

УДК 621.791.05

И. А. ПЕТРИК¹, А. Г. СЕЛИВЕРСТОВ¹, А. В. ОВЧИННИКОВ²¹ ПАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина² Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РОТОРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В работе рассмотрены вопросы, связанные со сваркой роторных деталей из жаропрочных титановых сплавов. Выполнены сравнительные исследования влияния сварки плавлением и ротационной сварки трением на структуру и свойства сварных соединений. Показано, что сварка трением происходит в твердой фазе с образованием закалочных структур, а именно, α' -фазы в объеме бывших β -зерен. Сварные соединения, полученные методом ротационной сварки трением, имели структуру зоны сплавления, близкую к основному металлу, и практически отсутствовала ЗТВ. Установлено, что при сварке на следующих режимах: $P_n = 15,28$ МПа; $t_n = 2,2$ с; частота вращения $23,83$ с⁻¹, временное сопротивление растяжению сваренных образцов, составило не менее 1080 МПа, что удовлетворяет условию прочности.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварка трением, сварной шов, микроструктура, механические свойства.

1. Актуальность и постановка проблемы

Стратегическим направлением развития авиационного двигателестроения является создание и серийное производство газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения, обладающих высоким ресурсом, надежностью, тяговооруженностью и экономичностью [1].

Повышение эксплуатационных характеристик авиационных ГТД и обеспечение требуемых ценовых параметров изделия невозможно без применения новых перспективных материалов, новых конструкторских и технологических решений, прогрессивного промышленного оборудования.

Одним из направлений совершенствования параметров авиадвигателя является снижение массы деталей. Вес двигателя зависит от его конструкции, габаритов и применяемых материалов. Снижение массы особенно актуально для роторных деталей. В качестве улучшения конструкции, можно привести применение цельных моноколес (блисков) вместо разъемного соединения лопаток с диском. Однако при этом необходимо учитывать сложность в изготовлении и снижение ремонтпригодности таких неразъемных конструкций.

Некоторые роторные детали, например барабаны компрессора, имеют сварную конструкцию (рис. 1). Барабан состоит из дисков, сваренных между собой методом электроннолучевой сварки.

Для изготовления барабанов применяют двух-

фазные титановые сплавы ВТ8, ВТ9 и др. Необходимый уровень механических свойств в этих сплавах обеспечивается сложной системой легирования в сочетании со специальным структурным состоянием.



Рис. 1. Внешний вид барабана компрессора

При этом жаропрочные двухфазные титановые сплавы являются ограниченно свариваемыми [2]. Применение методов сварки плавлением приводит к значительному изменению структуры и снижению механических свойств, соответственно, для обеспечения работоспособности требуется увеличение запаса прочности сварного соединения, как правило, за счет увеличения силового сечения в зоне сварки.

Основное влияние на структуру и свойства оказывает время пребывания сварного соединения при температурах выше полиморфного превращения [3]. В этой связи представляет интерес метод сварки в

твердой фазе – сварка трением. В настоящее время наибольшее распространение получили две разновидности процесса сварки трением - линейная и ротационная. Линейная сварка трением применяется для деталей некруглой формы с возвратно-поступательным движением торца одной детали относительно другой. Ротационная сварка трением применяется для деталей цилиндрической формы. Ранее проведенные исследования сварки трением на образцах сплошного сечения показали, что прочность находится на уровне прочности основного материала, тип и размеры структурных составляющих не изменяются.

Однако некоторые детали роторной части ГТД, в частности валы, барабаны компрессора, имеют тонкостенную цилиндрическую (оболочковую) конструкцию, соответственно, имеется необходимость определения свойств и возможности применения метода ротационной сварки трением для деталей таких конструкций.

Целью настоящей работы является повышение уровня мехсвойств сварных соединений из жаропрочных титановых сплавов путем минимизации структурных изменений.

2. Результаты исследований и их обсуждение

Исследования проведены на цилиндрических образцах диаметром 20 мм, изготовленных из материала ВТ8. С целью имитации конструкции оболочкового соединения с торца в образцах выполнено внутреннее отверстие, эскиз образца приведен на рисунке 2.

