

DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-12-48-51

УДК (UDC) 620.172.2:621.791.03

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6Ч, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛС

© Владимир Сергеевич Ерасов, Надежда Алексеевна Ночовная,
Андрей Викторович Лавров, Максим Сергеевич Грибков

Всероссийский институт авиационных материалов, Москва, Россия; e-mail: lavrov.viam@yandex.ru

Статья поступила 9 августа 2016 г.

Исследованы стыковые сварные соединения плит толщиной 30 мм из титанового сплава ВТ6ч, выполненные электронно-лучевой сваркой. Определены механические свойства основного металла и сварных соединений. Установлено, что пластическая деформация в разрушенных сварных образцах локализуется в основном металле на удалении от сварного шва. Следствием этого является снижение величины относительного равномерного удлинения в зоне сварного шва по сравнению с зоной основного металла. Для исследования механических свойств металла шва как вдоль, так и перпендикулярно направлению шва разработаны специальные образцы с уменьшенной рабочей частью. Прочностные характеристики металла шва как вдоль, так и перпендикулярно его направлению превысили соответствующие характеристики основного металла. В то же время пластические характеристики металла шва оказались ниже, чем у основного металла. Полученные результаты соответствуют литературным данным.

Ключевые слова: титановый сплав; электронно-лучевая сварка; механические свойства; образцы для испытаний.

ESTIMATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF VT6Ch TITANIUM ALLOY OBTAINED BY THE METHOD OF ELECTRON BEAM WELDING

© Vladimir S. Erasov, Nadezhda A. Nochovnaya, Andrey V. Lavrov, and Maksim S. Gribkov

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, 17, Radio str., Moscow 105005, Russia.

Submitted August 9, 2016.

The butt welded joints of 30-mm plates made of titanium alloy VT6ch obtained by electron-beam welding are studied. The mechanical properties of the base metal and welded joints are determined. Plastic deformation in the broken welded samples is localized in the base metal at a distance from the weld which is characterized by a decrease in the value of the relative uniform elongation (stretch ratio) in the weld zone compared to the zone of base metal. Special specimens with a reduced working part have been developed to study the mechanical properties of the weld metal both along and perpendicular to the weld direction. The strength characteristics of the weld metal in both directions exceed the corresponding characteristics of the base metal while the plastic characteristics of the weld metal are lower than that of the base metal. The obtained results match the available literature data.

Keywords: titanium alloy; electron beam welding; mechanical properties; test specimens.

Конструкционные титановые сплавы — перспективные металлические материалы для изготовления планера воздушных судов [1–4]. В настоящее время актуальна задача разработки технологии сварки конструктивных титановых сплавов [5, 6], поскольку для снижения массы планера целесообразно заменить болтовые и заклепочные соединения сварными [7–9].

Для сварки крупногабаритных узлов из титановых сплавов одной из наиболее перспективных является электронно-лучевая сварка (ЭЛС) [10–12]. Она позволяет получать узкие и глубокие швы с минимальными сварочными деформациями, а также малой зоной термического влияния, что исключает необходимость проведения упрочняющей термической обработки.

Цель работы — определение механических свойств сварных соединений ковано-катаных плит из титанового сплава ВТ6ч толщиной 30 мм, выполненных методом ЭЛС.

Плиты из сплава ВТ6ч сваривали встык ЭЛС-методом на автоматизированном комплексе электронно-лучевой сварки АЭЛТК-11-486 вертикальным лучом за один проход при ускоряющем напряжении 60 кВ. Сварные соединения подвергали вакуумному стабилизирующему отжигу в течение 1 ч с последующим охлаждением в печи¹.

¹ Работа выполнялась под руководством и при непосредственном участии А. В. Свиридова, которому авторы выражают свою благодарность.



Рис. 1. Образец для определения механических свойств основного металла и прочности сварного соединения: стрелкой показано место расположения сварного шва на сварных образцах

Механические свойства основного металла в состоянии поставки и прочность сварного соединения исследовали на образцах шириной 20 мм, толщиной 4 мм и длиной рабочей части 100 мм (рис. 1). Сварной шов располагался в середине рабочей части образца и перпендикулярно его оси. Образцы основного металла и сварных соединений вырезали из средней части по толщине плиты таким образом, чтобы плоскость образца была параллельна плоскости плиты, а направления вырезки образцов основного металла и сварного соединения совпадали.

