

Г. С. Дьяконов, Н. Ф. Измайлова, В. М. Бычков, А. Ю. Медведев,
И. П. Семенова, С. В. Жеребцов, Г. А. Салищев

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ В ЗОНЕ СВАРНОГО ШВА ПРИ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ6 И ВТ8

Проведено исследование микроструктуры сварного соединения сплава ВТ6 и ВТ8-1, полученного методом линейной сварки трением. Проанализирована структура в зоне сварного шва в зависимости от степени деформации при линейной сварке трением. Оценены прочностные характеристики сварного соединения титанового сплава ВТ6 и ВТ8-1. *Титановые сплавы; сварное соединение; линейная сварка трением; микроструктура*

Получение надежных и высокопрочных соединений из разнородных материалов представляет собой актуальную проблему в машиностроении и авиационно-космической промышленности. Некоторые материалы являются проблемными с точки зрения обычной сварки, например, по причине образования в сварном соединении хрупких интерметаллидных соединений, значительного перегрева соединяемых элементов и/или необходимости использования защитной инертной среды. К тому же плавление металла при сварке и формирование шва значительно снижает механические характеристики конструкции. Эти факторы существенно ограничивают использование обычной сварки для соединения и ремонта элементов ответственных деталей и узлов, работающих в критических условиях.

Использование такого вида сварки как сварка трением позволяет избежать подобных проблем. Сварка трением представляет собой процесс, в ходе которого выделяемое при трении тепло способствует получению сварного соединения однородных или разнородных матери-

лов. В процессе сварки разогретые и размягченные слои материала перемещаются вдоль границы свариваемой поверхности, пластифицированный материал частично выдавливается из зоны стыка. К достоинствам данного вида сварки стоит отнести минимальный объем нагреваемого материала, короткое время обработки и формирование измельченной структуры с высокими механическими свойствами [1]. Использование линейной сварки трением позволяет соединять практически любые два изделия.

Двухфазные титановые сплавы широко используются при изготовлении штамповкой и формовкой особо ответственных деталей авиационных двигателей. Кроме того, важным остается вопрос получения комплектующих изделий *газотурбинных двигателей* (ГТД) в сборе. В частности, несомненный интерес вызывает получение неразъемных монолитных соединений диска с лопаткой ротора компрессора высокого давления в авиационных ГТД на основе такого метода соединения деталей, как линейная сварка трением. Использование метода линейной сварки трением делает возможным изготовление монолитных дисков с лопатками («блисков»), что позволит уменьшить массу рабочего колеса и увеличить ресурс диска.

Одной из актуальных задач в данной области является исследование влияния параметров линейной сварки трением на формирующуюся в сварном шве структуру и механические свойства сварного соединения. В соответствии с этим в данной работе были проведены исследования микроструктуры сварного соединения титанового сплава ВТ8-1 и ВТ6 в области сварного шва, а также оценены прочностные свойства сварного соединения.

Контактная информация: 8(472)258-54-16

Результаты представленных исследований получены в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток газотурбинных двигателей с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений», реализуемого в рамках Федеральной целевой программы по Постановлению № 218 Правительства РФ от 9 апреля 2010 года совместно ОАО «УМПО» и ФГБОУ ВПО УГАТУ.

Г. С. Дьяконов выражает благодарность за финансовую поддержку ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.А18.21.1556

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материалов исследования для создания сварного соединения были использованы двухфазные ($\alpha + \beta$) сплавы мартенситного класса VT6 и VT8-1. Химический состав сплавов приведен в табл. 1. Температура полного полиморфного превращения была определена методом пробных закалок и составила: для сплава VT6 990 °С, сплава VT8-1 1020 °С.

Таблица 1

Номинальное содержание основных легирующих элементов исследуемых сплавов

Сплав	Al	V	Zr	Mo	Sn
VT6	6,1	5,2	–	–	–
VT8-1	5,0	–	1,5	4,3	1,3

Соединение сплава VT6 и VT8 осуществлялось на установке линейной сварки трением. В ходе сварки образцы под нагрузкой относительно друг друга совершали колебательные движения с заданной частотой и амплитудой. Длительность процесса определялась по величине осадки образцов.

