

УДК 621.791.14, P.A.C.S. 81.20.Vj

Perspectives of welded steel-titanium structures application in aircraft engine

Перспективы применения сварных сталетитановых конструкций

В авиационном двигателе

*A. Yu. Medvedev, V. R. Galimov **

*A. Ю. Медведев, В. Р. Галимов **

Ufa State Aviation Technical University, K. Marx Str. 12, Ufa, 450008, Russia

*galimov.vitalij-r01@net.ugatu.su

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

*galimov.vitalij-r01@net.ugatu.su

ABSTRACT

The paper discusses bimetal construction application prospects in aircraft engine building. An assessment of steel-titanium joints using possibility for the gas turbine engines shafts is given. Of the possible methods of obtaining steel-titanium blanks, the methods of friction welding are highlighted as the most promising for the industrial production of steel-titanium joints with a set of properties that meet the requirements for loaded parts of a gas turbine engine.

The performed review of the issues of friction welding of titanium with steel showed that studies of the joints of titanium-based alloys with structural steels, which are of the greatest practical interest for aircraft engine building, are limited to the study of the microstructure of welded joints and the assessment of a limited set of mechanical characteristics. The published results indicate the prospects for the technology of welding titanium with steel, but do not allow the use of the results obtained due to the small number of investigated combinations of materials, with low mechanical characteristics of the joints obtained.

The article elaborates a technique for conducting our own search experiment on welding steel 40X with VT6 alloy. The resulting experimental data on the power input during welding, the deformation of parts and the nature of phase transformations in the zone of the forming welded joint are supposed to be used for finite-difference modeling of the temperature field during welding, which will allow, first of all, to get an idea of the processes and conditions that form those observed after welding structures.

KEYWORDS

Friction welding; bimetallic shafts; steel-titanium compounds; aircraft engine building; linear friction welding.

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются перспективы применения биметаллических конструкций в авиадвигателестроении. Дается оценка возможности применения сталетитановых конструкций для изготовления валов газотурбинных двигателей. Из возможных способов получения сталетитановых заготовок выделены методы сварки трением, как наиболее перспективные для промышленного получения сталетитановых соединений с комплексом свойств, соответствующих требованиям к нагруженным деталям газотурбинного двигателя.

Проведенный обзор вопросов сварки трением титана со сталью показал, что представляющие наибольший практический интерес для авиационного двигателестроения исследования соединений сплавов на основе титана с конструкционными сталями ограничиваются исследованием микроструктуры сварных соединений и оценкой ограниченного набора механических характеристик. Опубликованные результаты свидетельствуют о перспективах технологии сварки титана со сталью, но не позволяют использовать полученные результаты в связи с малым количеством исследованных сочетаний материалов с низкими механическими характеристиками полученных соединений.

Проработана методика проведения собственного поискового эксперимента по сварке стали 40X со сплавом VT6. Полученные в результате экспериментальные данные о вводимой при сварке мощности, деформации деталей и характере фазовых превращений в зоне формирующегося сварного соединения предполагается использовать для конечно-разностного моделирования температурного поля при сварке, что позволит, в первую очередь, получить представление о процессах и условиях, формирующих наблюдаемые после сварки структуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сварка трением; биметаллические валы; сталетитановые соединения; авиадвигателестроение; линейная сварка трением.

Введение

Непрерывное развитие авиационных двигателей и повышение их технических характеристик ставит требования к улучшению эксплуатационных свойств отдельных узлов двигателей. Одним из решений данной задачи является применение биметаллических конструкций. Такие узлы имеют элементы, выполненные из разных материалов, тем самым сочетая их преимущества и компенсируя недостатки.

Биметаллические заготовки в авиационной промышленности могут применяться для изготовления ряда узлов, например, роторов и дисков газотурбинных двигателей [1, 2]. Цель применения биметаллических соединений в данных изделиях – комбинирование жаропрочных и фрикционных свойств в разных участках конструкции. Кроме того, имеются патенты [3, 4] на изготовление биметаллических роторных узлов, улучшающих их эксплуатационные и технологические свойства.

Другим возможным применением биметаллических узлов является снижение массы узла, например, за счет использования сталетитановых соединений. По сравнению со сталями титан обладает большей удельной прочностью до температур 400–450 °С. Однако стали, несмотря на большую плотность, обеспечивают более высокие фрикционные свойства. Примером возможных сталетитановых узлов может выступать вал газотурбинного двигателя. Валы передают крутящий момент от турбины к компрессору, работают при температурах до 450 °С в воздушно-масляной среде и испытывают знакопеременные нагрузки. Валы изготавливаются полыми для уменьшения их массы и как можно большего диаметра для повышения прочности. Замена стальных валов составными биметаллическими позволит существенно снизить вес узла при сохранении его эксплуатационных свойств. Учитывая размер и протяженность валов в газотурбинных двигателях, подобное снижение массы может быть существенным для двигателя в целом.