Испытания образцов на растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 1497 и ГОСТ 6996 на универсальной электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z100 с максимальным усилием ± 100 кН (датчик силы имеет класс точности 0,5 по ISO 7500-1 в диапазоне усилий от 1 до 100 кН), используя длинноходовой экстензометр.

Все сварные образцы разрушились по основному металлу на удалении от шва.

Результаты испытаний образцов основного металла и сварного соединения представлены в табл. 1.

Видно, что сварные соединения плит практически равнопрочны с основным металлом в состоянии поставки, что совпадает с имеющимися литературными данными [10, 13, 14]. Некоторое снижение прочности сварных образцов объясняется уменьшением прочности основного металла в результате воздействия термического цикла сварки.

Внешний вид разрушенных сварных образцов представлен на рис. 2. По характеру их деформации можно сделать вывод о том, что участок образца в зоне сварного шва в процессе испытаний претерпевает значительно меньшие по величине пластические деформации, чем участки образца в зоне основного металла. В связи с этим возник вопрос исследования механических свойств металла сварного шва.

Относительное равномерное удлинение δ_p определяли на сварных образцах (см. рис. 1) при начальной длине расчетного участка, равной 10 мм, что обусловлено узостью зоны сварного шва. В результате для участка основного металла величина δ_p составила от 8 до 12 %, а для зоны сварного шва — 4 %.

В целях определения механических свойств металла шва в направлении, перпендикулярном шву, сварные образцы для испытаний на растяжение (см. рис. 1) доработали: в зоне сварного шва выфрезеровали локальную рабочую часть (рис. 3). Размеры локальной рабочей части обусловлены малой шириной шва,

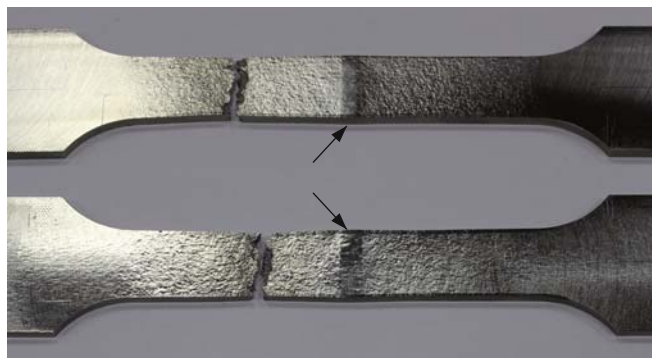


Рис. 2. Сварные образцы после испытаний на растяжение: стрелками показано расположение сварного шва

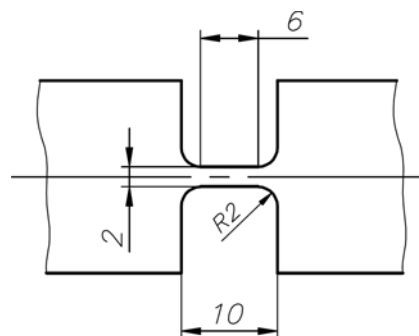


Рис. 3. Эскиз локальной рабочей части в зоне сварного шва

а также необходимостью выполнения условий для получения в ее центральном участке однородного напряженного состояния одноосного растяжения [15].

В процессе испытаний образцов с локальной рабочей частью скорость перемещения подвижного захвата уменьшалась (в отличие от испытаний полноразмерных образцов) для обеспечения требований ГОСТ 1497. Результаты испытаний представлены в табл. 2. (Отсутствие данных по δ_5 обусловлено недостаточной длиной локальной рабочей части.) Видно, что для сварного шва значения σ_b и $\sigma_{0,2}$ выше, чем для основного металла, на 100 – 120 и 160 – 200 МПа соответственно. Этим можно объяснить отмеченное ранее пониженное значение δ_p металла шва по сравнению с основным металлом на сварных образцах.

