

УДК УДК 621.791.14

*Куликовский Р. А.<sup>1</sup>, Селиверстов А. Г.<sup>2</sup>, Бережной С. П.<sup>1</sup>, Куртов А. А.<sup>1</sup>*<sup>1</sup> Запорожский национальный технический университет. Украина, г. Запорожье<sup>2</sup> АО «Мотор Сич». Украина, г. Запорожье

## ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВОВ ВТ 3-1, ВТ 8 И ВТ 9 ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

*В работе представлены результаты испытаний соединений, полученных сваркой трением, на статическую и усталостную прочность. Проведен сравнительный анализ свойств сварных изделий из титановых сплавов, которые получены сваркой трением и способами сварки плавления. Показана возможность получения соединений титановых сплавов выполненных сваркой трением близких по прочности к основному металлу при различных видах механических нагрузжений. Установлено, что сварка трением титановых сплавов обеспечивает бездефектное получение сварных соединений, механические свойства которых значительно выше, чем у соединений полученных методами сварки плавлением.*

*Ключевые слова:* сварка трением; прочность сварных соединений; жаропрочные титановые сплавы.

### 1. Введение

Высоколегированные жаропрочные сплавы титана, по сравнению со сталями и никелевыми сплавами, обладают значительно более высокой удельной прочностью при их работе при повышенных температурах (до 600 °С) [1]. Это свойство, а также удовлетворительная способность обрабатываться, прокатываться, штамповаться и др. является определяющим для их использования в авиастроении.

Номенклатура деталей авиадвигателей, изготавливаемых из титановых сплавов достаточно разнообразна. Многие изделия имеют сложную геометрическую форму, которую невозможно получить только способами штамповки, проката или литья.

Одной из главных задач при проектировании роторов авиадвигателей является сочетание минимальной массы конструкции с максимальным ресурсом и надежностью [2]. Традиционные конструкции роторов практически исчерпали свой ресурс в области снижения массы.

Современное развитие технологий высокоскоростного резания и сварки открыло новые пути решения данной задачи. Применение при изготовлении ротора любого типа технологии изготовления дисков и лопаток в виде единого изделия — «моноколесо», позволяет добиться снижения массы конструкции до 30% от исходного [3] и повысить критическое число оборотов.

Моноколесо может быть изготовлено либо путем механической обработки ковеной заготовки, либо соединением лопаток с диском сваркой.

Себестоимость производства моноколес высокоскоростной механической обработкой достаточно высока, кроме того до сих пор не решена проблема их ремонта (в случае выхода из строя одной лопатки необходимо выбраковать все изделие). В тоже время, применение сварки позволяет повысить коэффициент использования металла в 1,8 раза.

В настоящее время наиболее распространенными при сварке титана и его сплавов являются способы сварки плавлением (аргодуговая, электрошлаковая, электроннолучевая и др.). Сварка плавлением титановых сплавов имеет ряд сложностей и ограничений. Анализ свариваемости титановых сплавов данными способами [4..6] показал, что к ярко выраженным проблемам относятся высокая склонность к трещинообразованию, порообразованию и снижение прочности более чем на 10% по сравнению с основным металлом. Также наблюдается низкая пластичность сварного соединения, что отрицательно сказывается на усталостной прочности — одного из основных параметров, определяющих работоспособность соединения при многоцикловом нагружении в условиях работы осевого компрессора. Максимальный уровень предела выносливости соединений титана и его сплавов, выполненных способами сварки плавлением, составляет не более 80% предела выносливости основного металла [7]. При сварке плавлением данного типа сплавов продолжительность нахождения металла ЗТВ в 2..3 раза больше по сравнению со сталями. Чувствительность к термическому циклу во многом связана с протеканием  $\alpha \rightarrow \beta$  превращений, быстрым ростом зерна при нагреве выше температу-

ры полиморфного превращения, перегревом и образованием хрупких фаз при охлаждении и старении. Это существенно ограничивает области применения сварки плавлением для деталей из жаропрочных титановых сплавов.