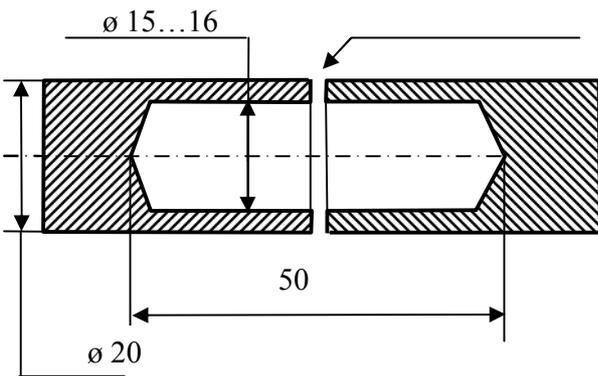


Рис. 2. Эскиз образца для сварки

С целью сравнения структуры и свойств сварных соединений, полученных сваркой трением со свойствами соединений, выполненных методами сварки плавлением, исследованы образцы из того же сплава, сваренные аргодуговой сваркой (АДС) и электроннолучевой сваркой (ЭЛС).

Соединения методом АДС выполнены в камере

с контролируемой атмосферой, источник питания ВД-302, $I_{св.} = 150...180$ А, с применением в качестве присадки прутков из основного материала ВТ8. Соединения методом ЭЛС производились на установке У6879-5007, энергоблок ЭЛА 15, $I_{св.} = 40$ мА, $U_{уск.} = 60$ кВ, $V_{св.} = 50$ м/час.

Сварку трением выполнено на следующих, ранее подобранных режимах: $P_n = 15,28$ МПа; $t_n = 2,2$ с; частота вращения $23,83$ с⁻¹ [4]. Внешний вид сварных образцов приведен на рисунке 3.

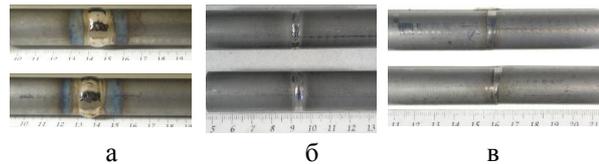


Рис. 3. Внешний вид сварных образцов: а – АДС; б – ЭЛС; в – СТ

Определение механических свойств выполнено на образцах, вырезанных вдоль из сварных соединений, при этом сварной шов располагался по центру рабочей части. Тип образцов для испытания на растяжение ХП в соответствии с ГОСТ 6996-66. Результаты испытаний механических свойств приведены в таблице 1.

Таблица 1
Механические свойства сварных образцов из материала ВТ8

Вид сварки	Механические свойства		
	$\sigma_{в.о.м.} / \text{СКО}, \text{ МПа}$	$\sigma_{в.св.} / \sigma_{в.ом}$	δ
АДС	979,9/ 53,5	0,88	9
ЭЛС	1020,3/ 47,8	0,92	9
Трением	1171,2/ 26,1	1,06	8

Анализ результатов испытаний механических свойств образцов показал снижение свойств образцов изготовленных сваркой плавлением до 20%, по сравнению с образцами полученными сваркой трением. Разрушение образцов выполненных сваркой трением происходило преимущественно по основному металлу. Разрушение образцов выполненных сваркой плавлением, как правило, происходило по сварному шву или ЗТВ.

Результаты исследований поверхности разрушения позволили установить, что характер разрушения образцов полученных сваркой трением более пластичны, с ямками вязкого разрушения. В то время как при разрушении образцов полученных сваркой плавлением имели место области хрупкого разрушения (рис. 4).

Исследования структур сварных соединений выполнены на поперечных шлифах (см. рисунок 5), при этом установлено тип, и размеры структурных составляющих при сварке трением не изменяются, размеры ЗТВ минимальные. Структура сварного шва представляла собой глобулизированные выделения α -фазы в матрице пересыщенного твердого раствора α' -фазы. На это указывает отсутствие пластинчатых прослоек β и α -вторичной фаз, характерных для основного металла.

выраженной в эллипсовидной форме первичной α -фазы. Повышение прочности в сравнении с основным металлом, по-видимому, является следствием образования пересыщенного раствора α' -фазы, который образуется при быстром охлаждении β -фазы, нагретой в процессе сварки выше температуры полиморфного перехода.

Для определения размеров ЗТВ, проведено исследование распределения твердости в различных зонах полученных сварных соединений. Результаты исследований представлены на рисунке 6.

Как следует из анализа представленных данных, твердость в зоне сварных швов выполненных сваркой плавлением, находилась в диапазоне от 33 до 45 HRC, что составляет около 30 % от основного металла. Это почти в 2 раза выше, чем изменение твердости при сварке трением.