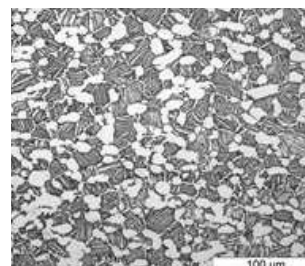
Металлографические исследования проводили в области сварного шва. Для выявления структуры был использован травитель следующего состава: HNO_3 2 мл., HF 2 мл., H_2O 96 мл. Микроструктурные исследования проводили на оптическом микроскопе «Olympus GX71», растровом микроскопе Quanta 200 3D, оснащенный приставкой энергодисперсионного анализа фирмы EDAX и Quanta 600FEG. Тонкая структура сварного соединения анализировалась при помощи просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100FX с ускоряющим напряжением 200 кВ.

Механические испытания плоских образцов с размерами рабочей части $3 \times 20 \times 43$ мм проводили на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 5882 при температуре 20 °С. Скорость перемещения траверсы составлял 1 мм/мин.

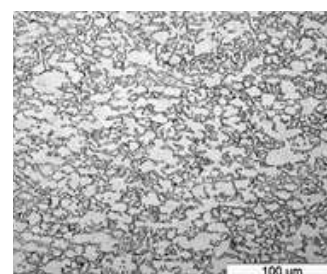
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, а, б представлена исходная микроструктура титановых сплавов VT8-1 и VT6. Сплав VT8-1 имеет микроструктуру 3-го типа по шкале микроструктур двухфазных $\alpha + \beta$ -титановых сплавов (рис. 1, а) [2]. Средний размер глобулярных α -зерен составляет 11 мкм, расстояние между α -зернами около 15 мкм, а тол-

щина α -пластин в пластинчатой $\alpha + \beta$ смеси составляет 1,2 мкм. Микроструктура сплава VT6 соответствует 1-му типу согласно шкале микроструктур двухфазных $\alpha + \beta$ -титановых сплавов (рис. 1, б) [2]. Наблюдается отсутствие пластинчатой $\alpha + \beta$ смеси в VT6 и близкие по форме к равноосной α -зерна размером около 7 мкм.



а



б

Рис. 1. Исходная микроструктура:
а – сплава VT8-1; б – сплава VT6

В ходе сварки трением микроструктура сплавов в области сварного шва меняется (рис. 2). Можно выделить несколько характерных зон, которые отличаются по травимости, размерам и форме зерен.

Зона основного металла (рис. 2, точки 1 – VT8-1 и 5 – VT6) не испытывает заметных изменений и соответствует исходному состоянию (рис. 1).

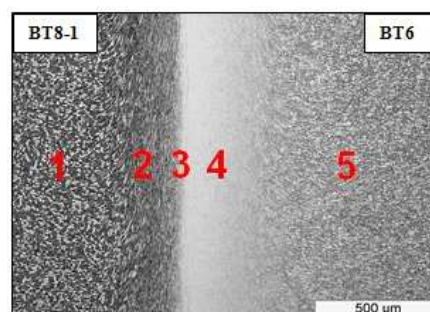


Рис. 2. Микроструктура сплавов VT8-1 и VT6, подвергнутых линейной сварке трением с коэффициентом деформации $\lambda = 1,4$

Переходная зона (рис. 2, точки 2 – ВТ8-1 и 4 – ВТ6) примыкает непосредственно к зоне основного исходного металла и здесь отмечается поворот волокон металла параллельно плоскости соединения. Наличие такой структуры свидетельствует о значительной пластической деформации материала. Сформировавшаяся в переходной зоне структура различается для сплава ВТ8-1 и ВТ6 (рис. 3). Для ВТ8-1 характерно существенное вытягивание зерен в направлении деформации. Тогда как в переходной зоне ВТ6 наблюдаются практически равноосные рекристаллизованные зерна размером около 10 мкм. Равноосная форма зерен может свидетельствовать о том, что они образовались после завершения пластической деформации. Такое различие формирующейся в переходной зоне структуры, вероятно, связано с более низкой для ВТ6 температурой полиморфного превращения.

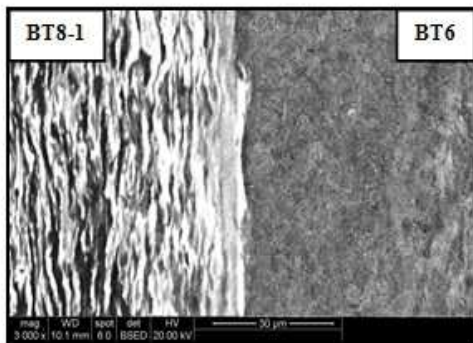


Рис. 3. Микроструктура переходной зоны сплава ВТ8-1 и ВТ6. Коэффициент деформации $\lambda = 1,4$

В области 3 зоне сварного шва (рис. 2) – сплав ВТ6 имеет рекристаллизованную равноосную структуру, а ВТ8-1 характеризуется наличием вытянутых зерен. Несмотря на большую пластическую деформацию в зоне сварного шва, разогрев и преобразование микроструктуры, на стыке сплавов ВТ8-1 и ВТ6 различаются несплошности и поры (указано стрелкой на рис. 4).

