

А. Ю. Медведев, В. М. Бычков, А. С. Селиванов,
С. П. Павличич, С. Х. Даутов, А. В. Супов

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ СПЛАВОВ ВТ6 И ВТ8-1

В работе проведен анализ свариваемости сплавов ВТ6 и ВТ8-1 между собой с помощью линейной сварки трением. По результатам металлографических исследований и механических испытаний установлено, что сварка на предложенном сочетании параметров режима обеспечивает формирование бездефектного равнопрочного соединения. *Линейная сварка трением; свариваемость; двухфазные титановые сплавы; сварные соединения; механические свойства; статическая прочность*

Применение моноколес в конструкциях компрессоров газотурбинных двигателей обеспечивает существенное снижение массы узла. Ряд зарубежных производителей авиационных двигателей (General Electric, Pratt & Whithney, Rolls-Royce и др.) освоили технологию соединения отдельно изготовленных лопаток и диска с применением процесса, названного Linear friction welding (LFW) – линейной сваркой, трением (ЛСТ), что дает возможность изготовления лопаток и диска из сплавов разных марок. В связи с тем, что ЛСТ – относительно новый способ сварки, опубликованные работы по исследованию свойств сварных соединений [1–3] не содержат сведений о свариваемости двухфазных титановых сплавов различного химического состава.

Имеющийся опыт применения ротационной сварки трением свидетельствует о том, что при сварке на жестких режимах нагрева удается получать соединения разнородных материалов с высокими характеристиками [4]. Режимы ЛСТ вполне можно отнести к жестким: при давлении осадки порядка 100 МПа соединение сечением несколько квадратных сантиметров можно по-

лучить менее чем за одну секунду. В представленной работе исследовалась свариваемость двухфазных титановых сплавов ВТ6 и ВТ8-1 между собой.

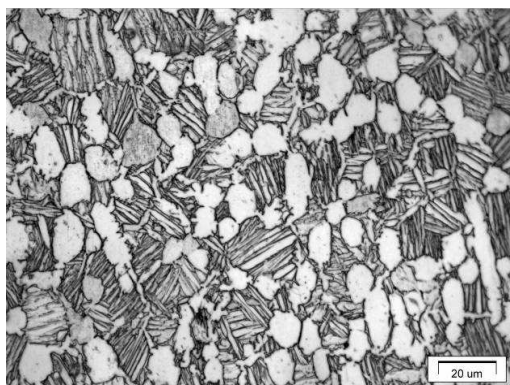
УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования свариваемости были использованы образцы в форме параллелепипедов высотой 35 мм и сечением 13×26 мм, изготовленные из сплавов: ВТ6 по ОСТ 1 90006 и ВТ8-1 по ОСТ 1 90197. Химический состав образцов, определенный с помощью оптико-эмиссионного спектрометра TASMAR Q4 200, приведен в табл. 1. Микроструктура материалов приведена на рис. 1, механические свойства применяемых материалов соответствовали требованиям приведенных выше отраслевых стандартов.

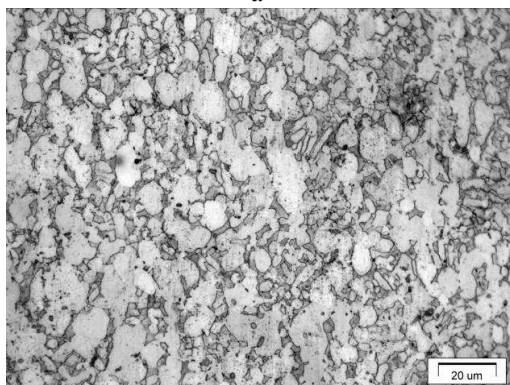
Основными параметрами ЛСТ являются частота f и амплитуда a возвратно-поступательного движения, сварочное $p_{св}$ и ковочное p_k давление, а также величина осадки h , при достижении которой прекращается возвратно-поступательное движение. На рис. 2 приведены графики изменения усилий осадки и осцилляции, а также перемещения привода машины для ЛСТ в цикле сварки. Весь период нагрева (период действия возвратно-поступательных движений) можно разделить на стадию разогрева и осадки с нагревом. На начальной стадии процесса ЛСТ осуществляется разогрев металла в стыке до пластического состояния, при котором начинается его выдавливание в грат. Время разогрева, обозначенное на рис. 2 как t_1 , соответствует периоду с начала нагрева до появления заметной осадки. Вторая стадия соответствует формированию грата в условиях, когда амплитудные значения усилия привода осцилляции F_a стабилизируются, а скорость осадки $tg \alpha$ остается постоянной до окончания нагрева.