Таблица 1. Результаты испытаний на растяжение образцов основного металла и сварных соединений (сплав ВТ6ч, плита 30 мм)

Образец	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
Продольное направление			
Основной металл в исходном состоянии	940 – 950	790 – 820	7,9 – 11,0
Сварное соединение	930 – 950	—	—
Поперечное направление			
Основной металл в исходном состоянии	960 – 970	800 – 840	8,5 – 12,0
Сварное соединение	950 – 960	—	—

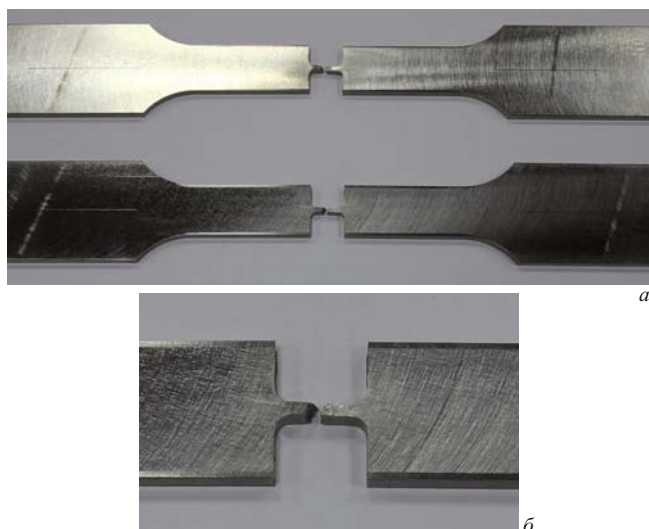


Рис. 4. Образцы с локализованной рабочей частью (а) и внешний вид этой части после испытаний на растяжение (б)

Внешний вид разрушенных образцов с локализованной рабочей частью представлен на рис. 4.

Отмеченное повышенное значение прочностных свойств металла шва по сравнению с основным металлом свидетельствует о формировании в металле шва в процессе стабилизирующего отжига мелкодисперсной двухфазной структуры в результате распада α' -фазы [13, 14].

Для определения механических свойств металла шва вдоль направления шва были изготовлены и испытаны образцы, представленные на рис. 5. Направление сварного шва совпадало с поперечным направлением основного металла плит. Результаты испытаний приведены в табл. 3. Можно отметить, что после стабилизирующего отжига сварного соединения, полученного методом ЭЛС, пластичность металла шва в направлении вдоль шва удовлетворительна. При этом значения δ_5 для металла шва ниже, чем для основного металла в состоянии поставки, что согласуется с литературными данными [13].

Таким образом, проведенное исследование свойств стыковых сварных ЭЛС-соединений плит из сплава ВТ6ч толщиной 30 мм показало, что металл

Таблица 2. Результаты испытаний образцов с локальной рабочей частью в направлении, перпендикулярном сварному шву

Направление основного металла	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
Продольное	1060	980
Поперечное	980 – 1070	910 – 1000

Таблица 3. Результаты испытаний образцов металла шва в направлении вдоль шва

Номер образца	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
№ 1	1060	960	6,5
№ 2	1030	930	8,4

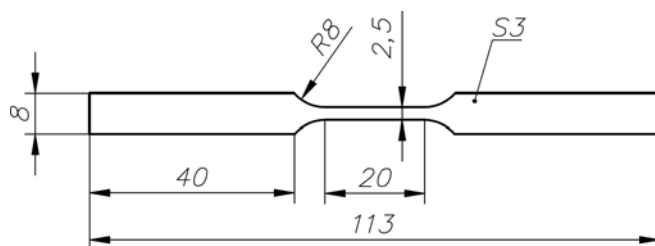


Рис. 5. Схема образца для испытаний на растяжение вдоль шва

сварного шва имеет более высокие значения прочностных характеристик, чем основной металл в состоянии поставки, как вдоль шва, так и в перпендикулярном направлении. При этом δ_5 металла шва ниже пластичности основного металла. Указанные результаты совпадают с литературными данными [10, 13, 14]. Для более точного сопоставления характеристик основного металла и металла шва необходимо провести оценку механических свойств основного металла в состоянии поставки, а также в зоне термического влияния сварных соединений на образцах с уменьшенной рабочей частью (см. рис. 5), что предполагается осуществить в дальнейшем.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2 «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [2]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. России нужны материалы нового поколения / Редкие земли. 2014. № 3. С. 813.
2. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1(34). С. 3 – 33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е. Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информационных материалов. Изд. 3-е. — М.: ВИАМ, 2015. — 720 с.
4. Анташев В. Г., Ночовная Н. А., Ширяев А. А., Изотова А. Ю. Перспективы разработки новых титановых сплавов / Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. С. 60 – 67.
5. Ночовная Н. А., Панин П. В. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов / Труды ВИАМ. 2014. № 5. Ст. 02. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-2-2.
6. Арисланов А. А., Гончарова Л. Ю., Ночовная Н. А., Гончаров В. А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах / Труды ВИАМ. 2015. № 10. Ст. 04. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
7. Лукин В. И., Ковальчук В. Г., Голев Е. В., Ходакова Е. А. Сварка высокопрочных коррозионно-стойких сталей / Труды ВИАМ. 2015. № 5. Ст. 04. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-4-4.
8. Лукин В. И., Иода Е. Н., Пантелеев М. Д., Скупов А. А. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений высокопрочных алюминийлитиевых сплавов / Труды ВИАМ. 2015. № 4. Ст. 06. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6.
9. Егоров Р. В., Овчинников В. В., Магнитов В. С., Лукин В. И. Особенности структуры и свойств сварных соединений алюминиевого сплава В-1469, выполненных электронно-лучевой сваркой / Сварка и диагностика. 2011. № 3. С. 18 – 22.