В связи с этим, заслуживает внимания для получения неразъемного соединения способ сварки трением. Он является одним из эффективных способов соединения различных металлов и их сплавов, при этом сварное соединение образуется в результате совместного пластического деформирования соединяемых деталей в твердой фазе. Генерирование тепла происходит благодаря непосредственному преобразованию механической энергии, выделяемой по поверхности контакта деталей, которые прижаты друг к другу с определенной силой и участвуют в относительном перемещении. Специфика протекания процесса обуславливают его энергетические и технологические преимущества: узкая зона нагрева соединения; стабильность качества и высокая повторяемость; экологическая чистота; низкое машинное время сварки; минимальность механической обработки сварного соединения; простота механизации и автоматизации; возможность сварки деталей из материалов различной природы, не свариваемых традиционными способами [8]. Данные преимущества процесса определяют его перспективность применительно к сварке титана и сплавов на его основе.

## 2. Постановка задачи

Оценка свариваемости жаропрочных титановых сплавов сваркой трением, путем определения прочностных характеристик соединений при статическом и динамическом нагружениях.

## 3. Материалы и условия исследований

Исследовали соединения сплавов ВТ 3-1, ВТ 8 и ВТ 9, полученные сваркой трением на образцах  $\varnothing 10...12$  мм в состоянии поставки, с агрегатной твердостью 38...42 HRC.

Сварка трением всех исследуемых сплавов выполнялась на режимах, предложенных в [9].

Для испытаний на статическое растяжение были изготовлены цилиндрические образцы двух типов по ГОСТ 6996-66 (ISO 4136-89) [9]: тип XIV – для определения наиболее слабого участка стыкового соединения; тип XXV – для определения прочности металла шва в стыковом соединении.

Временное сопротивление растяжению образцов определяли на разрывной машине ИР-100.

Динамическая прочность определялась на испытательном стенде АО «Мотор Сич», обеспечивающем воздействие повторно-переменное нагружение исследуемых образцов.

База испытаний для определения сопротивления усталости титановых сплавов составляла  $10^7...10^8$ , что согласно [7] обеспечивает достаточно достоверный результат.

Учитывая чувствительность титановых сплавов к неровностям поверхности, так же как и к ее дефектам (трещины, острые царапины, забоины и т.д.), токарная обработка образцов сопровождалась последующим ручным полированием шкуркой.

Дефекты микроструктуры сварных соединений оценивались на микроскопе NU-2.

## 4. Результаты исследования

При определении статической прочности сварных соединений на образцах сплавов ВТ 3-1, ВТ 8 и ВТ 9, изготовленных по типу XIV из [9], все испытанные образцы разрушились по основному металлу, вдали от шва и зоны термомеханического влияния. Место разрушения соединений титановых сплавов, полученных сваркой трением, находится примерно на равном расстоянии от места закрепления образца в разрывной машине и от сварного шва (рис. 1). Прочность таких соединений составила: для сплава ВТ 3-1  $\sigma_b = 1100...1260$  МПа, для сплава ВТ 8  $\sigma_b = 1100...1190$  МПа и для сплава ВТ 9  $\sigma_b = 1130...1200$  МПа. Данные значения временного сопротивления исследуемых образцов в полной мере соответствуют значениям прочности соответствующего титанового сплава.

Испытания на растяжение образцов с ослабленным сечением в зоне сварного шва, соответствующие типу XXV из [9] показали следующие значения:  $\sigma_b = 1150...1200$  МПа – для сплава ВТ 3-1,  $\sigma_b = 1150...1250$  МПа – для сплава ВТ 8 и  $\sigma_b = 1200...1350$  МПа – для сплава ВТ 9.