Контактная информация: 8(347)273-08-66

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Экспериментальные результаты были получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО УГАТУ.



а



б

Рис. 1. Микроструктура основного металла:
а – сплав ВТ8-1; б – сплав ВТ6

Таблица 1

Химический состав исследуемых сплавов

	BT8-1	BT6		BT8-1	BT6
Si	0,15	0,032	Zr	2,051	0,011
Mn	0,011	0,0020	Sn	0,7	0,014
Cr	0,010	0,023	Pb	0,023	0,111
Ni	0,0092	0,0098	C	0,301	0,024
Mo	4,721	0,035	Cu	0,089	0,0086
Al	2,434	6,086	Co	0,0029	0,00054
Fe	0,055	0,241	B	0,0003	0,011
V	0,021	5,049	Nb	0,0001	<0,0001
W	0,051	<0,00010	Ti	89,61	88,34

Поскольку существенным фактором, затрудняющим сварку деталей различного химического состава, является разное сопротивление пластическому деформированию деталей в нагретом состоянии, нами была предпринята попытка оценить различия в условиях формирования соединения при сварке сплавов ВТ6 и ВТ8-1. Оценка производилась путем сравнения значений t_1 , F_A , и $tg \alpha$, полученных при сварке ВТ6+ВТ6 и ВТ8-1+ВТ8-1 на одинаковом сочетании параметров режима.

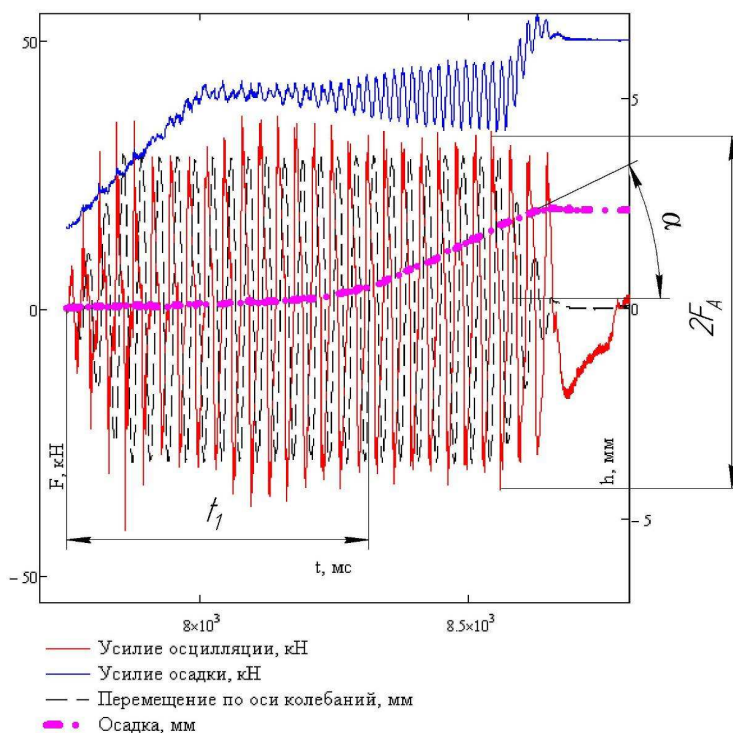


Рис. 2. Пример циклограммы процесса ЛСТ

Для сварки образцов были приняты значения параметров режима, приведенные в табл. 2 и опробованные ранее при сварке сплава ВТ6.

Таблица 2

Параметры режима, применявшиеся для ЛСТ сплавов

p_{CB} , МПа	p_K , МПа	a , мм	f , Гц	h , мм
100	100	2	50	2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Сравнение значений t_1 , F_A , и $tg\alpha$, усредненных по результатам трех опытов на образцах ВТ6+ВТ6 и трех опытов на образцах ВТ8-1+ВТ8-1 (табл. 3), показало, что условия формирования соединения сплавов ВТ6 + ВТ6 и ВТ8-1+ВТ8-1 различаются незначительно, а приведенные в табл. 2 параметры режима ЛСТ скорее всего применимы для сварки сплавов ВТ8-1 и ВТ6 между собой.