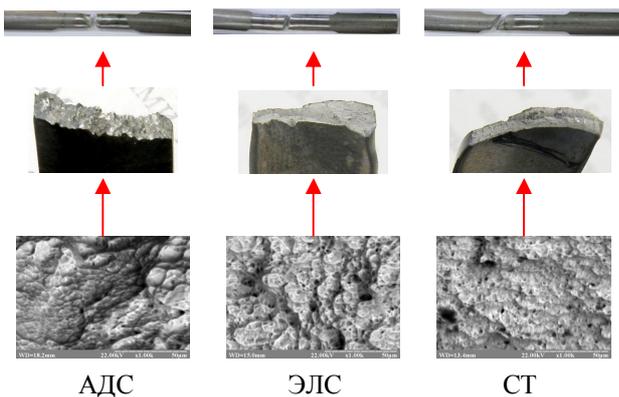


Рис. 4. Внешний вид образцов после мехиспытаний и фрактограммы поверхностей изломов сварных соединений

Образование соединения выполненного сваркой трением происходило в твердой фазе. В результате этого, зоны термического влияния, свойственной соединениям, полученным сваркой плавлением, практически нет. Кроме того, пластичный перегретый металл выдавливался в виде грата. Процесс сварки шел диффузионным путем, а осадка привела к образованию небольшой текстуры в сварном шве,

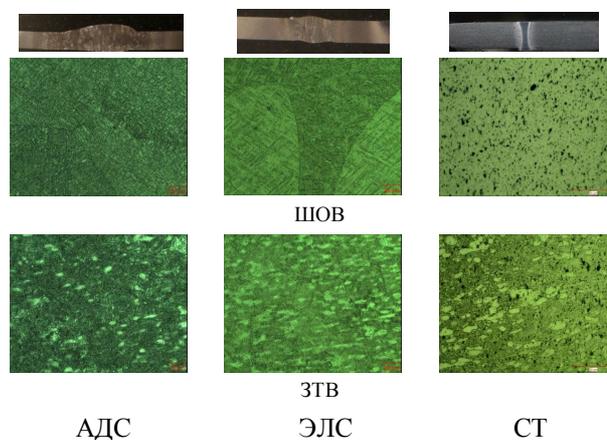


Рис. 5. Макро- и микро- структура сварных соединений

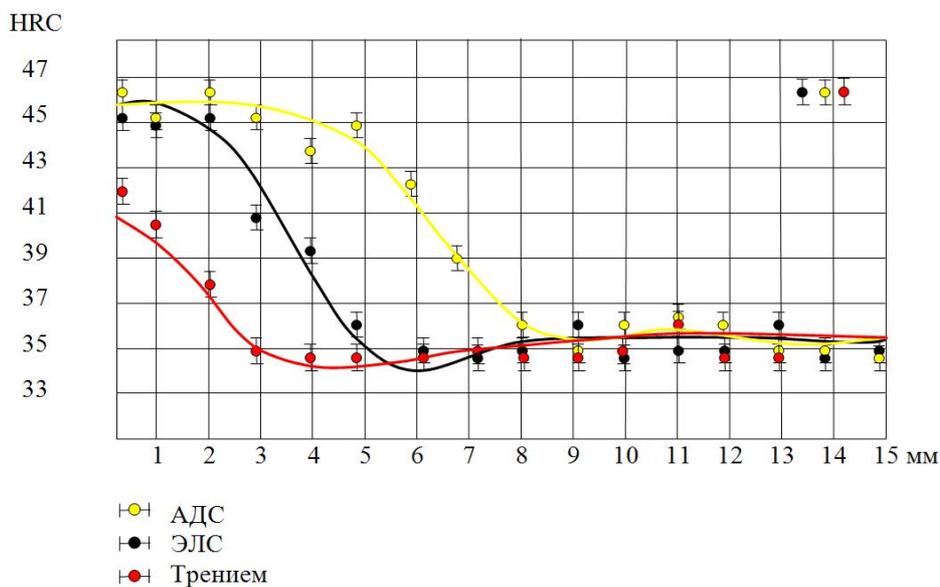


Рис. 6. Распределение твердости в сварных соединениях

Меньший диапазон изменения значений твердости позволяет говорить о значительно меньшем изменении механических свойств титановых сплавов при сварке трением, в сравнении со сваркой плавлением. По результатам замеров, ЗТВ образцов, сваренных АДС, в среднем составляет 5...7 мм от центра шва. Для образцов, полученных ЭЛС, протяженность ЗТВ находится в диапазоне 1...4 мм. В то же время, при сварке трением, ЗТВ практически отсутствует.

