FRI-1.417-2-MEMBT-05

EFFECT OF THE PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY TI-6AL-4V WELDS⁶

Assist. Prof. Nikolay Ferdinandov, PhD

Department of Material Science and Technology, University of Ruse Tel.: 082 888 316 E-mail: nferdinandov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Danail Gospodinov, PhD

Department of Material Science and Technology, University of Ruse Tel.: 082 888 205 E-mail: <u>dgospodinov@uni-ruse.bg</u>

Assist. Prof. Mariana Ilieva, PhD

Department of Material Science and Technology, University of Ruse Tel.: 082 888 316 E-mail: mdilieva@uni-ruse.bg

Stoyan Dimitrov, PhD student

Department of Material Science and Technology, University of Ruse Tel.: 082 888 316 E-mail: sdimitrov@uni-ruse.bg

Abstract: The fast development of a great number of industry fields impose the use of new construction materials, among which titanium and its alloys are most used. The unique combination of high specific strength, good plasticity and excellent corrosion resistance specifies these materials as extremely suitable for aircraft and space shuttle constructions, chemical industry, machinery constructions and many more.

In our work we present results showing the effect of the welding thermal cycle on the mechanical properties of vacuum arc-welded joints of titanium alloy Ti-6Al-4V. The geometric dimensions of the weld were determined in different modes of operation. After hardness measurement in the weld and heat-affected zone and tensile testing, results for mechanical properties were obtained.

Keywords: Titanium Alloy, Welded Joints, Mechanical Properties.

въведение

Предимствата на титановите сплави пред останалите общоизвестни конструкционни материали свързани с високите им механични характеристики, ниска плътност, отлична корозионна устойчивост към множество агресивни среди, ниска топлопроводност и редица други ги прави изключително подходящи за нуждите на космическата, автомобилната и медицинската индустрии.

Алфа-бета титанови те сплави притежават повишена жилавост и висока якост в термообработено състояние и представляват около 70% от пазара на тези материали в САЩ, а сплавта Ti-6Al -4V (Gr-5, Gr-5ELI) покрива 56% от целия пазар на титан и титанови сплави в САЩ (Lütjering, G., Williams, J.C. 2007).

⁶ Докладът е представен на пленарната сесия на 28 октомври 2017 с оригинално заглавие на български език: ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМИТЕ НА РАБОТА ВЪРХУ МЕХАНИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА ЗАВАРЕНИ СЪЕДИНЕНИЯ ОТ ТИТАНОВА СПЛАВ TI-6AL-4V

Наличието на бета фаза при стайна температура води до издребняване на зърното и повишаване на якостта, възможност за прилагане на термично обработване, повишаване на жилавостта и понижаване на заваряемостта (Зубарев, Ю. 2011; Зубарев, Ю. 2010).

В зависимост от желаната комбинация от механични свойства титановата сплав Ti-6Al-4V може да бъде подлагана на различни видове термично обработване, найразпространените от които са: отгряване и закаляване с последващо стареене. Най-ниски якостни свойства и най-голяма пластичност се наблюдават след отгряване, а най-висока якост, при запазване на сравнително добра пластичност, сплавта има след закаляване и стареене.

Зоната определяща заваряемостта на титановите сплави е зоната на термично влияние (Неровный, В. 2002; Муравьев, И. 2010). Най-големите промени в структурата и свойствата протичат в участъците намиращи се непосредствено до заваръчния шев, където металът се нагрява до температури $T_{\text{нагр}}=(0,9\div1,0)T_{\text{топ}}$. След него се намира участък, в който е налице фазова прекристализация, като при охлаждане там се фиксира метастабилна фаза.

Основните трудности по отношение на заваряването на титан и титанови сплави са свързани с високата им химическа активност, образуването на пори и студени пукнатини склонността към уедряване на зърната в околошевната зона.

При алфа-бета сплавите (към, които спада и Ti-6Al-4V) заваряването може значително да промени тяхната якост, жилавост и пластичност вследствие термичния цикъл. Ниската жилавост е следствие от фазовите превръщания в ш ева или зоната на термично влияние.

За заваряването на титан и титанови сплави най-често се прилагат методите ВИГ и тези за заваряване във вакуум (Lisiecki, A. 2012; Niagaj, J. 2012; Ranatowski, E. 2008; Yassin, A. 2012).

