

УДК 669.017:669.295

А.А. Арисланов¹, С.В. Путырский¹, А.Л. Яковлев¹, М.С. Грибков¹

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВА VT6ch.

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-74-79

Представлены результаты исследования структуры и механических свойств сварных соединений из сплава VT6ch., выполненных электронно-лучевой сваркой и прошедших вакуумную термическую обработку. Отдельное внимание уделено эффекту разрушения испытываемых сварных образцов по основному металлу. Измерения твердости HRC испытанного образца показали ее повышенные значения в сварном шве, а также в зоне основного металла, расположенной симметрично месту разрушения. Представлены результаты моделирования, иллюстрирующие распределение пластических деформаций в рабочей части сварного образца.

Ключевые слова: титановые сплавы, механические свойства, микроструктура, электронно-лучевая сварка, термическая обработка, конечно-элементное моделирование.

А.А. Arislanov¹, S.B. Putyrskiy¹, A.L. Yakovlev¹, M.S. Gribkov¹

ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINT FROM VT6ch. ALLOY

The article presents the results of the analysis of the structure and mechanical properties of welded joints made of VT6ch. alloy by electron beam welding and passed vacuum heat treatment. Special attention is paid to the effect of destruction of the tested welded samples on the base metal. Measurements of the HRC hardness of the tested sample showed its increased values in the weld, as well as in the area of the base metal, located symmetrically to the breaking point. Simulation results illustrating the distribution of plastic deformations in the working part of the welded sample are presented.

Keywords: titanium alloys, mechanical properties, microstructure, electron beam welding, heat treatment, finite element modeling.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Наиболее распространенным титановым сплавом, применяемым для изготовления широкой номенклатуры деталей планера, по настоящее время остается сплав Ti-6Al-4V (США). В отечественном авиастроении широко применяется сплав VT6. Сплавы VT6 и Ti-6Al-4V по сути являются аналогами [1].

В течение 1978–1980 гг. была проведена большая совместная работа металлургического завода ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» [2, 3], ОАО «ВИЛС» и ФГУП «ВИАМ» по уточнению состава и технологии производства полуфабрикатов из сплава VT6 модификации «ч». По итогам этой работы был отработан химический состав и внесены дополнения в шихтовую нормаль по расчетному составу сплава. Отличительной особенностью шихтовки сплава VT6ch. по сравнению со сплавом VT6 являются дополнительное легирование его кислородом до 0,16% (по массе) (в последующем – до 0,2% (по массе)) и ограничение легирования железом до 0,4% (по массе).

Сплав VT6ch. относится к сплавам средней прочности ($\sigma_{\text{в}} \geq 833$ МПа), мартенситного ($\alpha+\beta$)-класса. При высоких скоростях охлаждения в сплаве VT6ch. возможно образование α' -мартенсита [4]. Мартенсит α' имеет гексагональную плотноупакованную решетку и отличается от мартенсита углеродистых сталей прежде всего тем, что мартенсит в сталях представляет собой пересыщенный раствор внедрения, а титановый мартенсит – раствор замещения. При мартенситном превращении $\beta \rightarrow \alpha'$ в титановых сплавах наблюдается сравнительно слабый эффект упрочнения. Титановые сплавы с мартенситной структурой в отличие от большинства закаленных сталей обладают пластичностью. Мартенсит в титановых сплавах имеет пластинчатую микроструктуру.

Сплав хорошо сваривается всеми видами сварки [5]. Высокая химическая активность титана определяет необходимость его защиты от газонасыщения при сварке, что наиболее полно реализуется при электронно-лучевой сварке, выполняемой в вакууме.

Интенсивный местный разогрев, неравномерное охлаждение и, как следствие, протекание фазовых превращений в металле шва и в зоне термического влияния (ЗТВ) приводят к возникновению после проведения процесса сварки остаточных напряжений [6], имеющих в сварном шве растягивающий характер [7]. Для снятия остаточных напряжений сварные изделия подвергают отжигу [8]. Во избежание образования альфированного слоя на поверхности сварных образцов, а также возможной диффузии кислорода вглубь металла, что может негативно сказаться на механических свойствах, отжиг проводят в вакууме.

