

УДК 621.791

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

КУЛИКОВСКИЙ Р.А.¹, *к.т.н., доцент*

ПАХОЛКА С.Н.², *аспирант*

ПАВЛЕНКО Д.В.³, *к.т.н., доцент*

¹ Кафедра оборудования и технологии сварочного производства, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, г. Запорожье, Украина тел. +38(061) 769-83-88 kulikovski@meta.ua ORCID ID: 0000-0001-8781-2113

² АО «Мотор Сич», 69068, г. Запорожье, Украина, пр-т Моторостроителей, 15

³ Кафедра технологий авиационных двигателей, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина тел. +38(061) 769-82-69 dvp_zntu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-6376-2879

Обоснована возможность частичной замены жаропрочных никелевых сплавов при изготовлении деталей газотурбинных авиадвигателей на алюминиды титана. В интервале температур эксплуатации 600...900 °С по удельной прочности они превосходят все жаропрочные никелевые сплавы. Рассмотрены вопросы формообразования деталей газотурбинных авиадвигателей из алюминидов титана. Низкая пластичность характерная для интерметаллидов титана усложняет их технологическую обработку и является основным препятствием широкому промышленному использованию. Показана возможность применения сварочных технологий при изготовлении изделий из алюминидов титана. Способы сварки плавлением не позволяют получить равнопрочные сварные соединения. Способы сварки давлением обеспечивают более широкие возможности формирования качественного соединения.

Ключевые слова: алюминид титана; газотурбинный авиадвигатель; сварка давлением; прочность шва; жаропрочный сплав

PROSPECTS FOR INDUSTRIAL USE TITANIUM ALUMINIDE IN AEROENGINE

KULYKOVSKYI R.A.¹, *Ph.D., assistant professor*

PAKHOLKA S.N.², *Ph.D. student*

PAVLENKO D.V.³, *Ph.D., assistant professor*

¹ Chair of equipment and technology of welding production, Zaporizhzhya National Technical University, Zhukovsky Street, 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine tel. +38 (061) 769-83-88 kulikovski@meta.ua ORCID ID: 0000-0001-8781-2113

² JSC «Motor Sich», 69068, Zaporozhye, Ukraine, Motorostroiteley Avenue 15

³ Chair of Aero-engines Technologies, Zaporozhye National Technical University, 64 Zhukovsky Street, Zaporozhye, 69063, Ukraine. Phone: +38 (061) 769-82-69 dvp_zntu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-6376-2879

The possibility of partial replacement of heat-resistant nickel alloys in the manufacture of components of gas turbine engines for titanium aluminide. In the range of operating temperatures of 600 ... 900 °C for specific strength they surpass all nickel superalloys. The problems of forming parts of gas turbine engines of titanium aluminides. Low plasticity characteristic of intermetallic titanium complicates their technological processing and is a major obstacle widespread industrial use. The possibility of using welding technology in the manufacture of products made of titanium aluminides. Methods for fusion welding do not provide full-strength welds. Pressure welding methods provide more opportunities formation of secure connections.

Keywords: titanium aluminide; gas turbine aircraft engine; pressure welding; seam strength; superalloy

ПЕРСПЕКТИВИ ПРОМИСЛОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ У АВІДВИГУНОБУДУВАННІ

КУЛИКОВСЬКИЙ Р.А.¹, *к.т.н., доцент*

ПАХОЛКА С.Н.², *аспірант*

ПАВЛЕНКО Д.В.³, *к.т.н., доцент*

¹ Кафедра обладнання і технології зварювального виробництва, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, м. Запоріжжя, Україна тел. +38 (061) 769-83-88 kulikovski@meta.ua ORCID ID: 0000-0001-8781-2113

² АТ «Мотор Січ», 69068, м. Запоріжжя, Україна, пр-т Моторобудівників, 15

³ Кафедра технологій авіаційних двигунів, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна тел. +38(061) 769-82-69 dvp_zntu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-6376-2879

Обґрунтовано можливість часткової заміни жароміцних нікелевих сплавів при виготовленні деталей газотурбінних авіадвигунів на алюмініди титану. В інтервалі температур експлуатації 600...900 °С по питомій міцності вони перевершують всі жароміцні нікелеві сплави. Розглянуто питання формування деталей газотурбінних авіадвигунів з алюмінідів титану. Низька пластичність характерна для інтерметалідів титану ускладнює їх технологічну обробку і є основною перешкодою широкому промислому використанню. Показана можливість застосування зварювальних технологій при виготовленні виробів з алюмінідів титану. Способи зварювання плавленням не дозволяють отримати рівномірні зварні з'єднання. Способи зварювання тиском забезпечують більш широкі можливості формування якісного з'єднання.

