УДК 669.295:669.018.62

А. В. ОВЧИННИКОВ

Запорожский национальный технический университет, Украина

РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДАМИ СВАРКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПРИСАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе исследованы состав, структура и механические свойства сварных соединений жаропрочных титановых сплавов ВТ8 и ВТ3-1, полученных аргонно-дуговой сваркой с применением опытных присадочных материалов, модифицированных иттрием. Установлено влияние структурного состояния присадочных материалов (литое и субмикрокристаллическое) на механизмы разрушения и механические свойства сварных соединений титановых сплавов. Показано, что применение присадочных материалов с субмикрокристаллической структурой позволяет повысить прочностные и пластические свойства сварных соединений сплавов ВТ3-1 и ВТ8.

Ключевые слова: *аргонно-дуговая сварка, присадочные материалы, дефекты, механические свойства.*

1. Постановка проблемы

Применение сварки при производстве и ремонте изделий из сложнолегированных титановых сплавов связано с целым рядом проблем. Наиболее сложной является сварка жаропрочных титановых сплавов, используемых в газотурбинных двигателях (ГТД), так как они применяются в различном фазовом и структурном состоянии, обеспечивающем необходимый уровень механических и служебных свойств материала [1]. Проблемы свариваемости сопряжены с изменением структуры сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ), а также с образованием дефектов структуры сварного шва (пористость, неметаллические включения, химическая и структурная неоднородность). Одним из основных дефектов является пористость сварного шва, на долю которой приходится до 56 % от общего числа дефектов [2]. Свойства сварного шва и появление в его структуре таких дефектов как поры, неметаллические включения, химическая и структурная неоднородность непосредственно зависят от состава и качества присадочных материалов. Особое значение вопросы, связанные с качеством присадочных материалов, приобрели в последние годы, так как сложнолегированные жаропрочные титановые сплавы применяются для тонкостенных деталей (лопатки, перо моноколеса и др.), работающих на пределе запаса прочности материала. Поэтому, наличие микродефектов в присадочных материалах может привести к полной потере работоспособности восстанавливаемых деталей. В ряде работ описаны способы уменьшения количества дефектов в присадочных материалах [3, 4]. Однако предложенные решения относятся к поверхностным дефектам и не решают проблем объемного структурного состояния присадок.

Таким образом, при сварке ответственных деталей из жаропрочных титановых сплавов, применяемых для роторных деталей ГТД необходимо, чтобы присадочные материалы обеспечивали стабильно высокое качество сварного шва. В работе рассмотрены вопросы влияния структурного состояния присадочных материалов на структуру и свойства сварных соединений жаропрочных титановых сплавов.

2. Материалы и методика исследований

В качестве объекта исследований выбраны сварные соединения из двухфазных жаропрочных титановых сплавов – ВТ3-1 и ВТ8. Сварку производили по серийной технологии для титановых деталей аргоно-дуговым способом, вольфрамовым электродом в среде защитных газов. Использовали присадочные материалы тех же составов (ВТ8 и ВТ3-1), но модифицированные иттрием. Выплавляли слитки методом вакуумно-дугового переплава массой 1,3 кг. В качестве экспериментальных присадочных материалов применяли прутки диаметром 1,2 мм того же состава, но с субмикрокристаллической (СМК) структурой. Заготовки для прутков с СМК структурой получали из слитков путем интенсивной пластической деформации (ИПД) методом винтовой экструзии (ВЭ) с одновременным действием нормальных и касательных напряжений при температурах свыше 700°С [5, 6]. Из заготовок СМК-титановых сплавов изготавливали прутки диаметром 1,2-2,0 мм, которые использовали в качестве присадочных материалов.

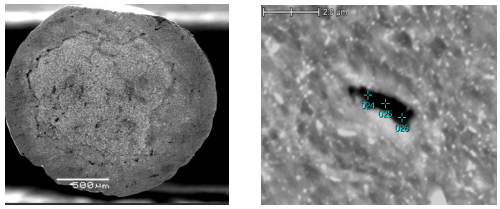
© А. В. Овчинников

Исследование химического состава осуществляли спектральным анализом по ГОСТ 19863.1 - 19863.13 и микроанализом на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM – T300 фирмы JEOL. Исследования микроструктуры проводили на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100CXII при ускоряющем напряжении 100 кВ, а также на растровых электронных микроскопах JSM-T300 и РЭМ-106И с энергодисперсионным анализом по линии и в точке. Механические свойства определяли на разрывной испытательной машине фирмы INSTRON. Статическую прочность и угол загиба сварных соединений определяли согласно ГОСТ 6996-66 и ГОСТ 14019-2003. Количество пор определяли методами количественной металлографии [7]. При анализе поверхности разрушения образцов по сварному шву фиксировалось количество и размер пор на 1 мм^2. Микротвердость исследовали на микротвердомере ММ7Т фирмы «BUEHLER» (ГОСТ 9450-76).