Из анализа мест разрушений образцов, замеров твердости и величины ЗТВ сварных соединений, можно сделать вывод, что минимизация величины ЗТВ обуславливает как повышение среднего значения прочности, так и уменьшение СКО прочности, что в целом позволит обеспечить стабильность свойств сварных соединений для особо ответственных конструкций.

Таким образом, сварные соединения, полученные методом ротационной сварки трением, имели структуру зоны сплавления, близкую к основному металлу, практически отсутствовала ЗТВ, что в конечном итоге позволило получить свойства сварных соединений на уровне (отличие не более 10 %) от основного металла титанового сплава ВТ8. Это позволяет говорить о перспективности применения ротационной сварки трением для получения сварных соединений жаропрочных титановых сплавов, которые имеют проблемную свариваемость методами сварки плавлением.

Выводы

На основании проведенных исследований установлено:

1. При сварке трением образцов сплошного сечения и тонкостенных (оболочковых) образцов получены идентичные результаты по механическим свойствам и структурам в зоне сварки.

2. По сравнению со сваркой плавлением, при сварке трением получены минимальные структурные изменения в зоне сварки.

3. Сварка трением обеспечивает механические свойства сварных соединений на уровне ОМ.

Литература

1. *Технология производства авиационных двигателей [Текст] / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, А. И. Долматов и др. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2009. – 540 с.*

2. *Гуревич, С. М. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов [Текст] / С. М. Гуревич. – К. : Наук. думка, 1979. – 180 с.*

3. *Шоршоров, М. Х. Сварка титана и его сплавов [Текст] / М. Х. Шоршоров, Г. В. Назаров. – М. : Машиз, 1959. – 136 с.*

4. *Исследование механических свойств сварных соединений сплава ВТ3-1, выполненных сваркой трением [Текст] / А. Г. Селиверстов, И. А. Петрик, Ю. М. Ткаченко и др. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 4 (26). – С. 41 – 44.*

Поступила в редакцию 16.05.2014, рассмотрена на редколлегии 14.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии металлов И. П. Волчок, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РОТОРНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

І. А. Петрик, О. Г. Селіверстов, О. В. Овчинников

В роботі розглянуто питання, пов'язані зі зварюванням роторних деталей із жароміцних титанових сплавів. Виконано порівняльні дослідження впливу зварювання плавленням та ротаційного зварювання тертям на структуру і властивості зварних з'єднань. Показано, що зварювання тертям відбувається в твердій фазі з утворенням загартованих структур, а саме, α' -фази в об'ємі колишніх β -зерен. Зварні з'єднання, отримані методом ротаційного зварювання тертям, мали структуру зони сплавлення, близьку до основного металу, і практично була відсутня ЗТВ. Установлено, що при зварюванні на наступних режимах: $P_n = 15,28$ МПа; $t_n = 2,2$ с; частота обертання $23,83$ с⁻¹, тимчасовий опір розтягуванню зварних зразків, склав не менше 1080 МПа, що задовольняє умові міцності.

Ключові слова: титанові сплави, зварювання тертям, зварний шов, мікроструктура, механічні властивості.

**PROPERTIES INCREASEMENT OF WELDING JOINTS
OF ROTOR PARTS MADE OF TITANIUM ALLOYS**

I. A. Petric, A. G. Seliverstov, A. V. Ovchinnikov

In this work questions about welding of rotor parts made of heatproof titanium alloys are examined. Comparative research of fusion and rotor friction weldings influences on structure and properties of welding joints have been carried out. It is shown, that friction welding occurs in solid phase with tempered structure creation, specifically alpha-phase in value of ex- β -particle. Welding joints which have been obtained by friction welding have structure of fusion (alloying) zone close to basic material and almost have no heat-affected zone. It is established, that welding with such options: $P_H = 15,28$ МПа; $t_H = 2,2$ с; rotation frequency $23,83$ с⁻¹; gave us ultimate strength of welded samples not less than 1080 МПа. That result obeys strength conditions.

Key words: titanium alloys, friction welding, welding joint, microstructure, mechanical properties.

Петрик Игорь Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры механики, Запорожский национальный технический университет, Главный сварщик ПАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Селиверстов Александр Георгиевич – начальник бюро сварки АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Овчинников Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры механики, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: glotka87@ukr.net.