Сварные соединения наиболее склонны к замедленному водородному разрушению по сравнению с деталями, для которых сварка не применялась. Это объясняется тем, что возникающие в сварном шве высокие остаточные растягивающие напряжения и термодиффузия водорода приводят к образованию водородных максимумов. Кроме того, при сварке плавлением возможно образование пор, которые служат концентраторами напряжений. В этом случае в зоне концентратора напряжений процесс образования водородных максимумов идет более интенсивно. Проведение термической обработки сварных соединений в вакууме позволяет также снизить концентрацию водорода в детали [9].

Как правило, вакуумный отжиг деталей из титанового сплава ВТ6ч. выполняется при температуре 750°C. Указанная температура отжига выбиралась ниже температуры рекристаллизации сплава ВТ6ч. (температура начала рекристаллизации 850°C), поскольку нагрев выше температуры рекристаллизации приводит к увеличению размеров структурных составляющих и, как следствие, падению механических свойств. Необходимо также учитывать, что при вакуумной термообработке титановых сплавов (при температуре >750°C) происходит растрав поверхности металла. Выбранная температура отжига является оптимальной с точки зрения сохранения структуры металла и снятия остаточных напряжений.

В данной работе рассматривается поведение сварных образцов из сплава ВТ6ч. при испытаниях на растяжение [10], а также объясняется механизм их разрушения с учетом различий механических свойств основного металла и сварного шва [11].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионноустойчивые свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

Материалы и методы

Исследования выполняли на сварных образцах, выполненных из плит титанового сплава

ВТ6ч. толщиной от 30 до 90 мм. Электронно-лучевую сварку (ЭЛС) выполняли на установке АЭЛТК-11-486 (рис. 1), оснащенной системой ЧПУ и энергоблоком ЭЛА 40/60 мощностью 40 кВт с ускоряющим напряжением 60 кВ, позволяющей в процессе сварки с помощью программы задавать координаты перемещения электронно-лучевой пушки, технологические параметры процесса ЭЛС, такие как: скорость сварки, ток сварки, ток фокусировки, ускоряющее напряжение и рабочее расстояние. В качестве катода использовали таблетку из гексаборида лантана (LaB_6) с диаметром активной зоны 4,7 мм.



Рис. 1. Автоматизированный комплекс электронно-лучевой сварки АЭЛТК-11-486

Подготовка образцов под сварку включает следующие этапы.

Свариваемые кромки проверяют на отсутствие следов смазки, смазочно-охлаждающей жидкости или стружки. Обнаруженные следы тщательно удаляют щеткой или чистым сжатым воздухом (или азотом) либо промывают кромки соответствующим растворителем и затем деминерализованной водой. Не рекомендуется использовать для очистки поверхности абразивные методы.

После предварительной очистки изделия промывают струей горячей воды под высоким давлением с использованием простого мягкого щелочного моющего средства для обезжиривания поверхности. Подачу моющего средства затем прекращают, и изделие тщательно ополаскивают горячей водой до полного удаления видимых следов моющего средства. Затем изделие высушивают чистым сухим воздухом.

Химическая очистка заключается в погружении или протирке изделий растворителем, например этиловым спиртом или ацетоном. После химической очистки изделие промывают струей горячей чистой деминерализованной воды под высоким давлением.

Подготовка кромок перед ЭЛС должна обеспечить возможность тщательной состыковки свариваемых деталей по всей длине с минимальным зазором и смещением по высоте. При ЭЛС титана и его сплавов для получения качественных швов



Рис. 2. Прямолинейный сварной образец из сплава ВТ6ч.



Рис. 3. Печь для вакуумной термической обработки MonoTherm

требуется достаточно высокая точность сборки изделий под сварку и строгое соблюдение зазора между крошками.

Основными параметрами процесса ЭЛС, влияющими на размеры сварного шва, являются:

- ускоряющее напряжение, с увеличением которого возрастает глубина проплавления. Увеличение ширины шва происходит в меньшей степени. В современных электронно-лучевых пушках ускоряющее напряжение остается постоянным;
- ток луча, с ростом которого глубина проплавления при прочих равных условиях увеличивается. Увеличивается также и ширина шва, так как с ростом тока увеличивается диаметр пучка;
- ток фокусировки, изменяющий удельную мощность пятна нагрева;
- скорость сварки. С увеличением скорости сварки уменьшаются глубина проплавления и ширина шва;
- рабочее расстояние. При малых рабочих расстояниях больше паров из ванны попадает в пушку и больше вероятность высоковольтных пробоев. При очень большом рабочем расстоянии получается пучок с малым углом сходимости и пятном большего размера в плоскости оптимальной (острой) фокусировки;
- рабочее давление в камере. Электронно-лучевую сварку осуществляли в высоком вакууме. При ЭЛС в высоком вакууме давление в камере поддерживается на уровне $133,3(10^{-5} \div 10^{-4})$ Па ($10^{-5} \div 10^{-4}$ мм рт. ст.). Изменение вакуума в пределах этого диапазона не отражается на качестве сварных соединений и на плотности энергии в пятне нагрева.