Испытания на усталостную прочность сварных и цельных образцов из сплавов ВТ 3-1, ВТ 8 и ВТ 9 показали следующее. Максимальная нагрузка, при которой наблюдалось разрушение металла цельных образцов, составила:  $\sigma_{-1} = 810$  МПа – для сплава ВТ 3-1 и  $\sigma_{-1} = 800$  МПа – для сплавов ВТ 8 и ВТ 9. Сварные образцы разрушались соответственно при нагрузках:  $\sigma_{-1} = 750$  МПа – для сплава ВТ 3-1, что составляет 92% прочности основного металла;  $\sigma_{-1} = 790...830$  МПа – для сплава ВТ 8 и  $\sigma_{-1} = 800...830$  МПа – для сплава ВТ 9.

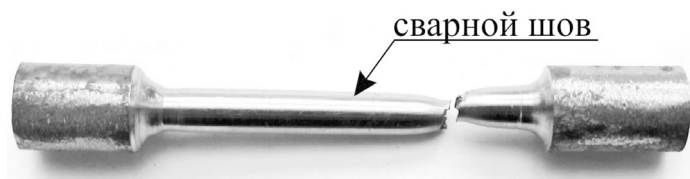


Рис. 1. Сварной образец из титанового сплава, изготовленный по типу XIV, после испытаний на статическое растяжение

Следует отметить, что согласно [4], предел выносливости сварного соединения сплава ВТ 3-1 выполненного способом электронно-лучевой сварки составляет всего 260 МПа.

Проведенные микроструктурные исследования показали отсутствие видимых дефектов, характерных для сварных соединений выполненных способами сварки плавлением, в виде несплошностей, непроваров, пор (рис. 2). В процессе сварки трением формируется мелкозернистая динамически рекристаллизованная структура из  $\beta$ -зерен с дисперсными выделениями  $\alpha$ -фазы. Характерной металлографической особенностью данного типа соединений, выполненных сваркой трением, является их низкая травимость, в то время как, в переходной зоне можно наблюдать ярко выраженную деформацию структурных составляющих титановых сплавов вызванную пластическим течением трущихся торцов свариваемых деталей под действием давления нагрева и взаимного относительного перемещения.

### 5. Выводы

1. Результаты проведенных исследований показывают перспективность применения сварки тре-

нием при изготовлении высоконагруженных деталей газотурбинных авиадвигателей.

2. Сварка трением титановых сплавов обеспечивает бездефектное получение сварных соединений с более высокими механическими свойствами, чем у соединений полученных методами сварки плавлением.

3. Сварные соединения жаропрочных титановых сплавов ВТ 3-1, ВТ 8 и ВТ 9, выполненные сваркой трением, приближаются к уровню характеристик исходных титановых сплавов.

### Литература

- [1] Белов А. Ф. Строение и свойства авиационных материалов [Текст]: учеб. / А. Ф. Белов, Г. П. Бенедиктова, А. С. Висков и др.; под ред. А. Ф. Белова, В. В. Николенко. — М.: Металлургия, 1989. — 368 с.
- [2] Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели [Текст] / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. — Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. — 1204 с.
- [3] Turner R. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Modeling and validation / R. Turner, J.-C. Gebelin, R. M. Ward, R. C. Reed // Acta Materiala. — 2011, № 59. P. 3792-3803.