3. Результаты исследований и их анализ

Как отмечалось выше, основными причинами пористости сварного шва есть дефекты в структуре присадочных материалов. На основании анализа результатов исследований макро- и микроструктуры стандартных присадочных материалов установлено наличие пор и несплошностей (рис. 1).

Второй недостаток – химическая и структурная неоднородность в присадочных материалах характерная для сложнолегированных титановых сплавов. Исследования стандартных присадочных материалов применяемых для сварки сплава ВТ3-1 и ВТ8 показали, что в них имела место химическая неоднородность.



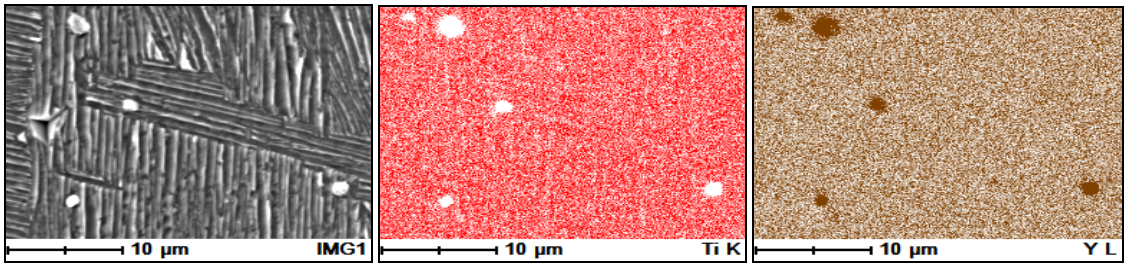
а б

Рис. 1. Макро- (а) и микроструктура (б) присадок

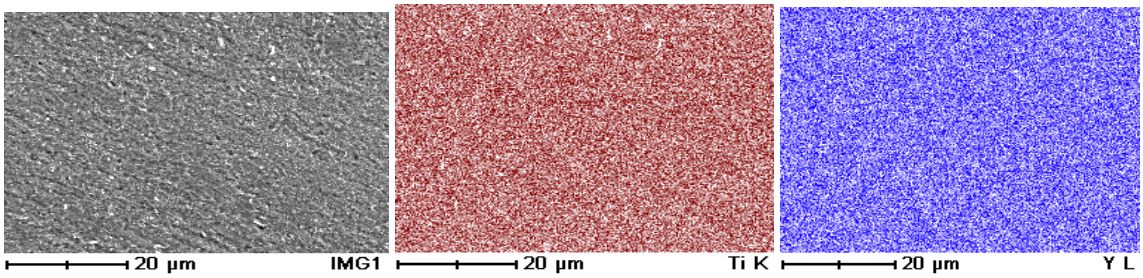
Для устранения перечисленных дефектов сформулирован новый подход к формированию структуры присадочных материалов. Предложено применить присадочные материалы с нано- или СМК-структурой. Это, согласно результатам ранее проведенных исследований, позволит получить равномерное распределение легирующих и модифицирующих элементов в объеме присадочных материалов.

Прутки экспериментального материала получали по специально разработанной технологии, в основе которой лежал метод ВЭ [5, 6]. Применение метода ИПД для сложнолегированных титановых сплавов обеспечило более равномерное распределение легирующих и модифицирующих элементов, что достаточно широко освещено в работах [8, 9].

Исследовано влияние ИПД методом ВЭ на структуру и распределение модификатора в титановых сплавах (рис. 2). С использованием методов растровой микроскопии установлено, что после ИПД имело место измельчение включений, которые содержат иттрий. Показано, что в результате одновременного действия температуры, касательных и осевых напряжений во время интенсивной объемной деформации происходит перераспределение модификатора (иттрия) по границам СМК структурных составляющих титанового сплава.