Сварной образец из сплава ВТ6ч. представлен на рис. 2.

Вакуумный отжиг сварных образцов осуществляли в вакуумной печи MonoTherm, представленной на рис. 3.

Испытания на растяжение сварных образцов из титанового сплава ВТ6ч. проводили по

ГОСТ 1497–84 на испытательной машине Zwick/Roell Z 400.

Испытания на определение твердости HRC проводили по ГОСТ 9013–59 на твердомере Qness Q150R.

Исследования микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе Olympus GX51.

Фазовый состав исследовали при помощи дифрактометра Bruker D8 ADVANCE с параметрами съемки: излучение $\text{Cu } K\alpha$; фокус трубки $0,5 \times 3$ мм; напряжение 40 кВ; ток в трубке 40 мА.

Для анализа процесса деформации и разрушения сварных образцов при испытаниях на растяжение использовали метод конечно-элементного моделирования, реализованный в программных комплексах ANSYS и LS-Dyna. Последняя программа разработана для решения задач, предусматривающих анализ больших пластических деформаций и процессов разрушения.

Программа LS-Dyna предназначена для решения динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также других связанных с ними задач. Данная программа нашла широкое применение в таких отраслях науки и техники, как автомобилестроение (симуляция краш-тестов), военно-промышленный комплекс (симуляция взрывов боеприпасов и изучение их воздействия на окружающие предметы), авиа- и ракетостроение, а также для моделирования технологических процессов, в том числе деформационной обработки металлов.

Для создания расчетной модели и построения конечно-элементной сетки в работе использовали средства среды ANSYS Workbench и модуль Explicit Dynamics (LS-Dyna export), который позволяет создать командный файл, содержащий информацию о модели для запуска расчета. Модель образца создали состоящей из трех частей: двух частей, включающих захватную часть и часть рабочей зоны, сварной шов выделяли

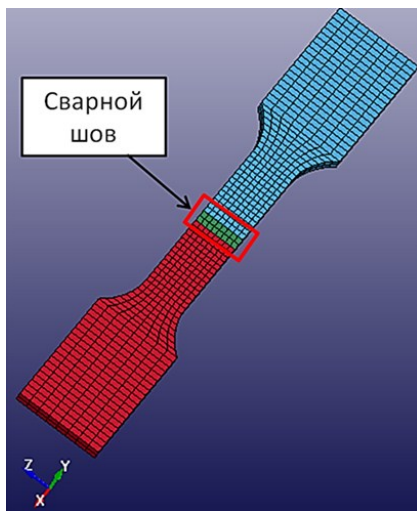


Рис. 4. Модель сварного образца из сплава ВТ6ч.

в отдельный объект для обеспечения возможности назначения для него свойств, отличающихся от свойств основного материала. Конечно-элементную сетку создавали общей для всего образца [13]. Модель образца представлена на рис. 4.

Для узлов, соответствующих захватным частям модели образца, были заданы граничные условия – перемещение с постоянной скоростью, что имитирует работу испытательной машины.

Результаты и обсуждение

Микроструктура сварного образца толщиной 30 мм, сваренного вертикальным лучом, представлена на рис. 5 – изображения основного металла, зоны термического воздействия и сварного шва.

Микроструктура сварного шва, типичная для сварных соединений ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов, полученных ЭЛС, представлена длинными тонкими пластинами α -фазы, расположенными внутри крупных зерен закристаллизовавшейся β -фазы.

Вследствие того, что значительная часть металла ЗТВ нагревается выше температуры полиморфного превращения, микроструктура представлена колониями пластинчатой α -фазы, расположенными внутри превращенных β -зерен. Размер β -зерен ЗТВ меньше, чем в шве, при этом толщина пластин α -фазы больше.