10. Гуревич С. М. и др. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. — Киев: Наукова думка, 1986. — 240 с.
11. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах. Т. 1 / Под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. — М.: Машиностроение, 2004. — 624 с.
12. Г. А. Кривов и др. Сварка в самолетостроении. — Киев: «МИИВЦ», 1998. — 695 с.
13. Моисеев В. Н. и др. Сварные соединения титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1979. — 248 с.
14. Гуревич С. М. и др. Сварка высокопрочных титановых сплавов. — М.: Машиностроение, 1975. — 150 с.
15. Фрохт М. М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Т. II. — М. — Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. — 488 с.

REFERENCES

1. Kablov E. N. The new generation of materials is required for Russia / Redkie zemli. 2014. N 3. P. 813 [in Russian].
2. Kablov E. N. Innovative workings out of the All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials on realization "Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030" / Aviats. Mater. Tekhnol. 2015. N 1(34). P. 3 – 33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Kablov E. N. Tendencies and reference points of innovative development of Russia: a collection of scientific information materials. 3rd Edition. — Moscow: VIAM, 2015. — 720 p. [in Russian].
4. Antashev V. G., Nochovnaya N. A., Shiryayev A. A., Izotova A. Yu. Prospects of working out of new titanium alloys / Vestnik MGTU im. N. É. Bauman. Ser. Mashinostr. 2011. P. 60 – 67 [in Russian].
5. Nochovnaya N. A., Panin P. V. The analysis of residual macropressure in welded connections of different classes of titanium alloys / Trudy VIAM. 2014. N 5. Art. 02. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-2-2. [in Russian]
6. Arislanov A. A., Goncharova L. Yu., Nochovnaya N. A., Goncharov V. A. Prospects of use of titanium alloys in layered composite materials / Trudy VIAM. 2015. N 10. Art. 04. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4 [in Russian].
7. Lukin V. I., Koval'chuk V. G., Golev E. V., Khodakova E. A. Welding of high-strength corrosion-resistant steels / Trudy VIAM. 2015. N 5. Art. 04. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-4-4 [in Russian].
8. Lukin V. I., Ioda E. N., Panteleev M. D., Skupov A. A. Influence of heat treatment on characteristics of welded connections high-strength Al-Li alloys / Trudy VIAM. 2015. N 4. Art. 06. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6 [in Russian].
9. Egorov R. V., Ovchinnikov V. V., Magnitov V. S., Lukin V. I. Features of structure and the properties of welded connections of aluminium alloy V-1469 produced by electron beam welding / Svarka Diagn. 2011. N 3. P. 18 – 22 [in Russian].
10. Gurevich S. M., et al. Metallurgy and technology of welding of the titanium and its alloys. — Kiev: Naukova dumka, 1986. — 240 p. [in Russian].
11. Aleshin N. P., Chernyshov G. G. (eds.). Welding, cutting, control. Manual. In 2 vols. Vol. 1. — Moscow: Mashinostroenie, 2004. — 624 p. [in Russian].
12. G. A. Krivov, et al. Welding in aircraft construction. — Kiev: MIIVTs, 1998. — 695 p. [in Russian].
13. Moiseev V. N., et al. Welded connections of titanium alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1979. — 248 p. [in Russian].
14. Gurevich S. M., et al. Welding of high-strength titanium alloys. — Moscow: Mashinostroenie, 1975. — 150 p. [in Russian].
15. Frokht M. M. Photoelasticity. The Polarisation-optical method of research of the stresses. Vol. II. — Moscow – Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoi literatury, 1950. — 488 p. [in Russian].