

УДК 621.791.05

Куликовский Р. А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

Высокопрочные двухфазные сплавы титана из-за своих особых физическим свойств и достаточно высокой прочности имеют удельную прочность выше, чем у высокопрочных сталей. Сплавы титана химически стойки в агрессивных средах при нормальных и повышенных температурах (до 450 °С) [1]. Названные свойства дают им преимущество в ряде отраслей промышленности, в том числе в авиа- и моторостроении.

Однако далеко не во всех случаях литье, механообработка и механосборка удовлетворяют потребности машиностроителей. Надежные соединения деталей из титановых сплавов подчас возможны только с использованием сварки. В тоже время, широко применяемые в настоящее время для титановых сплавов способы сварки плавлением – аргодуговая (АДС), электронно-лучевая (ЭЛС), а также контактная сварка не обеспечивают структуру сварного соединения близкую к структуре основного металла и, как следствие, получение равнопрочных основному металлу соединений жаропрочных титановых сплавов. Зона термического влияния (ЗТВ) в титановых сплавах при АДС и ЭЛС сварке составляет 3...5 и 1...3 мм соответственно [2]. Известно [3], что качество сварных соединений, выполненных на титановых сплавах, во многом определяется термомеханическим циклом сварки. При сварке 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 температуры полиморфного превращения, перегревом и образованием хрупких фаз при охлаждении и старении. Это существенно ограничивает области применения сварки для деталей из жаропрочных титановых сплавов.

Альтернативным способом сварки титановых высокопрочных двухфазных сплавов, позволяющим получить сварное соединение с обеспечением требуемых механических свойств и без расплавления металла, в некоторых случаях может быть способ сварки давлением – сварка трением. При данном способе сварки ЗТВ практически отсутствует [2]. Однако, в настоящее время недостаточно сведений о технологической свариваемости и методах ее определения соединений титановых сплавов, выполненных способами сварки давлением. Таким образом, определение прочностных характеристик соединений титановых сплавов, выполненных сваркой трением, является актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование стыковых соединений двухфазных жаропрочных сплавов титана ВТ 3-1, ВТ 8 и ВТ 9 (табл. 1), выполненных сваркой трением (рис. 1).

Таблица 1

Средний химический состав в % и временное сопротивление двухфазных жаропрочных титановых сплавов [1]

Сплав	Cr	Al	Mo	Прочие	σ_{δ} , МПа
ВТ 3-1	2	5,5	2	0,5 Zr, 0,2 Si, 0,35 Fe	1200...1300
ВТ 8	–	6,5	3,5	0,5 Zr, 0,3 Si, 0,3 Fe	1100...1250
ВТ 9	–	6,5	3,5	2 Zr, 0,2 Si, 0,2 Fe	1100...1300

Примечание. Значение временного сопротивления σ_{δ} приведено после закалки и старения



Рис. 1. Соединение титанового сплава, выполненного сваркой трением

Сварку осуществляли на машине МСТ-2, использовались режимы сварки, рекомендованные в [2]. Временное сопротивление растяжению образцов определяли на разрывной машине ИР-100. Образцы изготавливались из прутков $\varnothing 10$ и 12 мм. Использовались сплавы в состоянии поставки – закаленные, после старения, HRC 38–42 ед.

Прочностные испытания опытных образцов проводились согласно ГОСТ 1497-84 [4] и ГОСТ 6996-66 [5].

Для стыковых сварных соединений цилиндрических образцов ГОСТ 6996-66 определяет применение образцов двух типов (рис. 2).

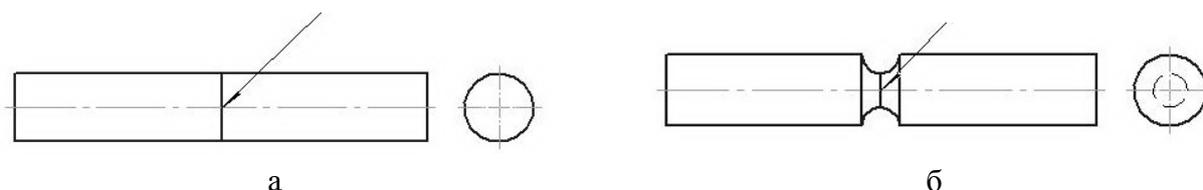


Рис. 2. Форма цилиндрических образцов для испытания стыковых соединений по ГОСТ 6996-66:

а – гладкий образец для определения прочности наиболее слабого участка сварного соединения; б – образец с проточкой по центру шва для определения прочности металла шва в стыковом соединении

Кроме того, дополнительно были испытаны цельные образцы из этих же материалов, форма и размер которых соответствуют сварным образцам, изготовленным согласно рис. 2, б. Результаты испытаний прочностных свойств исследуемых образцов приведены в табл. 2.