Ключові слова: алюмінід титану; газотурбінний авіадвигун; зварювання тиском; міцність шва; жароміцний сплав

Украина входит в пятерку стран мира обладающих полным технологическим циклом создания авиационной техники. Развитие авиационной промышленности, осуществляется в условиях постоянной конкурентной борьбы на мировом рынке.

Повышение конкурентоспособности авиадвигателей в первую очередь зависит от их технических характеристик, а также на снижение себестоимости производства и эксплуатации. Частью решения данных задач может стать применение в разрабатываемых авиадвигателях принципиально новых конструкционных материалов, а также технологий их производства и обработки.

На данный момент основными материалами, используемыми в отечественных авиадвигателях, являются жаропрочные титановые сплавы и стали, никелевые сплавы [1]. Последние, благодаря своим механическим и служебным свойствам при высоких температурах (до 1050 °С), применяются для изготовления лопаток турбин низкого давления и компрессора высокого давления. В тоже время, из-за своей высокой плотности (~8,5 г/см³) они обладают низкой удельной жаропрочностью.

В настоящее время ведущие мировые авиа- и двигателестроительные корпорации и научные центры разрабатывают и осваивают перспективный класс жаропрочных материалов – сплавы на основе интерметаллидов системы Ti-Al (алюминиды титана). Данный вид конструкционных материалов обладает целым рядом уникальных свойств: низкая плотность, относительно высокая температура плавления, высокий модуль упругости, стойкость к окислению и возгоранию, высокая удельная жаропрочность и др. [2, 3].

В зависимости от количества β-стабилизаторов интерметаллиды титана делятся на: Ti₃Al («альфа-2» - сплавы) / («супер-альфа-2» - сплавы (для упрочнения β-фазы дополнительно легированные тугоплавкими элементами – Mo, V, Zr, Si)); TiAl («гамма» - сплавы); Ti₂AlNb («орто» - сплавы).

При средней плотности алюминидов титана 3,7...4 г/см³ в интервале температур эксплуатации 600...900 °С по удельной прочности они превосходят все жаропрочные никелевые сплавы. Частичная замена в газотурбинном двигателе традиционных жаропрочных никелевых сплавов на интерметаллидные сплавы позволит снизить более

чем на 20% [4] его общую массу и качественно увеличить соотношение «тяга-вес» самолета [5].

Интерметаллидные сплавы титана могут быть использованы в качестве материала для деталей, преимущественно, статорной части газотурбинного двигателя:

- компрессор высокого давления ($T_{\text{раб}} \leq 700$ °С) - направляющие лопатки, корпус;
- турбина низкого давления ($T_{\text{раб}} \leq 800$ °С) - сопловые лопатки, корпус;
- камера сгорания ($T_{\text{раб}} \leq 800$ °С) - жаровая труба, корпус;
- форсажная камера - рассекатель камеры, корпус.

Наряду с наличием уникальных свойств, у алюминидов титана есть ряд недостатков: недостаточная пластичность и вязкость при комнатной температуре, ограниченная технологичность, крупнозернистость в слитках, высокая чувствительность к поверхностным дефектам.

Процессы формообразования готовых изделий из интерметаллидов титана начинаются с получения литой заготовки. Для плавки применяются методы многократного вакуумно-дугового переплава, индукционной плавки в холодном тигле, плазменно-дуговой плавки. Литые, как правило, получают методом центробежной заливки в графитовые или керамические формы.

Низкая пластичность характерная для интерметаллидов титана усложняет их технологическую обработку и является основным препятствием широкому промышленному использованию. Так, алюминиды титана по сравнению с обычными титановыми сплавами сложнее поддаются операциям деформирования. Детали и полуфабрикаты изготавливаются методами горячей обработки давлением при повышенных температурах. В то же время, следует отметить наличие современных эффективных способов изотермической деформации данных сплавов, позволяющих изготавливать заготовки полуфабрикатов и детали с высокой точностью.

Модификация и легирование алюминидов титана формирует определенную структуру, которая обеспечивает повышение пластичности интерметаллидных сплавов.