Получение биметаллических заготовок возможно несколькими способами, например, нанесением слоя металла на поверхность другого [5], порошковыми аддитивными технологиями [6], а также пайкой, диффузионной сваркой и сваркой трением. Однако для изготовления крупногабаритных узлов более рациональным и перспективным является сварка трением.

Сварка трением – твердофазный процесс получения неразъемных соединений, при котором тепло генерируется трением при движении одной свариваемой детали относительно другой. В зависимости от характера движения детали можно выделить ротационную сварку трением (одна деталь вращается вокруг центральной оси), линейную сварку трением (одна деталь движется возвратно-поступательно) и сварку трением вращающимся инструментом (детали неподвижны, а вращается дополнительный инструмент). Линейная сварка применяется для изготовления блисков моноколес, а ротационная сварка при изготовлении роторов.

В данной работе проведен обзор имеющихся работ по сварке трением сталей и титановых сплавов. Также предлагаются возможные схемы эксперимента по сварке сталетитановых соединений с выбором материалов, геометрии заготовок и параметров режима сварки.

1. Сварка сталетитановых соединений

Среди отечественных работ, посвященных сварке трением, отсутствуют работы, исследующие механизмы получения сталетитановых соединений, хотя подробно проработан вопрос линейной сварки трением титановых сплавов. Множество работ посвящено сварке сплава ВТ-6 [7–9], поэтому его поведение при сварке наиболее хорошо изучено. При этом имеются работы и по сварке разнородных титановых сплавов [10, 11]. Особенность сварки в данных работах в том, что были получены отличия в процессе сварки от сварки одноименных сплавов.

В зарубежных исследованиях по сварке трением также подробно изучены вопросы получения титановых соединений, преимущественно из сплава Ti-6Al-4V [12–15], являющегося аналогом ВТ-6. Стоит отметить, что в зарубежных работах [16, 17], посвященных сварке разнородных титановых сплавов, не поднимается вопрос изучения различий в протекании процесса, акцент ставится только на изучение полученных сварных соединений.

Кроме того, в иностранной печати имеются и работы, посвященные сварке сталетитановых соединений. В работе [18] исследуется техническая возможность сварки данных сочетаний и влияние на качество сварного соединения интерметаллидных фаз в сварных соединениях технически чистого титана с нержавеющей аустенитной сталью SUS304, полученных на нескольких различных сочетаниях параметров режима. Исследование полученных соединений показало наличие небольшой по протяженности зоны выделения интерметаллидных и карбидных упрочняющих фаз в области сварного шва. При испытании на растяжение все образцы разрушились по сварному стыку с пределом прочности до 377 МПа.

В [19] описана технология сварки сплава TiAl со сталью 42CrMo, исследованы полученные сварные соединения. За счет создания сварочного рельефа (площадь поперечного сечения стальной детали была больше) и применения термической обработки авторам [19] удалось получить соединения с пределом прочности 400...450 МПа, разрушавшиеся при испытаниях на растяжение по титановому сплаву, не смотря на выпадение карбидных и интерметаллидных фаз в сварном шве. Важно отметить, что, по мнению самих авторов статьи, полученные результаты свидетельствуют о перспективах применения именно такого сочетания материалов в облегченных узлах турбокомпрессора.

Микроструктура сварного шва, диффузия химических элементов через границу трения в сварных соединениях сплава Ti-6Al-4V с аустенитными сталями AISI304 и AISI316 было

исследовано ранее [20]. Микроструктурный анализ позволил авторам выделить в сталях 3 характерные зоны (с измельченным зерном, с деформированным зерном и с выросшим зерном), в которых не наблюдались фазовые изменения. В титановых образцах были обнаружены зоны с бета-структурой, мартенситной структурой и зона деформированных зерен.

Диффузию элементов в процессе сварки трением оценивали методом электронно-зондового микроанализа (EPMA). В результате было определено, что диффузия элементов из стали в титановый сплав более существенна. Особенно сказывается влияние железа и хрома как стабилизаторов бета-фазы и элементов, образующих интерметаллидные фазы. Влияние титана и алюминия на образование фаз со стальной стороны менее существенно, однако в обеих марках было обнаружено несколько таких фаз.