В результате анализа полученных результатов установлено, что значение временного сопротивления цельных образцов, изготовленных по ГОСТ 1497-84, и сварных образцов, предназначенных для определения наиболее слабого участка сварного соединения по ГОСТ 6996-66, практически идентично. Полученные значения прочности соответствуют справочным данным временного сопротивления исследуемых сплавов [1]. Совпадают характер и место разрушения обоих типов образцов (рис. 3, а, б). Разрушение сварных образцов происходит по основному металлу. Следовательно, прочность соединения титановых жаропрочных сплавов, выполненная сваркой трением должна быть не меньше прочности основного металла, при этом, в отличие от соединений, выполненных способами сварки плавлением, отсутствует разупрочненная околосшовная зона.

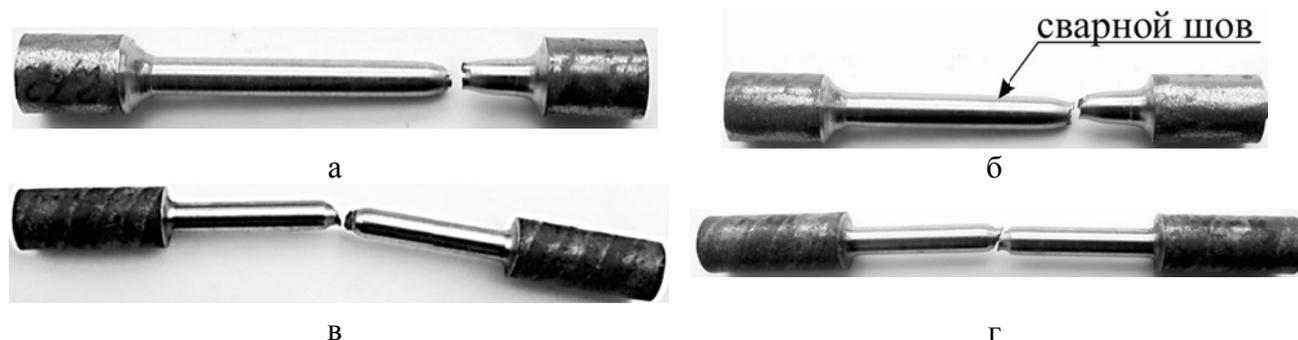


Рис. 3. Характер и место разрушения исследуемых образцов:

а – гладкий цельный образец, изготовленный по ГОСТ 1497-84; б – образец для определения прочности наиболее слабого участка сварного соединения по ГОСТ 6996-66; в – цельный образец с проточкой; г – образец для определения прочности металла шва в стыковом соединении по ГОСТ 6996-66

В то же время следует обратить внимание на то, что прочность металла шва, определенная по ГОСТ 6996-66, больше прочности основного металла в среднем в 1,3...1,4 раза. При этом данные результаты хорошо коррелируются с результатами испытаний прочности цельных образцов с проточкой, изготовленных по ГОСТ 6996-66 для стыкового соединения металла шва независимо от марки свариваемого материала. Одинаковы также характер и место разрушения обоих типов образцов (рис. 3, в, г). Предположительно, причиной несоответствия прочности основного металла цельного гладкого образца, изготовленного по ГОСТ 1497-84, и цельного образца с проточкой является влияние формы образцов на механизм разрушения.

Таблица 2

Временное сопротивление (σ_{σ}) основного металла и соединений титановых сплавов ВТ 3-1, ВТ 8, ВТ 9, выполненных сваркой трением

Сплав	Прочность основного металла, МПа		Прочность сварного соединения, МПа	
	σ_{σ} цельных образцов, изготовленных по ГОСТ 1497-84	$\sigma_{\sigma, пр.}$ цельных образцов, изготовленных по ГОСТ 6996-66 для стыкового соединения металла шва	$\sigma_{\sigma, с.у.}$ образцов для определения наиболее слабого участка сварного соединения	$\sigma_{\sigma, ш.}$ образцов для определения прочности металла шва
ВТ 3-1	1100...1200	1460...1520	1100...1200	1480...1600
ВТ 8	1160...1220	1400...1680	1160...1220	1540...1670
ВТ 9	1100...1250	1460...1540	1100...1250	1600...1750

Известно [6], что при растяжении образцов с проточкой в зоне проточки возникает объемно-напряженное состояние, при котором величина предела прочности значительно возрастает и приближается к величине сопротивления отрыву. У образца с проточкой деформация при растяжении минимальна и в основном сосредотачивается в области проточки. При этом, чем меньше радиус закругления проточки, тем меньший объем охватывает пластическая деформация.