Свариваемость образцов оценивалась визуально – по наличию и форме выдавленного грата, путем металлографических исследований на оптическом микроскопе OLYMPUS GX51 с увеличением до $\times 1000$, а также по результатам испытания сварных соединений на растяжение с применением разрывной машины ISTRON 5982.

Визуальный осмотр соединений показал удовлетворительное формирование шва. Как видно из рис. 3, выдавливание грата происходит по всему периметру стыка. Форма грата идентична форме грата в соединениях ВТ6 + ВТ6 и ВТ8-1 + ВТ8-1.

Таблица 3

Характеристики, описывающие процесс формирования соединения при ЛСТ

Материалы	t_1 , мс	$tg\alpha$, мм/с	F_a , кН
ВТ6 + ВТ6	702	5,18	38,6
ВТ8-1 + ВТ8-1	761	5,38	37,4
отклонение			
	8,4%	3,9%	-3,1%

Обмер сваренных образцов показал, что укорочение претерпели обе детали, однако осадка происходила неравномерно – в среднем на деталь из сплава ВТ6 приходится 64 % от общего укорочения при сварке.

Среди рассмотренных на циклограмме характеристик процесса сварки в наибольшей степени различаются значения t_1 , что, возможно, свидетельствует о более низкой температуре начала формирования грата при сварке ВТ6,

и что, скорее всего, является причиной большей осадки детали из этого сплава.



Рис. 3. Фотография деталей из ВТ6 и ВТ8-1, сваренных между собой

В ходе металлографического анализа были исследованы макро- и микрошлифы сварных соединений. Как видно из рис. 4, на макрошлифе сварного соединения отчетливо видно линию стыка и границы сварного шва. Фотографии микроструктуры различных зон сварного соединения, показанные на рис. 5, $a-v$, демонстрируют измельчение зерен и формирование текстуры по направлению взаимного перемещения деталей при сварке. Видимые на макрошлифе линии, ограничивающие сварной шов, представляют собой зону термомеханического влияния (ЗТМВ). Размер ЗТМВ не превышает 200 мкм со стороны ВТ8-1 и еще меньше – со стороны ВТ6. Рост зерна в пределах ЗТМВ не наблюдается с обеих сторон от стыка.

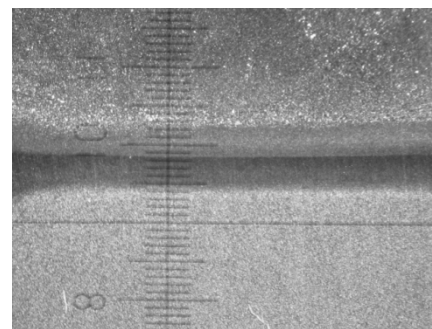
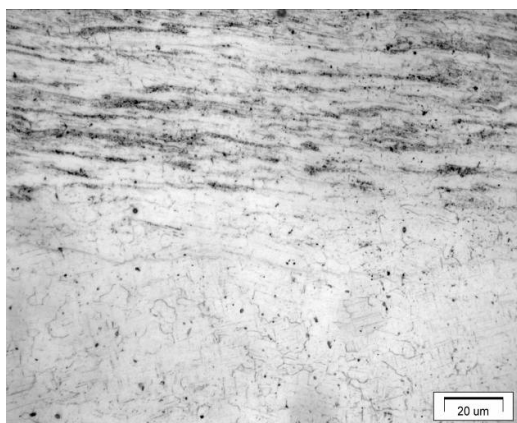


Рис. 4. Макроскопическое строение соединения

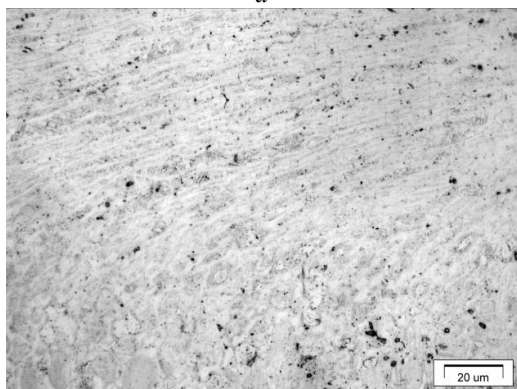
При изучении линии стыка с увеличением $\times 1000$ (рис. 5, a) не обнаружено пор и окисных пленок. Наблюдаемая на макрошлифе четкая линия стыка представляет собой набор межзеренных границ, по одну сторону от которой располагаются зерна с химическим составом,

соответствующим ВТ6, а по другую сторону – с химическим составом, соответствующим ВТ8-1.