Микроструктура в зоне сварного шва была исследована с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Было установлено, что зона непосредственно сварного шва и вблизи него имеет мартенситную структуру (рис. 5). Очевидно, что образованию такой микроструктуры способствовало быстрое охлаждение после окончания процесса линейной сварки трением.

Считается, что увеличение деформации в ходе линейной сварки трением гарантирует

выход окалины с торцев заготовок в грат, что приводит к более однородному и прочному соединению материалов [3]. Как видно из рис. 6 увеличение коэффициента деформации в ходе линейной сварки трением до $\lambda = 3$, приводит к более плотному соединению материалов. В зоне сварного шва не выявляются поры, несплошности и иные дефекты соединения.

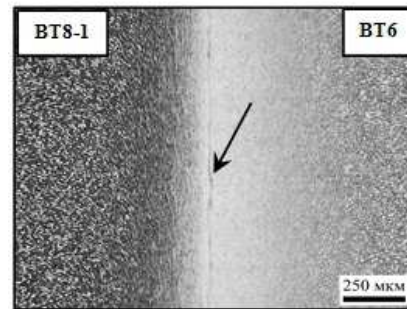


Рис. 4. Зона сварного шва сплавов ВТ8-1 и ВТ6 подвергнутых линейной сварке трением с коэффициентом деформации $\lambda = 1,4$

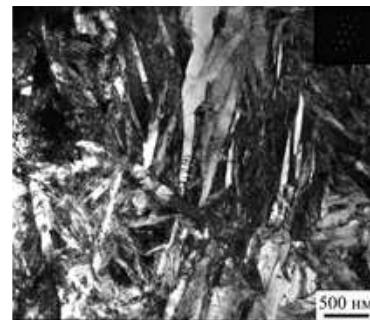


Рис. 5. Тонкая структура зоны сварного шва (ВТ6), содержащая мартенсит α' . Коэффициент деформации $\lambda = 1,4$

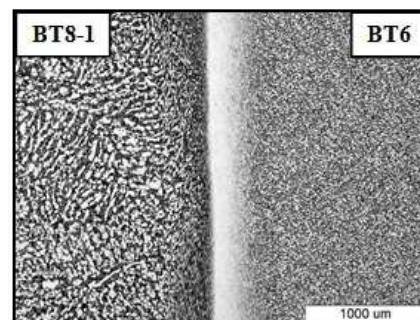


Рис. 6. Зона сварного шва сплавов ВТ8-1 и ВТ6, подвергнутых линейной сварке трением с коэффициентом деформации $\lambda = 3$

Повышение коэффициент деформации до $\lambda = 3,9$ и $\lambda = 6$ также обеспечивает качественное соединение материалов. При этом с ростом коэффициента деформации изменяется ширина переходной зоны (рис. 7).

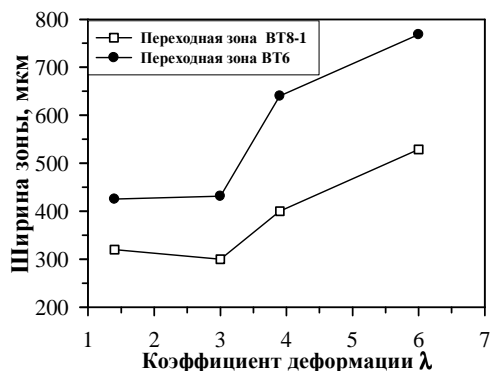


Рис. 7. Ширина переходной зоны в сварном шве сплавов ВТ8-1 и ВТ6, подвергнутых линейной сварке трением с разными коэффициентами деформации

Как следует из микроструктурных исследований ширина переходной зоны, в которой развивалась пластическая деформация и рекристаллизационные процессы неодинакова для сплавов ВТ6 и ВТ8-1. Связано это, по-видимому, с более низкой температурой полиморфного ($\alpha + \beta \rightarrow \beta$) превращения в ВТ6 по сравнению с ВТ8-1. Локальный разогрев в районе стыка при сварке трением, очевидно, превышает $T_{\text{пп}}$ для обоих сплавов, но в случае ВТ6 зона термического воздействия шире. Для оценки механической прочности сварного соединения образцов сплавов ВТ8-1 и ВТ6 после линейной сварки трением были проведены механические испытания на растяжение. Механические характеристики, определенные по результатам испытаний на растяжение, представлены в таблице.