Исследование изломов сварных и цельных образцов показало, что характер разрушения в изломе для сплавов ВТ 3-1, ВТ 8, ВТ 9 не зависит от конкретного состава данного типа материалов, а только от геометрии образца. На изломе цельного гладкого образца (рис. 4) около 40 % площади занимают плоскости скольжения, свидетельствующие, что разрушение сопровождалось первоначальным интенсивным развитием пластической деформации, сопровождающейся появлением и накоплением микротрещин.



Рис. 4. Изломы сплава ВТ 8, полученные при растяжении:

а – цельного гладкого образца; б – сварного соединения с проточкой в месте сварки; в – цельного образца с проточкой

В тоже время, в изломе цельных образцов с проточкой следы пластической деформации занимают не более 7–10 % его площади, остальная часть излома свидетельствует о квазихрупком разрушении, на развитие которого затрачивается большее количество энергии.

Таким образом, различное значение временного сопротивления разрушению σ_v объясняется изменением механизма разрушения гладких образцов и образцов с проточкой одного состава.

Полученные результаты исследований соответствуют требованиям ГОСТа 6996-66, где указывается, что временное сопротивление разрушения $\sigma_{v.ш.}$ металла шва для стыковых сварных соединений следует определять по формуле:

$$\sigma_{v.ш.} = k \frac{P}{F},$$

где P – максимальное усилие, Н;

F – площадь поперечного сечения образца в наименьшем сечении до испытания, мм²;

k – поправочный коэффициент, устанавливаемый технической документацией [5].

Поскольку для исследуемых сплавов титана нормативная документация для сварки трением отсутствует, то для определения значения прочности металла шва (временное сопротивление разрушению $\sigma_{v.ш.}$) следует применять усредненный поправочный коэффициент k , определяемый как отношение $\sigma_{v.тр.}/\sigma_v$.

С учетом данных табл. 2 усредненный поправочный коэффициент k для исследованных двухфазных титановых сплавов равен 0,75.

Таким образом, с учетом поправочного коэффициента, установленного для жаропрочных титановых сплавов, временное сопротивление металла шва, выполненного сваркой трением для сплавов ВТ 3-1, ВТ 8 и ВТ 9, будет составлять 1110...1200 МПа, 1160...1250 МПа, 1200...1310 МПа соответственно, что соответствует уровню прочности основного металла.

ВЫВОДЫ

При определении прочности металла шва в стыковом соединении титановых двухфазных жаропрочных сплавов ВТ 3-1, ВТ 8 и ВТ 9, выполненных сваркой трением, следует применять поправочный коэффициент $k = 0,75$.

Сварка трением титановых двухфазных жаропрочных сплавов ВТ 3-1, ВТ 8 и ВТ 9 позволяет получить сварные соединения, равнопрочные с основным металлом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Строение и свойства авиационных материалов : учебник для вузов / [А. Ф. Белов, Г. П. Бенедиктова, А. С. Висков и др.]*. – М. : Металлургия, 1989. – 368 с.
2. *Исследование механических свойств сварных соединений сплава ВТ 3-1, выполненных сваркой трением / [А. Г. Селиверстов, И. А. Петрик, Ю. М. Ткаченко и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение*. – 2011. – № 4 (26). – С. 3–20. – Библиогр.: с. 41–44.
3. *Балащук В. Е. Титан: сплавы, сварка, применение / В. Е. Балащук // Автоматическая сварка*. – 2004. – № 3. – С. 39–46.
4. *ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84). Металлы. Методы испытаний на растяжение*. – Взамен ГОСТ 1497-73 ; введ. 01.01.86. – М. : Стандартинформ, 2005. – 22 с.
5. *ГОСТ 6996-66 (ISO 4136-89). Сварные соединения. Методы определения механических свойств*. – Взамен ГОСТ 6996-54 ; введ. 01.01.67. – М. : Стандартинформ, 2006. – 44 с.
6. *Фрактография, прокаливаемость и свойства сплавов / [М. П. Браун, Ю. С. Веселянский, О. С. Костырко и др.]*. – К. : Наукова думка, 1966. – 312 с.