Механическая лезвийная обработка заготовок характеризуются значительной трудоемкостью, и осуществляется по более мягким режимам по сравнению с титановыми сплавами. Для удаления дефектного поверхностного слоя рекомендуется использовать электрополирование.

Технологическая схема процесса изготовления готовых деталей газотурбинных двигателей сложной конфигурации так же должна включать в себя сварочные операции.

Применение сварочных технологий из интерметаллидов титана ввиду многообразия существующих способов неоднозначно. Известно, что свойства сварного соединения и околошовной зоны существенно зависят от структурных изменений и объёмно-напряженного состояния металла шва. Поэтому практически большинство традиционных способов сварки плавлением, применяющихся для сварки титана и его сплавов, обеспечивают только ограниченную свариваемость при соединении низкопластичных алюминидов титана, как между собой, так и с другими конструкционными материалами, ввиду возникновения больших напряжений, и как следствие - образование трещин [6]. Некоторым исключением являются способы электронно-лучевой (ЭЛС) и лазерной сварки (ЛС). Однако, сварные соединения, выполненные ЭЛС, характеризуются низкой прочностью, а процесс сварки требует постоянного контроля вводимого количества теплоты для предупреждения фазовых превращений приводящих к растрескиванию соединения [7]. Только ЛС обеспечивает предел прочности шва близкий к прочности основного металла [8], однако при сварке деталей толщиной более 1,0 мм с глубоким проплавлением, условия формирования шва достаточно сложны и сопровождаются интенсивными процессами плавления и испарения металла.

Способы сварки давлением обеспечивают более широкие возможности формирования качественного соединения. Положительное влияние на сварное соединение может оказывать применение различных промежуточных прослоек и прокладок [9-13].

Применение прослойки фольги алюминия при прессовой сварке в вакуумной камере алюминидов титана позволяет получить сварное соединение [9]. Однако при этом отмечается крайне низкая прочность из-за строчечных выделений по линии шва. Применение фольги титана обеспечивает высокие прочностные характеристики, но из-за формирования в шве фазы $\alpha_2(\text{TiAl})$, соединение не обладает высокой жаропрочностью.

Использование наноструктурных фольг при контактной стыковой сварке сопротивлением алюминидов титана позволило получить практически равнопрочное сварное соединение [10]. При механических испытаниях соединений на растяжение, разрушение образцов происходило по основному металлу. Сварное соединение интерметаллида выполненное без фольги по классической технологии

разрушилось при изготовлении образцов для механических испытаний.

Положителен опыт получения бездефектных соединений как интерметаллидов титана друг с другом, так и с другими конструкционными материалами способом диффузионной сварки с использованием прослоек фольги [11-12].

При сварке трением качество сварного соединения зависит от характера термомеханического воздействия в процессе деформации. Для предупреждения растрескивания шва в процессе охлаждения необходимо поддержание специального температурного режима [13], в результате образуется высокопрочное сварное соединение.

Таким образом, проведенный анализ перспективности промышленного применения алюминидов титана в авиадвигателестроении показал, что они являются конструкционными материалами поддающимися основным процессам формообразования. В целом, выделяется пять основных этапов технологической цепочки получения готовых изделий из алюминидов титана (рис. 1). В тоже время, следует отметить отсутствие на данный момент, на отечественных предприятиях авиастроительного комплекса, разработанных и внедренных в серийное производство технологических процессов изготовления деталей газотурбинного авиадвигателя из алюминидов титана. Поэтому проведение дальнейших исследований по данной проблематике является актуальной для решения задачи промышленного применения алюминидов титана в авиадвигателестроении.

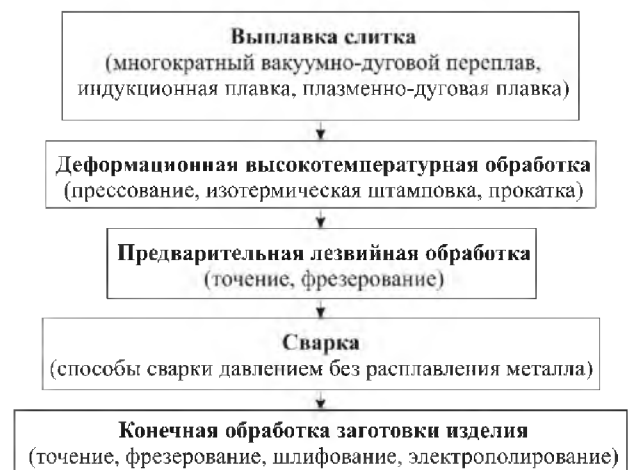


Рис. 1. Технологическая схема изготовления деталей газотурбинного авиадвигателя из алюминидов титана / The technological scheme of the manufacture of parts of a gas turbine aircraft engine from titanium aluminate

