., Nicholas E.* Linear friction welding of alpha-two titanium aluminide // *TWI Research Report.* — 1992. — **442**. — P. 204–210.
22. *Miyashita T., Hino H.* Friction welding characteristics of TiAl intermetallic compound // *J. Japan Inst. Metals.* — 1994. — **58**, № 2. — P. 215–220.
23. *Linear friction welding of Ti–48Al–2Cr–2Nb (at. %) titanium aluminide* / W. Baeslack, P. Threadgill, E. Nicholas, T. Broderick // *Proc. of the 8th World conf. on titanium, Birmingham, 22–26 Oct. 1995.* — Birmingham: Inst. of Materials, 1995. — P. 424–431.
24. *Кучук-Яценко С. И., Зяхор И. В.* Особенности сварки трением алюминидов титана // *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Мат. 9-й Ежегод. междунар. конф., Славское, 9–13 февр. 2009 г.* — Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2009. — С. 442–445.
25. *Зяхор И. В., Кучук-Яценко С. И., Устинов А. И.* Использование нанослоистой фольги системы Ti–Al при сварке трением сплавов на основе алюминидов титана // *Славянские чтения: Тр. конф., Липецк, 4–5 июня 2009 г.* — Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2009. — С. 338–343.
26. *Зяхор И. В., Кучук-Яценко С. И.* Структура соединений алюминидов титана при сварке трением с применением нанослойной фольги системы Ti–Al // *Быстрозакаленные материалы и покрытия: Тр. 8-й Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф., Москва, 30 нояб.–1 дек. 2009 г.* — М.: МАТИ, 2009. — С. 51–56.
27. *Cam G., Bohm K.-H., Kocak M.* Diffusionsschweissen feingegossener Titanaluminide // *Schweissen und Schneiden.* — 1999. — № 8. — S. 470–475.
28. *Получение неразъемных соединений сплавов на основе γ -TiAl с использованием нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме* / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, А. Я. Ищенко и др. // *Автомат. сварка.* — 2009. — № 1. — С. 17–21.
29. *Solid-state diffusion bonding of gamma-TiAl alloys using Ti/Al thin films as interlayers* / L. I. Duarte, A. S. Ramos, M. F. Viera et al. // *Intermetallics.* — 2006. — № 14. — P. 1151–1156.
30. *Nanometric multilayers: A new approach for joining TiAl* / A. S. Ramos, M. T. Viera, L. I. Duarte et al. // *Ibid.* — 2006. — № 14. — P. 1157–1162.
31. *Yan R., Somekh R. E., Wallach E. R.* Solid-state bonding of TiAl with interlayers // *Proc. of the 3rd Intern. conf. on trends in welding research, Gattinburg, Tennessee, USA 1–5 Jun. 1992.* — Ohio: ASM International, Materials Park, 1992. — P. 1063–1067.
32. *Диффузионная сварка в вакууме сплава на основе γ -TiAl с использованием нанослойных прослоек* / Г. К. Харченко, А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко и др. // *Автомат. сварка.* — 2011. — № 3. — С. 7–11.
33. *Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг TiAl, полученных методом электронно-лучевого осаждения* / А. И. Устинов, Л. А. Олиховская, Т. В. Мельниченко и др. // *Спец. электротехнология.* — 2008. — № 2. — С. 21–28.
34. *Особенности контактной сварки алюминидов титана с использованием нанослойных алюминидо-титановых фольг* / В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швеиц, А. Г. Сахацкий, А. А. Наконечный // *Автомат. сварка.* — 2009. — № 3. — С. 19–22.
35. *Кочергин А. К.* Контактная сварка. — Л.: Машиностроение, 1987. — 240 с.
36. *Особенности контактной стыковой сварки алюминиевых сплавов с использованием наноструктурных алюминидо-никелевых и алюминидо-медных фольг* / В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швеиц, А. Г. Сахацкий, А. А. Наконечный // *Свароч. пр-во.* — 2007. — № 9. — С. 12–14.

Поступила в редакцию 01.03.2013