Также было обнаружено растрескивание в соединении Ti6Al4V-AISI316. Авторы предполагают, что это связано с наличием молибдена в марке AISI316 и его отсутствием в AISI304.

Приведенные данные демонстрируют растущий интерес к сварке биметаллических соединений, обусловленный, в том числе, и перспективами применения сталетитановых заготовок для изготовления валов и роторов. При этом, в рассмотренных выше сочетаниях уровень механических свойств не соответствует предъявляемым к нагруженным узлам газотурбинных двигателей.

Для получения сталетитановых соединений методом сварки трением необходимо экспериментальное исследование поведения материалов в условиях несимметричного теплового и напряженно-деформированного состояния, влияния параметров процесса на структурно-фазовые превращения.

2. Постановка эксперимента

Номенклатура сплавов, применяемых для изготовления валов и дисков, очень широка. Так, среди титановых сплавов, в зависимости от температуры эксплуатации, могут применяться, например, двухфазные деформируе-

мые сплавы ВТ6, ВТ8-1, ВТ8М-1, ВТ25У, а среди стальных материалов может предлагаться целый ряд марок – 40ХМА, 30ХГСА, 40ХНМА, 12Х24Н4А, 18ХНВА, 13Х14Н-ВФРА, 13Х11Н2В2МФ [21, 22].

Выбор конкретного сочетания представляет собой сложную проектную задачу. Однако, в виду слабой изученности свойств сталетитановых соединений, данная задача является трудно решаемой. Поэтому целью эксперимента является изучение процесса сварки трением на примере двух характерных представителей двух классов материалов – сталей и титановых сплавов.

В связи с вышесказанным, предпочтительно применение доступных и хорошо изученных материалов. Так, предлагается рассмотреть сочетание сплава ВТ6 со сталью 40Х. Сплав ВТ6 и его зарубежные аналоги являются наиболее распространенным материалом исследований процесса сварки трением титановых сплавов. Кроме того, данный сплав более доступен, нежели более жаропрочные сплавы, например ВТ8-1 или ВТ25У. Сталь 40Х является также более доступной, чем стали с более сложной системой легирования. При этом она имеет близкие механические свойства к сталям, рекомендуемым к применению в валах газотурбинных двигате-

лей. Еще одной отличительной особенностью стали 40Х относительно сталей, используемых в других исследованиях или применяемых для изготовления валов, является комплекс ее теплофизических свойств (табл. 1). Она обладает большей теплопроводностью, отчего процесс сварки будет наиболее сильно отличаться от сварки однородных материалов. Сварка материалов с сильным различием механических и теплофизических свойств имеет наибольший интерес на этапе исследования поведения материалов.

Выбор условий эксперимента в данном случае также обуславливается в первую очередь доступностью его осуществления и имеющимся научным заделом.

Так как процессы линейной и ротационной сварки близки по физической природе, возможно применение любой из технологий. Предпочтительна сварка образцов малых сечений, что позволит использовать сварочное оборудование малой мощности. Как правило, образцы для линейной сварки трением имеют размеры меньше, чем для ротационной сварки. К тому же, предпочтительно оборудование, имеющее возможность регистрации данных о процессе сварки и основных ее параметрах. В таком случае, линейная сварка трением более предпочтительна.

Таблица 1
Table 1

Теплофизические и механические свойства рассматриваемых материалов

Thermophysical and mechanical properties of the materials

| Параметр / Parameter | 40Х | 40ХНМА | ЭП517 | 13Х14НВФРА | ХН68ВМТЮК | ВТ-6 |
|--|-----|----------|-----------|------------|-----------|----------|
| Теплопроводность/ Thermal conductivity λ , Вт / (м*град) | 46 | 39 | 20,9 | 19,7 | 9,2 | 8,4 |
| Предел прочности/ Tensile strength σ_b , МПа | 980 | 980–1100 | 1050–1150 | 1200 | 980–1080 | 950–1100 |

Режим линейной сварки трением включает в себя следующие основные параметры: частота колебаний f , амплитуда колебаний A , давление сварки $P_{св}$ и давление проковки $P_{пр}$, а также осадка нагрева h . При этом предполагается принять частоту и амплитуду колебаний, используемые в большинстве работ [10], а варьирование осадки использовать как критерий получения соединений. Давление сварки, как параметр, влияющий на энерговыделение, будет также варьироваться, как посредством изменения усилия привода установки, так и изменения площади контактной поверхности образцов (рис. 1).