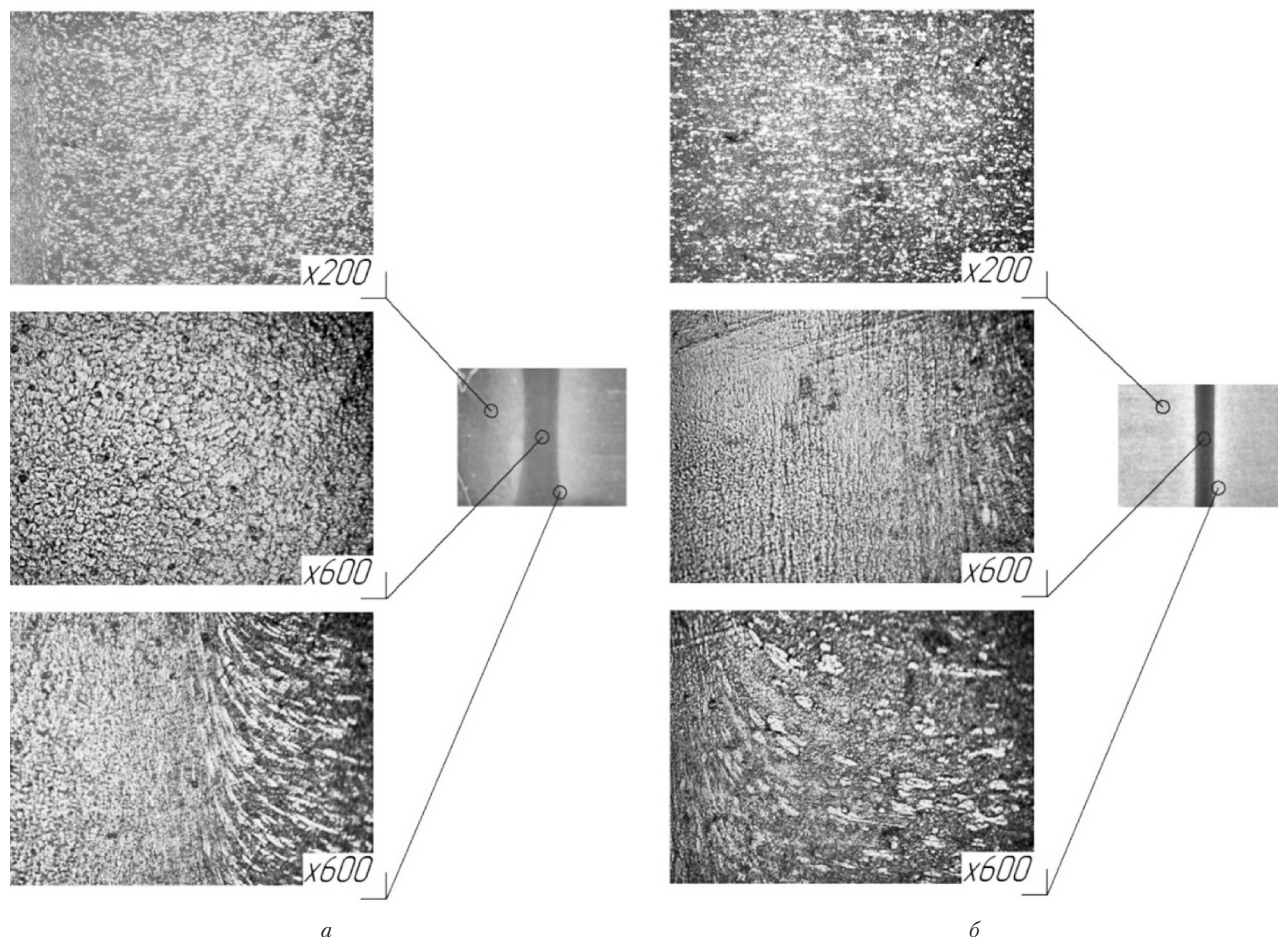


Рис. 2. Структурное состояние соединений титановых сплавов ВТ 8 (а) и ВТ 3-1 (б) выполненных сваркой трением



- [4] Замков В. Н. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов [Текст] / В. Н. Замков, С. М. Гуревич. — К. : Наукова думка, 1986. — 240 с.
- [5] Третьяков Ф. Е. Сварка плавлением титана и его сплавов [Текст] / Ф. Е. Третьяков. — М. : Машиностроение, 1968. — 142 с.
- [6] Моисеев В. Н. Сварные соединения титановых сплавов [Текст] / В. Н. Моисеев, Ф. Р. Куликов, Ю. Г. Кириллов и др. — М. : Metallurgy, 1979. — 248 с.
- [7] Горынин И. В. Титан в машиностроении [Текст] / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. — М. : Машиностроение, 1990. — 400 с.
- [8] Вилль В. И. Сварка металлов трением [Текст] / В.И. Вилль. — М.: Машиностроение, 1970. — 169 с.
- [9] Селиверстов А. Г. Влияние параметров режима сварки трением на структуру и механические свойства соединений сплава VT 3-1 [Текст] / А. Г. Селиверстов, Ю. М. Ткаченко, Р. А. Куликовский и др. // Автоматическая сварка. — 2013. — № 1. — С. 29-34.
- [10] ГОСТ 6996-66 (ISO 4136-89). Сварные соединения. Методы определения механических свойств [Текст]. — Взамен ГОСТ 6996—54. — Введ. 1967-01-01. — М. : Стандартиформ, 2006. — 44 с.
- [11] Ильченко Г. А. Ремонт лопаток [Текст] / Г. А. Ильченко, Н. Л. Макаровский, Ю. В. Полоскин // Новые процессы и надежность ГТД. — 1977. — № 3-4. — С. 18-30.