Механические свойства на растяжение образцов вырезанных из центральной зоны сварного шва сплавов ВТ8-1 и ВТ-6 подвергнутых линейной сварке трением с разными коэффициентами деформации

Коэффициент деформации	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности, $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Удлинение после разрушения, δ , %
1,4	939	1020	11,39
3,0	924	990	13,78
3,9	927	1020	12,61
6,0	925	990	12,02

Полученные результаты указывают на то, что в исследуемом диапазоне коэффициентов деформации при линейной сварке трением в зоне сварного шва обеспечиваются высокие прочностные свойства. Среднее значение предела текучести и предела прочности составило 925 МПа и 1000 МПа, а величина относительного удлинения на уровне 12 %.

Необходимо отметить, что разрушение образцов в ходе испытаний на растяжение происходило по основному материалу (сплав ВТ6), за пределами зоны шва и переходной зоны. Хорошая адгезия свариваемых материалов и формирование в области шва мартенситной структуры с более высокими прочностными характеристиками, по сравнению с основным металлом обеспечили высокие прочностные свойства зоны шва.

ВЫВОДЫ

В области сварного шва выделяются следующие характерные зоны: 1 – зона основного металла, которая соответствует исходному состоянию материала; 2 – переходная зона – характеризуется выраженной металлографической текстурой, зерна вытянуты параллельно сварному соединению; 3 – зона шва – характеризуется наибольшей величиной пластической деформации, микроструктура представлена полностью, либо частично рекристаллизованными зернами.

Установлено, что в зоне сварного шва в ходе пластической деформации и деформационного разогрева происходит существенное преобразование микроструктуры. В ходе термомеханического воздействия в сплаве ВТ6 формируется рекристаллизованная структура содержащая мартенсит α' . Для ВТ8-1 в переходной зоне и зоне шва наблюдается вытянутая в направлении деформации структура.

Показано, что в интервале коэффициентов деформации линейной сварки трением $\lambda = 1,4 \sim 3,9$ обеспечивается качественное соединение с высокими прочностными свойствами.

В ходе испытаний на растяжение образцов после линейной сварки трением установлено, что разрушение происходит не в зоне соединения материалов, а по основному металлу (ВТ6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штрикман М. М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений // Сварочное производство. 2007. № 10. С. 25–32.

2. Металлография титановых сплавов / Е. А. Борисова [и др.]. М. Металлургия 1980. 464 с.

3. Особенности технологии сварки трением соединений из сплавов ВКНА-25 И ЭП975 / В. И. Лукин [и др.] // Сварочное производство. 2010. № 5. С. 28–33.

ОБ АВТОРАХ

Дьяконов Григорий Сергеевич, мл. науч. сотр. лаб. объемн. наноструктурн. материалов ФГАОУ ВПО НИУ «БелГУ». Дипл. инженер-физик (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. термомеханическ. обработки металлов и сплавов, методов деформационной обработки, структуры и механическ. свойств материалов.

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

Бычков Владимир Михайлович, доц. той же каф. Дипл. инж.-мех. (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.

Медведев Александр Юрьевич, доц. каф. оборудования и технологии сварочного пр-ва. Дипл. магистр техники и технологий по машинам и технологии сварочн. пр-ва (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и техн. сварочн. пр-ва» (Тольяттинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделир-я нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.

Семенова Ирина Петровна, ст. науч. сотр. Ин-та физики перспективн. материалов. Дипл. инж.-металлург (УПИ-УГТУ, 1981). Канд. техн. наук по металлвед. и термообр. металлов (УПИ-УГТУ, 1999). Иссл. в обл. наноструктурн. титан. сплавов, получ. с использованием интенсивн. пластич. деформации.

Жеребцов Сергей Валерьевич, доц. каф. материаловедения и нанотехнологий, ст. науч. сотр. лаб. объемн. наноструктурн. материалов ФГАОУ ВПО НИУ «БелГУ». Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук. Иссл. в обл. деформационной и термическ. обработки металлов и сплавов, эволюции структуры и механическ. поведения металлических материалов в процессе больших пластических деформаций.

Салищев Геннадий Алексеевич, проф. той же каф. рук. той же лаб. Д-р техн. наук. Иссл. в обл. деформационной и термическ. обработки металлов и сплавов, эволюции структуры и механическ. поведения металлическ. материалов в процессе деформации до больших степеней.