

Р. Р. Гринь, М. В. Караваева, Б. О. Большаков,  
Н. Ф. Измайлова, Р. Р. Мухаметшин, Ф. Ф. Мусин

## УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

Представлены результаты усталостных испытаний макетов сегментов блиска, содержащих сварное соединение титановых сплавов ВТ6 / ВТ8-1, полученное линейной сваркой трением. Проведен фрактографический анализ изломов макетов сегмента блиска компрессора газотурбинного двигателя после усталостных испытаний. *Титановый сплав; линейная сварка трением; усталостные испытания; фрактографический анализ; блиск*

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день требования к экономической эффективности газотурбинных двигателей неуклонно возрастают. Анализ развития самолетостроения для гражданской авиации показывает [1], что снижение стоимости изготовления и стоимости технического обслуживания достигается возрастанием размеров двигателей, повышением их тяги, а не использованием большего их числа. В этом контексте актуальной становится задача снижения массы конструкции двигателя при сохранении его надежности.

Одним из наиболее интересных решений в данной области является создание блисков (конструкций, исключая замковые соединения, т. е. дисков, выполненных за одно целое с рабочими лопатками) для роторов компрессоров и турбин, которые позволяют достичь снижения массы конструкции до 25 % [2].

Предлагаемая конструкция блиска базируется на технологии линейной сварки трением

(ЛСТ), для чего на дисках из титановых сплавов выполняются профилированные бобышки, к которым привариваются лопатки.

Известно, что до 60 % поломок лопаток компрессоров газотурбинного двигателя (ГТД) носят усталостный характер [1], поэтому для подтверждения надежности таких конструкций необходимо проведение лабораторных усталостных испытаний.

Целью настоящей работы явился анализ и выявление особенностей изломов сварных соединений титановых сплавов ВТ6 и ВТ8-1 в исходном мелкозернистом состоянии.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования были выбраны титановые двухфазные ( $\alpha + \beta$ ) сплавы ВТ6 и ВТ8-1, обычно используемые для лопаток и дисков компрессоров ГТД соответственно.

Содержание основных легирующих элементов по ГОСТ 19807-91 для сплавов ВТ6, ВТ8-1 приведено в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные легирующие элементы в исследуемых сплавах

Сплав	Al	V	Zr	Mo	Sn
ВТ6	5,3-6,8	3,5-5,3	до 0,3	–	–
ВТ8-1	4,8-6,0	–	0,3-1,5	3,5-4,5	1,3

Для металлографических исследований сварного соединения были подготовлены шлифы, травление которых осуществлялось в растворе азотной и плавиковой кислот в воде. Снимки микроструктуры получены на оптическом микроскопе OLYMPUS GX-51.

Типичная микроструктура в зоне сварного соединения макета показана на рис. 1.

Контактная информация: 8-917-739-95-07

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» совместно ОАО «УМПО» и ФГБОУ ВПО УГАТУ. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО УГАТУ.



**Рис. 1.** Микроструктура сварного соединения макета блиска, изготовленного ЛСТ из сплавов и VT6 и VT8-1

Более подробное описание микроструктуры дано в работах [3–5].

Для проведения испытаний на многоцикловую усталость были изготовлены сегменты блиска с применением линейной сварки трением по оптимальному режиму.

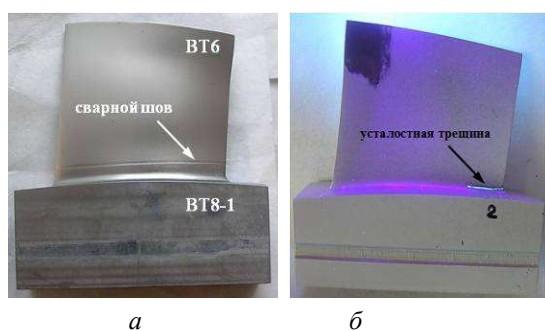
Усталостные испытания макетов производились на электродинамическом вибростенде при комнатной температуре по первой изгибной форме колебаний.

После испытаний на многоцикловую усталость макеты сегмента блиска подвергались капиллярному контролю в ультрафиолетовом свете ЛЮМ1-ОВ по ГОСТ 18442-80.