*Kulikovskii R. A.<sup>1</sup>, Seliverstov A. D.<sup>2</sup>, Berezhniy S. P.<sup>1</sup>, Kurtov A. A.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Zaporozhye National Technical University. Ukraine, Zaporozhye

<sup>2</sup> Motor Sich, JSC. Ukraine, Zaporozhye

#### THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS OF VT3-1, VT 8 AND VT 9 ALLOYS WHICH HAVE BEEN OBTAINED BY FRICTION WELDING

*In this work the test results of the static and fatigue strength of the joints which have been obtained by friction welding are presented. A comparative analysis of the properties of welded products from titanium alloys, which are obtained by friction welding and fusion welding was done. The possibility of preparing joints of titanium alloys by friction welding which are similar in strength to the base metal at different types of mechanical loading is shown. It is established that the friction welding of titanium alloys provides a defect-free weld joints obtaining, mechanical properties which are much higher than those of the joints obtained by fusion welding techniques.*

Keywords: friction welding; the strength of welded joints; heatproof titanium alloys.

#### References

- [1] Belov A. F. Structure and properties of aeronautical materials [Text] / A. F. Belov, G. P. Benediktova, A. Visco ; ed. by A. F. Belov, V. V. Nikolenko. — Moscow : Metallurgy, 1989. — 368 p.
- [2] Inozemtsev A. A. Gas turbine engines [Text] / A. A. Inozemtsev, V. L. Sandratsky. — Perm : «Aviadvigatel», 2006. — 1204 p.
- [3] Turner R. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Modeling and validation / R. Turner, J.-C. Gebelin, R. M. Ward, R. C. Reed // Acta Materiala. — 2011, № 59. P. 3792-3803.
- [4] Zamkov V. N. Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys [Text] / V. N. Zamkov, S. Gurevich. — K. : Naukova Dumka, 1986. — 240 p.
- [5] Tretyakov F. E. Fusion welding of titanium and its alloys [Text] / F. E. Tretyakov. — M: Mechanical Engineering, 1968. — 142 p.
- [6] Moiseev V. N. Welded joints of titanium alloys [Text] / V. N. Moiseev, F. R. Kulikov, G. Kirillov, and others. — M. : Metallurgy, 1979. — 248 p.
- [7] Gorynin I. V. Titan in mechanical engineering [Text] / I. V. Voronin, B. B. Chechulin. — M. : Mechanical Engineering, 1990. — 400 p.
- [8] Ville V. I. Friction welding of metal [Text] / V. I. Ville. — M. : Mechanical Engineering, 1970. — 169 p.
- [9] Seliverstov A. G. The influence of friction welding parameters on the structure and mechanical properties of the joints of VT 3-1 alloy [Text] / A. G. Seliverstov, Y. M. Tkachenko, R. A. Kulikovskiy, et al. // Automatic Welding. — 2013. — № 1. — P. 29-34.

- [10] GOST 6996-66 (ISO 4136-89). Welds. Methods for determining of the mechanical properties [Text]. – Instead GOST 6996–54. – Introduced. 1967-01-01. – М. : Standartinform, 2006. – 44 p.
- [11] Ilchenko G. A. Repair of blades [Text] / G. A. Ilchenko, N. L. Makarov, V. Poloskin // New processes and reliability of GTE. – 1977. – № 3-4. – P. 18-30.