Размеры β -зерен в микроструктуре сварного шва находятся в диапазоне 300–700 мкм, толщина пластин α -фазы составляет 0,5–1,5 мкм.

Заметных изменений микроструктуры после термической обработки не наблюдается.

С целью определения фазового состава материала сварного шва на дифрактометре фирмы Bruker сняли дифрактограмму (рис. 6) образца до и после термической обработки, на которой присутствуют линии α - и β -фазы [14]. Линии дифрактограмм практически совпадают, что свидетельствует об



Рис. 5. Микроструктура зон сварного образца

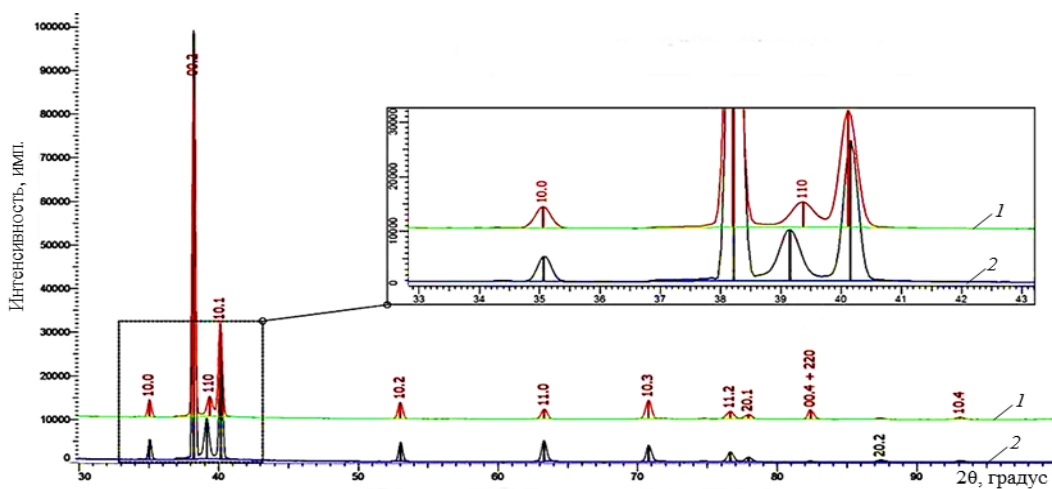


Рис. 6. Дифрактограмма зоны сварного шва до (1) и после термической обработки (2)

отсутствии структурных изменений в сварном шве в результате отжига [15]. Изменения количественного соотношения α - и β -фаз в сварном шве после проведения отжига также не обнаружено.

При проведении испытаний на определение механических свойств сварных образцов наблюдается разрушение по основному металлу сварного образца, а не по сварному шву или зоне термического воздействия (рис. 7).



Рис. 7. Сварной образец, разрушенный при испытаниях на растяжение

Таким образом зафиксирован коэффициент прочности сварного соединения образца из сплава ВТ6ч., равный $\sigma_B/\sigma_{B,cb}=1$. Аналогичный вариант наблюдается при испытаниях на малоцикловую усталость сварных образцов, имеющих одинаковую геометрическую форму с образцами на растяжение. Дополнительные концентраторы напряжений в сварном шве чертежами образцов не предусмотрены.

Проведен ряд измерений твердости сварного образца от шва до захватов, результат представлен на графике (рис. 8). Видно, что сварной шов обладает повышенной твердостью в сравнении с основным металлом. На основе результатов измерения твердости для материала сварного шва был задан предел текучести, превышающий на 20 МПа предел текучести материала основного металла. На рис. 9 представлены результаты расчета модели проведения испытания на растяжение сварного образца.

После добавления на график изменения твердости по длине испытанного образца (рис. 8)

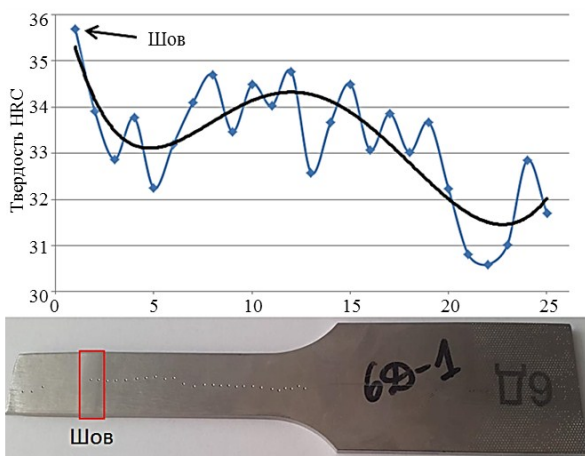


Рис. 8. Распределение твердости HRC на сварном образце после испытаний на растяжение (— аппроксимация значений твердости)