а



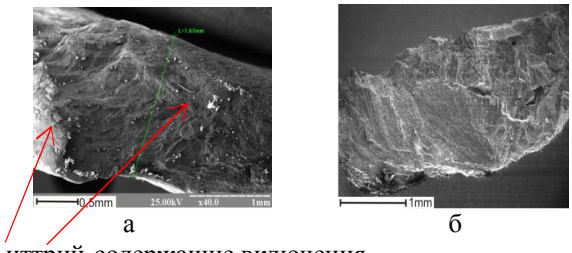
б

Рис. 2. Структура и распределение модификаторов в присадочных материалах сплава ВТ8+Y с литой (а) и СМК (б) структурами

В результате легирующие и модифицирующие элементы распределялись равномерно по объему сплавов, а химическая и структурная неоднородность в СМК присадочных материалах практически отсутствовала. В структуре СМК присадочных материалов отсутствовали поры, несплошности и другие дефекты, отмеченные для стандартных сплавов. Устранение указанных дефектов, очевидно, являлось следствием «залечивания» пор под действием высоких давлений и повышенной температуры. Аналогичный эффект используется при обработке литых титановых деталей в газостате [10, 11]. Сравнительные исследования сварных соединений пластин из жаропрочного титанового сплава ВТ8 и ВТ3-1, полученных с применением стандартных и СМК присадочных материалов показали, что при применение СМК присадочных материалов имело место повышения уровня механических свойств сварных соединений и уменьшение среднеквадратического отклонения (СКО) (табл. 1).

Как следует из анализа представленных данных, уровень механических свойств сварных соединений, полученных с применением СМК присадочных материалов, в сравнении со стандартными присадками, повысился как по показателям прочности, так и по показателям пластичности. Применение СМК присадок позволило повысть стабильность свойств сварных соединений. Средние значения предела прочности для сварных соединений с применением СМК присадок, полученных из титана ВТ3-1, составило 1025 МПа, а для стандартных присадок не превысило 1015 МПа. Разница в показателе предела прочности между соединениями, полученными с СМК присадками и стандартными из сплава ВТ8 и ВТ3-1, составила 10 МПа. Аналогичная тенденция установлена и для показателей пластичности. Для сварных швов, полученных с помощью СМК присадок, среднее значение угла загиба на 7 град. для присадки из ВТ3-1+Y и 5 град. для присадки из ВТ8+Y больше, чем для швов, полученных с присадками с литой структурой.

Важным аспектом является повышение стабильности свойств опытных соединений. Так, максимальный разброс свойств по СКО установлен у соединений, полученных с применением стандартных присадок. По показателям прочности разброс свойств составлял: по $\sigma_в$ около 53%, по σ_{-1} около 51%. При этом образец разрушился по сварному шву, а, следовательно, причиной разрушения являлись дефекты структуры. Для сварных соединений, полученных с применением СМК присадок, разброс свойств по прочности не превышал 30%, а по углу загиба не превысил 12%. Для литых присадок разница по углу загиба сварных соединений составила около 13%. Установленная закономерность характерна и для относительного удлинения. В целом, сварные соединения, полученные с применением СМК присадок, имели более высокие показатели механических свойств: предел прочности на 1% и 3%, относительное удлинение на 13% и 11%, угол загиба на 9 % и 6 % для нелегированных и легированных присадок соответственно. Более высокие и стабильные свойства сварных соединений, полученных с применением СМК присадок, можно объяснить тем, что в структуре сварных соединений значительно меньшее количество дефектов (рис. 3).



а б

иттрий-содержащие включения

Рис. 3. Поверхности разрушения плоских образцов для циклических испытаний сварных швов титанового сплава ВТ8, полученных присадочными материалами состава ВТ8+Y с литой (а) и СМК (б) структурами

Таблица 1

Механические свойства сварных соединений жаропрочных титановых сплавов, полученных с использованием присадочных материалов с разной структурой

Основной металл	Присадка (структура)	Механические свойства			
		$\sigma_{в\,св}$ / СКО, МПа	$\delta_{св}$ / СКО, %	$\varphi_{св}$ / СКО, град	$\sigma_{-1\,св}$ / СКО, МПа
ВТ3-1	склад №1 ВТ3-1 + Y (литой)	1015 / 77	5,9 / 1,20	70 / 6,7	410 / 58
	склад №1 ВТ3-1 + Y (СМК)	1025 / 36	6,8 / 0,92	77 / 4,9	462 / 28
ВТ8	склад №1 ВТ8 + Y (литой)	1055 / 42	5,5 / 1,34	75 / 5,8	460 / 45
	склад №1 ВТ8 + Y (СМК)	1088 / 25	6,2 / 0,88	80 / 4,3	477 / 26

На поверхности разрушения сварного соединения, полученного по стандартной технологии, выявлены иттрий содержащие включения размером от 5 мкм до 15 мкм. Характер разрушения образцов позволяет сделать вывод о причастности обнаруженных иттрий содержащих включений к образованию трещин и последующего их развития. В соединениях, полученных с применением СМК сплавов, эти включения практически отсутствовали, что, повидимому, и обеспечило более высокий уровень механических свойств этих соединений в сравнении со стандартными.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что применение присадочных материалов с СМК структурой взамен стандартных присадок позволяет:

1. Устранить поры и несплошности в структуре присадочных материалов в результате «залечивания» последних под действием объемной деформации при повышенной температуре по принципу аналогичному газостатической обработки.