Фрактографический анализ изломов производили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6390 при ускоряющем напряжении 20 кВ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общий вид макетов сегментов блиска до и после усталостных испытаний представлен на рис. 2. Массивная часть сегмента, выполнена из сплава VT8-1, профильная лопатка – из сплава VT6.



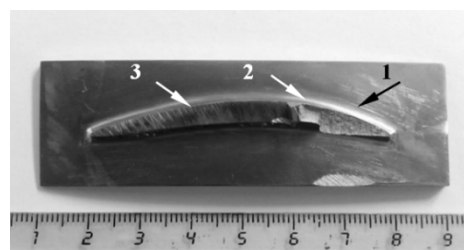
**Рис. 2.** Общий вид сегментов блиска. Место сварного соединения показано стрелкой:  
а – до усталостных испытаний, после травления; б – после усталостных испытаний и контроля ЛЮМ1-ОВ

Испытания проводились до появления макроскопической трещины, после чего макеты снимались с испытаний, разрезались с противо-

положной стороны и доламывались статически. Вид со стороны дисковой части после разделения макета приведен на рис. 3.

Как видно из рис. 4, разрушение при многоцикловых испытаниях макетов произошло по основному материалу VT8-1. Поверхность разрушения удалена от сварного шва на 3,0...3,5 мм в зоне очага трещины, на 4,0...4,5 мм в зонах распространения трещины и долома.

Место появления трещины усталости хорошо видно после контроля ЛЮМ (рис. 2, б) на лопатке после усталостных испытаний. Во всех случаях образование трещины началось от выходной кромки по радиусу закругления, как показано на рис. 5.



**Рис. 3.** Нижняя (дисковая) часть разрушенного сегмента блиска после усталостных испытаний: 1 – поверхность усталостного разрушения; 2 – зона статического долома; 3 – зона среза



**Рис. 4.** Положение поверхности разрушения относительно сварного шва



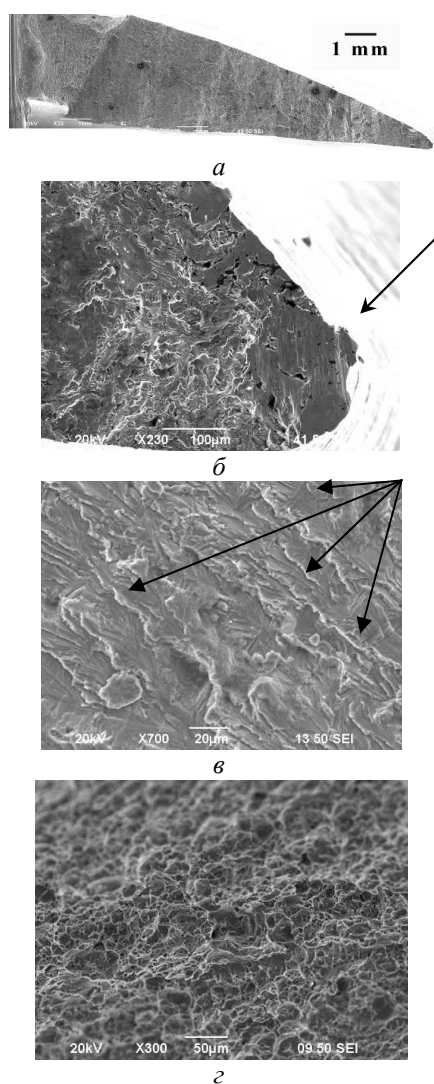
**Рис. 5.** Усталостная трещина на сегменте блиска

Постоянство места зарождения усталостной трещины может быть связано не столько со свойствами самого материала, сколько с конст-

рукцией макета блиска, в частности с радиусом закругления при переходе от тонкой профильной лопатки к массивной части макета.

Усталостная трещина расположена практически нормально к поверхности пера лопатки (рис. 2, б и 5).