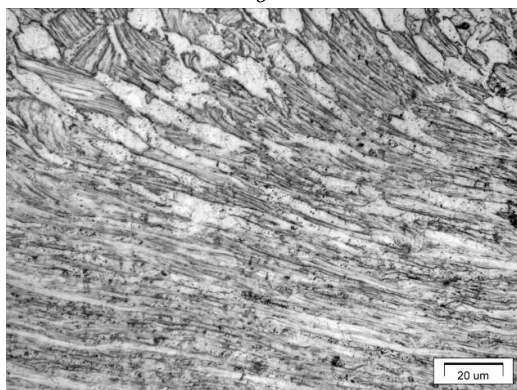
Испытания сварных соединений на растяжение проводились в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 6996. Размеры и форма образцов соответствовали типу XXIV указанного стандарта, эскиз которого показан на рис. 4. В дополнение к испытаниям сварных соединений были испытаны образцы, изготовленные из основного металла – сплава ВТ8-1, по форме идентичные сварным.



а



б



в

Рис. 5. Фотографии различных зон сварного соединения: а – зона стыка; б – ЗТМВ со стороны ВТ6; в – ЗТМВ со стороны ВТ8-1

Несмотря на то, что минимальное сечение образца располагалось в плоскости стыка, все образцы разрушились по ЗТМВ со стороны ВТ8-1 (рис. 4, б), со средним значением предела прочности 1194 МПа, что оказалось несколько выше, чем у основного металла (1150 МПа). Повышение предела прочности сварных соединений по сравнению с основным металлом может объясняться не только структурными изменениями при сварке, но и тем, что разрушение при испытании сварных соединений и основного металла происходило в сечениях, имеющих разную площадь.

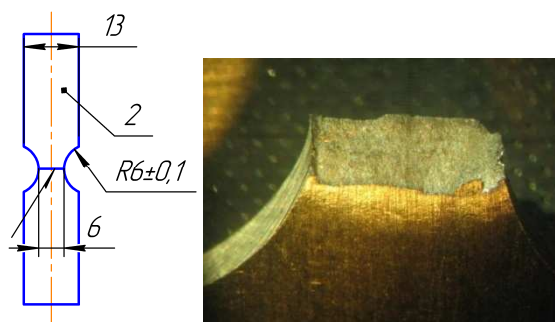


Рис. 6. Эскиз образца типа XXIV по ГОСТ 6996, и фотография излома

ВЫВОДЫ

Свариваемость сплавов ВТ6 и ВТ8-1 между собой хорошая. Сварные соединения обладают высокой статической прочностью.

На линии стыка в сварном соединении не обнаружено дефектов типа окисных пленок и пор.

Рост зерна в пределах ЗТМВ при ЛСТ с обеих сторон сварного стыка не наблюдается. Размер ЗТМВ не превышает 200 мкм со стороны ВТ8-1 и еще меньше со стороны ВТ6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vairis A., Petousis M.** Designing experiments to study welding processes: using the Taguchi method // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2009. 2 (1). P. 99–103.
2. Process optimization for linear friction welding of Ti6Al4V / P. Wanjara [et al.] // Proc. of the 7th Intern. conf. on trends in welding research. Callaway Gardens resort, Pine Moentain, Georgia, USA, 2005. P. 885–860.
3. **Wanjara P., Jahazi M.** Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V: Processing, Microstructure, and Mechanical-Property Inter-Relationship // Metallurgikal and materials transactions A. August 2005. Volume 36A. P. 2149–2164.
4. **Вилль В. И.** Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970. 175 с.

ОБ АВТОРАХ

Медведев Александр Юрьевич, доц. каф. оборудования и технологии сварочн. производства. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Гольяттинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделирования нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.

Бычков Владимир Михайлович, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Уральск. политехн. ин-т, 1980). Иссл. в обл. физики и техники дуговых и плазменных процессов в сварочном производстве.

Селиванов Алексей Сергеевич, ст. преп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

Павлинич Сергей Петрович, зам. управляющего директора, техн. директор ОАО «УМПО». Дипл. инженер-механик по оборудованию и технологии сварочн. производства» (УАИ, 1976). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

Даутов Сагит Хамитович, гл. сварщик ОАО «УМПО». Дипл. инженер оборудованию и технологии сварочн. производства (УАИ, 1982). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

Супов Андрей Владимирович, нач. технологическ. бюро ОАО «УМПО». Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. линейной сварки трением.