2. Устранить химическую и структурную неоднородность легирующих и модифицирующих элементов характерную для присадок из двухфазных титановых сплавов.

3. Увеличить энергоемкость разрушения сварных соединений жаропрочных титановых сплавов за счет снижения количества дефектов в структуре сварного шва (поры, химическая и структурная неоднородность).

4. Повысить уровень механических свойств сварных соединений из сплава ВТ8, в сравнении с соединениями, полученными с применением стандартных присадок. Предел прочности $\sigma_в$ повысился на 3%, σ_{-1} на 4%, δ на 11%, φ на 6%.

Литература

1. Колачев, Б. А. Физические основы разрушения титана [Текст] / Б. А. Колачев, А. В. Мальков. – М. : Металлургия, 1983. – 160 с.

2. Муравьев, В. И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов [Текст] / В. И. Муравьев // МиТОМ. – 2005. – № 7(601). – С. 30–37.

3. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов [Текст] : моногр. / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, Я. Ю. Компан и др. ; под ред. С. М. Гуревича. – К. : Наукова думка, 1979. – 300 с.

4. Пат. 2201320 Российская Федерация, МПК B23K9/16. Способ аргонодуговой сварки [Текст] / Б. И. Долотов, В. И. Меркулов ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю. А. Гагарина". – № 2001130911/02 ; заявл. 15.11.2001 ; опубл. 27.03.2003.

5. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков. – Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.

6. Пат. № 46999 Украина, МПК B21C 25/00. Способ упрочнения материала и устройство для его осуществления [Текст] / С. Г. Сынков, В. Н. Варюхин, В. Г. Сынков и др. ; заявитель и патентообладатель Дон ФТИ НАН Украины. – № 2001053243 ; заявл. 12.04.2001 ; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 6.

7. Количественный металлографический анализ двухфазных титановых сплавов. Метод. рекомендация № МР 149-36-81 [Текст]. Действует от 1981-01-20. – М. : ВИЛС. – 20 с.

8. Применение винтовой экструзии для получения субмикрокристаллической структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан и др. // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 185–188.

9. Овчинников, А. В. Оценка эффективности применения интенсивной пластической деформации для получения нанокристаллической структуры в титановом сплаве ВТ3-1 [Текст]/ А. В. Овчинников, Д. В. Павленко, А. Я. Качан и др. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – № 1. – С. 27–31.

10. Падалко, А. Г. Практика гарячего изостатического пресования неорганических материалов [Текст]/ А. Г. Падалко. – М. : ИКЦ, акад. кн., 2007. – 267 с.

11. Гарибов, Г. Ф. Развитие высокотемпературной газостатической обработки титановых сплавов [Текст]/ Г. Ф. Гарибов // Технология легких сплавов. – 2006. – № 1-2. – С. 120 – 130.

Поступила в редакцию 12.05.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

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

РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ АВІАДВИГУНІВ ІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ МЕТОДАМИ ЗВАРЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНИХ ПРИСАДКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

О. В. Овчинников

В роботі досліджено склад, структуру і механічні властивості зварних з'єднань жароміцних титанових сплавів ВТ8 і ВТ3-1, отриманих аргоно-дуговим зварюванням з використанням дослідних присадкових матеріалів, модифікованих ітрієм. Встановлено вплив структурного стану присадкових матеріалів (литий та субмікрокристалічний) на механізми руйнування і механічні властивості зварних з'єднань титанових сплавів. Показано, що використання присадкових матеріалів з субмікрокристалічною структурою дозволяє підвищити міцність та пластичність зварних з'єднань сплавів ВТ3-1 і ВТ8.

Ключові слова: аргоно-дугове зварювання, присадкові матеріали, дефекти, механічні властивості.

AIRCRAFT ENGINE PARTS MADE FROM TITANIUM ALLOYS REPAIR USING WELDING METHODS WITH SUB MICROCRYSTAL ADDING MATERIAL APPLICATION

A. V. Ovchinnikov

In this work composition, structure and mechanical properties of welding joints of heatproof titanium alloys BT8 and BT3-1 have been researched. Joints have been obtained with using of argon-arc welding with experimental adding materials, which were modified by yttrium, application. Influence of structural state of adding materials (cast and sub microcrystal) on destruction mechanisms and mechanical properties of welding joints of titanium alloys have been determined. It is shown, that adding materials with sub microcrystal structure application allows increasing of strength and plastic properties of welding joints of BT3-1 and BT8 alloys.

Key words: argon-arc welding, adding materials, defects, mechanical properties.

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