Результаты сварки будут использоваться для верификации модели температурного поля. Модель, описанная в [11], позволит оценить тепловые процессы при сварке сталетитановых соединений и влияние параметров режима на их протекание. Таким образом, эксперимент по сварке сочетания сплава VT6 со сталью 40X нужен для отработки модели и применения ее как инструмента разработки технологии сварки трением для других возможных сочетаний.

Для успешной верификации модели потребуется ряд мероприятий, включающий в себя внешний осмотр и измерение образ-

цов после сварки, измерение осадки сваренных деталей по шлифам, изучение микро- и макроструктуры шва и характерных зон, а также измерение микротвердости и механических характеристик полученных сварных соединений.

Выводы

Внедрение биметаллических узлов является перспективным направлением развития авиадвигателестроения. Применение сталетитановых узлов позволит обеспечить снижение массы. Из наиболее перспективных методов получения биметаллических заготовок, при изготовлении сталетитановых валов, интерес представляет сварка трением.

В настоящее время такие материалы не применяются ни в отечественном, ни в зарубежном авиадвигателестроении в связи с недостаточной изученностью процесса сварки, отсутствием технологии. Исследования соединений сплавов на основе титана с конструкционными сталями ограничиваются исследованием микроструктуры сварных соединений и оценкой ограниченного набора механических характеристик. Полученные соединения при этом обладали низкими механическими свойствами.

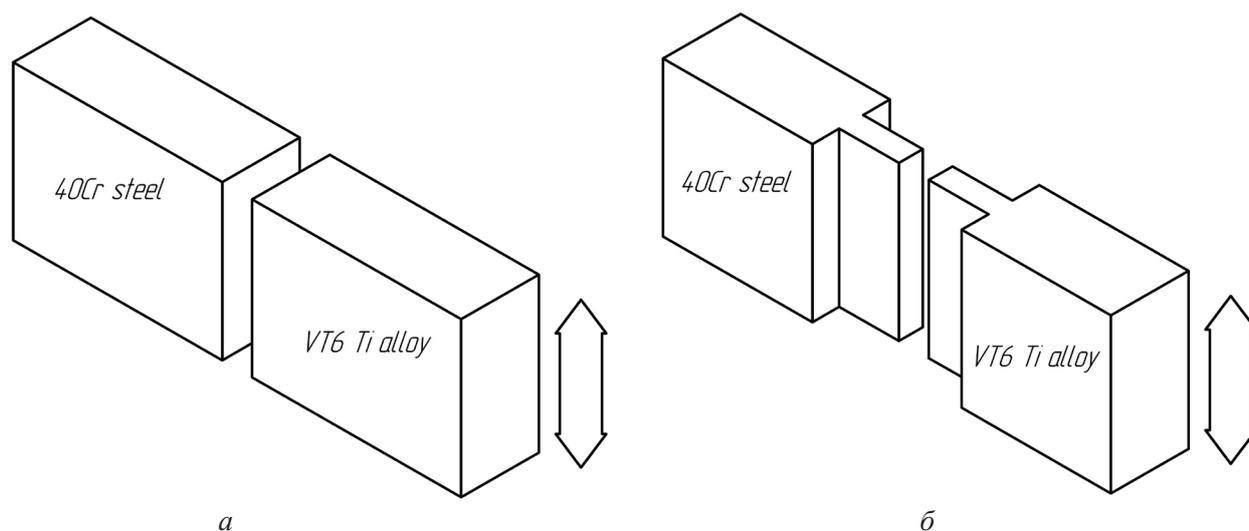


Рис. 1. Схема сварки образцов с варьированием усилия сварки (а) и с варьированием площади контакта (б)

Fig. 1. Scheme of welding samples with varying welding force (a) and with varying contact area (b)

Применение технологии требует предварительного изучения поведения стальных и титановых материалов при взаимной сварке, условий формирования соединений. Для этого возможно применение методов математического моделирования, исходными данными для которого могут служить результаты сварки на характерных представителях классов материалов. В связи с этим проработана методика собственного поискового эксперимента по сварке стали 40X со сплавом ВТ6.

Проработанная методика собственного поискового эксперимента по сварке стали 40X со сплавом ВТ6 позволит изучить поведение стальных и титановых образцов в процессе сварки, а также определить условия формирования качественных соединений на основании математического моделирования процесса.