линии тренда, отчетливо наблюдается участок, соответствующий основному металлу рабочей части образца, обладающий повышенной твердостью. Подобное повышение твердости возможно при наклепе после прохождения пластической деформации. Прохождение пластической деформации в данном сечении подтверждается измерением его геометрических параметров – образец стал уже. Таким образом, можно заключить, что деформация развивается в симметричных относительно сварного шва сечениях, по одному из которых происходит разрушение.

Структура сварного шва представлена крупными первичными β -зернами, разбитыми на тонкие пластины α -фазы (рис. 5). Малый размер структурных составляющих и высокая плотность дефектов кристаллического строения, образующихся в условиях интенсивного теплоотвода при кристаллизации металла сварного шва, обуславливают повышенную твердость (повышенный предел текучести и прочности) шва относительно основного металла [16].

На рис. 9, иллюстрирующем результаты моделирования, показано развитие пластической деформации в двух симметричных зонах рабочей части испытываемого образца, соответствующих основному металлу. Сварной шов, имеющий повышенный по сравнению с основным металлом предел текучести, при проведении испытаний фактически является ребром жесткости, которое перераспределяет напряжения и деформации в рабочей части испытываемого образца. Это также объясняет схожую картину, наблюдаемую при испытаниях на малоцикловую усталость, выполненных на аналогичных образцах. Накопление повреждений происходит в зоне образца, соответствующей основному металлу, что является следствием перераспределения деформаций в образце.

Однако необходимо отметить, что все изложенное ранее справедливо при условии отсутствия дефектов сварного шва, таких как, например, поры, которые могут являться концентраторами напряжений. Наличие пор может привести к развитию разрушения в сварном шве.

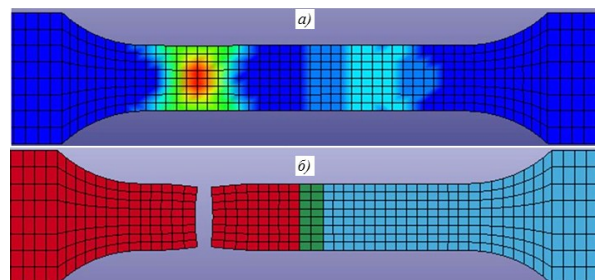


Рис. 9. Распределение пластических деформаций (а) и расчетный вид разрушенного образца (б)

Заключения

На основе представленных ранее результатов исследований можно сделать вывод, что характер разрушения сварных образцов при испытаниях по

схеме, предусматривающей одноосное растяжение, объясняется различным структурным состоянием основного металла и сварного шва и соответствующей разницей их механических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Metallurgy, 1974. 368 с.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
4. Дзунович Д.А., Панин П.В., Лукина Е.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сварных крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №1 (61). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-7-7.
5. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. 352 с.
6. Гуревич С.М., Куликов Ф.Р., Замков В.Н. Сварка высокопрочных титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1975. 150 с.
7. Ночовная Н.А., Панин П.В. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №5. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-2-2.
8. Путьрский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Крохина В.А. Исследование влияния различных режимов термической обработки на свойства полуфабрикатов и сварных соединений из сплава ВТ22М // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.
9. Колачев Б.А., Садков В.В., Талалаев В.Д. Вакуумный отжиг титановых конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.
10. Золоторевский В.С. Механические свойства материалов: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Metallurgy, 1983. 352 с.
11. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути // Наука в России. 2012. №4. С. 7–11.
12. 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.
13. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. Osaka: Nippon Steel & Sumitomo Metal, 2014. P. 22–27.
14. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Панин П.В. Исследование структуры и фазового состава опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb в деформированном состоянии // Титан. 2014. №4 (46). С. 12–17.
15. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. Titanium Alloys for Aerospace Applications // Advanced Engineering Materials. 2003. Vol. 5. P. 419–427.
16. Ширяев А.А., Анташев В.Г. Особенности разработки высокопрочного самозакаляющегося высокотехнологичного псевдо- β -титанового сплава // Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-23-30.