Выводы

Алюминиды титана способны частично заменить в газотурбинном двигателе жаропрочные никелевые сплавы, что обеспечит снижение более чем на 20% общей массы двигателя и качественно увеличит соотношение «тяга-вес» летательного аппарата.

Широкому промышленному применению изделий из алюминидов титана препятствует отсутствие серийных технологических процессов их изготовления.

Сварка является ключевым этапом при изготовлении готовых деталей газотурбинных

двигателей сложной конфигурации. Для получения прочных бездефектных соединений алюминидов титана целесообразно выполнение сварки без расплавления металла, обеспечивающее минимальные напряжения в сварном соединении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Строеие и свойства авиационных материалов / Белов А.Ф., Бенедиктова Г.П., Висков А.С. и др. Под ред. Белова А.Ф., Николенко В.В. М.: Металлургия, 1989. – 368 с.

2. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009 – 520 с.

3. Исаев К.Б. Теплофизические характеристики γ -сплава алюминидов титана / К.Б. Исаев, А.А. Рогозинская, С.В. Ахонин и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. № 10 (67). – С. 128-131.

4. Postans P.J., Cope M.T., Moorhuse S., Thakker A.B. Applications of Titanium Aluminides in gas Turbine Engine Components, Titanium 92 // Science and Technology. Edited by F.H. Froes, J. Caplan, The Minerals and Materials Society, 1993, v. 2, P. 2907-2914.

5. In Proceedings of the 2nd International Symposium «Structural Intermetallics» / F. Appel, M. Öhring, J.D.H. Paul, U. Lorenz; eds. K.J. Hemker et al. // the Minerals, Metals & Mater Soc. – 2001. – P. 63–72.

6. Liu, J.; Dahmen, M.; Ventzke, V.; Kashaev, N.; Poprawe, R. The effect of heat treatment on crack control and grain refinement in laser beam welded beta-solidifying TiAl-based alloy. Intermetallics 2013, 40, P. 65–70.

7. Chen, G.Q.; Zhang, B.G.; Liu, W.; Feng, J.C. Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys. Intermetallics 2011, 19, P. 1857–1863.

8. Kuwahara, G.; Yamaguchi, S.; Nanri, K.; Ootani, M.; Seto, S.; Arai, M.; Fujioka, T. CO₂ laser welding of titanium aluminide intermetallic compound. Proc. SPIE 2000, 3888, P. 411–417.

9. Юштин А.Н. Сварка давлением интерметаллидного сплава γ -TiAl / А.Н. Юштин, В.Н. Замков, В.К. Сабокаръ, П.Н. Чвертко // Автоматическая сварка. – 2001. - №1. – С. 33-37.

10. Кучук-Яценко В.С., Швец В.И., Сахацкий А.Г., Наконечный А.А. Особенности контактной сварки алюминидов титана с использованием нанослойных алюминидо-титановых фольг // Автоматическая сварка, № 3, 2009, С. 19-22

11. Simoes, S.; Viana, F.; Kocak, M.; Ramos, A.S.; Vieira, M.T.; Vieira, M.F. Microstructure of reaction zone formed during diffusion bonding of TiAl with Ni/Al multilayer. J. Mater. Eng. Perform. 2012, 21, P. 678–682.

12. Simoes, S.; Viana, F.; Ventzke, V.; Koçak, M.; Ramos, A.S.; Vieira, M.T.; Vieira, M.F. Diffusion bonding of TiAl using Ni/Al multilayers. J. Mater. Sci. 2010, 45, P. 4351–4357.

13. Pat. US 8,784,065 B2, United States, Friction welding of titanium aluminide turbine to titanium alloy shaft / Yang et al.; Caterpillar Inc., Filed: May 24, 2011. Prior pub. Nov. 29, 2012

Статья рекомендована к публикации докт. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); докт. техн. наук, проф. Д. В. Лаухиньым (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015