Список литературы

1. Бочарова А. А., Гриц Н. М., Казберович А. М. Заготовки биметаллических дисков с функционально-градиентными свойствами из перспективных гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2013. № 4. С. 135–143.
2. Зяхор И. В., Кучук-Яценко С. И. Сварка трением жаропрочной стали, полученной технологией литья порошков под давлением, со сталью 40X // Автоматическая сварка. 2012. № 9 (713). С. 5–14.
3. Способ изготовления составной заготовки типа «диск-вал» из жаропрочных сплавов / В. А. Валитов и др. // Патент № 2706925 РФ, МПК В 21 К 25/00; В 23 Р 15/00. Оpubл. 21.11.2019.
4. Биметаллическая заготовка диска ротора газотурбинного двигателя / А. К. Онищенко и др. // Патент № 154586 РФ, МПК В 21 К 1/32; В 23 Р 15/02; F 01 D 5/30. Оpubл. 27.08.2015.
5. Ким С. Л. Физико-химические процессы при образовании биметаллических соединений // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2015. № 4. С. 41–44.
6. HIP diffusion bonding of FGH96-DD6 dual alloys / J. Yang et al. // Materials Research Innovations. 2014. V. 18, Iss sup4: IUMRS-ICAM 2013. P. S4-429-S4-434. DOI: 10.1179/1432891714Z.000000000714.
7. Медведев А. Ю., Павличич С. П. Испытания на растяжение сварных соединений титановых сплавов, выполненных линейной сваркой трением // Сварочное производство. 2014. № 5. С. 51–53.
8. Влияние величины осадки на формирование сварного соединения при линейной сварке трением / М. В. Караваева и др. // Письма о материалах. 2012. Т. 2, № 1. С. 40–44. DOI: 10.22226/2410-3535-2012-1-40-44.
9. Влияние линейной сварки трением на структурно-фазовые превращения в ультрамелкозернистом сплаве ВТ6 / В. В. Полякова и др. // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 7 (52). С. 53–58.
10. Linear friction welding of two-phase titanium alloys VT6 and VT8-1 / A. Y. Medvedev et al. // Welding International. 2015. V. 29, Iss. 1. P. 66–69. DOI: 10.1080/09507116.2014.888191.
11. Finite Difference Model of Temperature Fields in Linear Friction Welding / A. U. Medvedev et al. // Journal Solid State Phenomena. 2020. V. 303. P. 175–180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.303.175.
12. Wanjara P., Jahazi M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships // Metallurgical and Materials Transactions A. 2005. V. 36, Iss. 8. P. 2149–2164. DOI: 10.1007/s11661-005-0335-5.
13. Linear friction welding of Ti6Al4V: experiments and modeling / F. Schröder et al. // Materials Science and Technology. 2015. V. 31, Iss. 3. P. 372–384. DOI: 10.1179/1743284714Y.0000000575.
14. Vairis A., Frost M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V // Materials Science and Engineering: A. 1999. V. 271, Iss. 1–2. P. 477–484. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00449-9.
15. Texture development in Ti-6Al-4V linear friction welds / M. Karadge et al. // Science and Engineering: A. 2007. V. 459, Iss. 1–2. P. 182–191. DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.095.

16. On microstructure and mechanical properties of linear friction welded dissimilar Ti-6Al-4V and Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si joint / T. J. Ma et al. // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2012. V. 17, Iss. 1. P. 9–12. DOI: 10.1179/1362171811Y.0000000067.
17. Characterization of dissimilar linear friction welds of α - β titanium alloys / Y. N. Guo et al. // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012. V. 21, Iss. 5. P. 770–776. DOI: 10.1007/s11665-012-0129-z.
18. Futamata M., Fuji A. Friction welding of titanium and SUS 304L austenitic stainless steel // *Welding International*. 1990. V. 4, Iss. 10. P. 768–774. DOI: 10.1080/09507119009452178.
19. Direct Friction Welding of TiAl Alloy to 42CrMo Steel Rods / Honggang Dong et al. // *Materials and Manufacturing Processes*. 2015. V. 30, Iss. 9. P. 1104–1108. DOI: 10.1080/10426914.2014.973576.
20. Study of the Linear Friction Welding Process of Dissimilar Ti-6Al-4V–Stainless Steel Joints/A.Astarita et al. // *Materials and Manufacturing Processes*. 2016. V. 31, Iss. 16. P. 2115–2122. DOI: 10.1080/10426914.2016.1151048.
21. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. 1204 с.
22. Лозицкий Л. П. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. М.: Воздушный транспорт, 1992. 536 с.