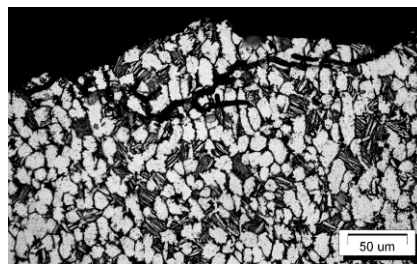
Общий вид излома приведен на рис. 6, а. Очаг разрушения расположен у выходной кромки лопатки. В этом месте на изломе (рис. 6, б) видна плоская поверхность, которая сформировалась в результате истирания под влиянием циклического нагружения, продолжающегося после появления трещины. На изломе видны периодические линии усталости (показаны стрелками на рис. 6, в).



**Рис. 6.** Структура поверхности излома после усталостных испытаний: а – общий вид излома; б – область развития трещины (стрелкой показан очаг); в – область распространения трещины г – область долома

В области распространения трещины (рис. 6, в) между линиями усталости наблюдается характерный ручьеобразный узор. Фронт трещины расположен на разных уровнях, разделяющих излом на ряд террас. На террасах видны регулярные усталостные бороздки. На профиле поверхности излома, показанном на рис. 7, хорошо различимы вторичные трещины (обозначены стрелками). Вторичные трещины (рис. 7) наблюдаются только со стороны диска и отсутствуют со стороны пера лопатки, это может быть объяснено особенностью схемы нагружения при усталостных испытаниях.

Зона статического долома расположена под углом, близким к  $45^\circ$  к поверхности пера лопатки (рис. 6, г). На снимках этой области виден ямочный излом, свидетельствующий о том, что долом осуществлялся по механизму вязкого разрушения.



**Рис. 7.** Микроструктура профиля излома макета сегмента блиска

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что разрушение сварных соединений титановых сплавов ВТ6 и ВТ8-1 в мелкозернистом состоянии происходит по основному материалу ВТ8-1. Это свидетельствует о том, что усталостная долговечность сварного шва и зоны термомеханического влияния выше прочности, как минимум, одного из соединяемых материалов. Разрушение имеет вязкий характер. Постоянство места зарождения трещины дает основания полагать, что разрушение связано не только со свойствами материала, но и с конструкцией макета блиска.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. М.: Машиностроение, 2008. Т. 2. 368 с.

2. **Коротыгин А. А., Багров С. В., Пятунин К. Р.** Разработка конструкции моноколеса вентилятора с полыми лопатками для ТРДД высокой степени двухконтурности // Труды МАИ. № 45. 20 с.

3. Влияние величины осадки на формирование сварного соединения при линейной сварке трением / М. В. Караваева [и др.] // Письма о материалах. 2012. Т. 2. С. 40–44.

4. **Mitchell L. A.** A Theory of friction and wear based on a new characterization of asperity interactions // Mat. Sci. 1999. № 40. P. 75–78.

5. **Vairis A., Frost M.** High frequency linear friction welding of a titanium alloy. Wear 217 ( 1998)

## ОБ АВТОРАХ

**Гринь Регина Равиловна**, инженер каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. магистр техники и технологии (УрФУ, 2012). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

**Караваева Марина Владимировна**, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик по машинам и технологиям обработки металлов давлением (УАИ, 1987). Канд. техн. наук (ИПСМ РАН, 1997). Иссл. в обл. объемных наноструктурных материалов.

**Большаков Борис Олегович**, асп. той же каф., инженер НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии». Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. прочности и разрушения материалов.

**Измайлова Неля Федоровна**, нач. бюро ионной имплантации отдела гл. металлурга ОАО «УМПО». Дипл. инженер по технологии машиностроения (УАИ, 1979). Иссл. в обл. упрочнения поверхности деталей газовых турбин концентрированными потоками энергии.

**Мухаметшин Рашид Рахимьянович**, вед. инженер отдела главного металлурга ОАО «УМПО». Дипл. инженер (УАИ, 1976). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

**Мусин Фаниль Фанусович**, доцент каф. материаловедения и физики металлов, техн. директор НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии». Канд. физ.-мат. наук (ИПСМ РАН, 1994). Иссл. в обл. материаловедения алюминиевых, титановых сплавов и сталей.