Целта на настоящата работа е да се изследва възможността за получаване на заварени съединения от титанова сплав Ti-6Al-4V чрез електродъгов разряд във вакуум и да се установи влиянието на параметрите на режима върху геометричните размери и механичните свойства на получените шевове.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Методика на експерименталното изследване

Всички експерименти представени в работата са осъществени с помощта на полупромишлена инсталация за обработване във вакуум с електродъгов разряд с кух катод. Схема на инсталацията е показана на фигура 1. Тя се състои от вакуумна камера с обем $0,5m^3$, помпен агрегат, устройства за микронатичане и отчитане на количеството на плазмообразуващия газ и заваръчни токоизточници. В камерата (поз. 1) е монтирана заваръчната горелка (поз. 2) използваща многостепенна схема на възбуждане на дъговия разряд и спомагателно заваръчно обзавеждане (поз. 5) гарантиращо постъпателното движение на изделието. Помпеният агрегат осигуряващ необходимото подналягане в камерата се състои от три вакуумни помпи. Същите имат следните характеристики: ротационна помпа с маслено уплътнение (форвакуумна) с производителност 200 m³/h, ротационна двуроторна помпа (Roots) с производителност 600 m³/h и пароструйна (дифузионна) помпа с производителност 600 l/s. Отчитането на налягането в камерата става чрез магнитен електроразряден вакуумметър PENINGVAC PM 310 и съп ротивителен вакуумметър PWN 100. Дълбочината на вакуума, при който са проведени експериментите е 3.10^{0} Pa.

Плазмообразуващият газ е Ar (аргон) с чистота 99,999 %, като регулирането му се осъществява с помощта на микронатекател Leybold AG (поз. 10), а отчитането на съответното количество – чрез датчик Hastings Mass Flow Controller и цифров уред Hastings Flow Monitor.

Заваръчните токоизточници (основен – поз. 7 и спомагателен – поз. 8) са постояннотокови със стръмнопадащи външни характеристики. Те позволяват използването на макс имален заваръчен то к до 300А.



Фиг. 1. Общ вид на вакуумна инсталация за електродъгово обработване във вакуум 1-вакуумна камера; 2-горелка; 3-кух катод; 4-заварявани части; 5- манипулатор; 6-електродвигател; 7-основен токоизточник; 8- спомагателен токоизточник; 9-кондензаторна батерия; 10-микронатекател; 11- редуцир-вентил; 12- бутилка с плазмообразуващ газ.

Режимите, при които са проведени експерименталните изследвания са посочени в табл.1. Същите са избрани по препоръки за ВИГ заваряване на подобни сплави, като целта е получаването на заваръчен шев с пълен провар. И зползвани са катоди с цилиндрична и елипсовидна форма (фиг.1, поз. 3). Те са изработени от танталово фолио и са с дължина – l=30mm и дебелина на стената – $\delta=0,2$ mm. Останалите размери и формата на напречното сечение на катодите при различните режими са посочени в табл.1. Заваряването е осъществено без изполване на добавъчен материал и без заваръчна междина.

№ на	Големина на	Скорост на	Скорост на Форма и размери	
режима	тока	придвижване на на катода		
		масата		
	I, A	V, mm/s	mm	Q , l /h
1	100	4,2	кръгла; Ø4	2,3-2,4
2	115	4,2	кръгла; Ø4	2,3-2,4
3	130	5,5	кръгла; Ø4	2,3-2,4
4	115	5,5	елипсовидна 5,6 x 2	2,3-2,4
5	130	6,5	елипсовидна 5,6 x 2	2,3-2,4

Табл.1. Режими на заваряване

Използваните пробни тела са с размери 100x50x2mm (ДхШхВ) и са от титанова сплав марка Ti-6Al-4V (Gr-5). Химичният състав по отношение на легиращите елементи на същите, определен чрез рентгенофлуоресцентен анализ е посочен в табл. 2.

Табл.2. Химичен състав на използваната сплав

V, %	Al, %	Ti, %
4,27	6,1	89,57

За определянето на характеристиките на механичните свойства са използвани изпитване на опън и измерване на твърдостта в характерни зони на завареното съединение. Изпитването на опън е проведено на изпитвателна машина Instron 3384 и е съобразено с изискванията на БДС EN ISO 6892-1:2009. Общ вид на получените заварени съединения и изрязаните от тях пробни тела е показан на фиг.2.





Фиг. 2. Общ вид на завареното съединение (а) и на пробните тела за изпитване на опън (б)

Измерването на твърдостта на получените зони е осъществено по метода на Викерс, с помощта на твърдомер "Wilson Hardness", натоварване 5kg и време за въздействие 10s. Размери на зоните на разтопяване и термично влияние са определени с помощта на шублер с точност 0,05 mm.

Извършени са макроструктурен и микроструктурен анализ на заварените съединения. Проявяването на макроструктурата е осъществено с реактив със следния състав: 15 ml HNO3, 10 ml HF, 75 ml H2O. Микроструктурата е наблюдавана след проявяване със смес от 30 ml млечна киселина, 10 ml HF и 10 ml HNO3.

Резултати от експерименталното изследване

В табл.3 са показани размерите на зоната на разтопяване и зоната на термично влияние, получени след заваряване при използваните в изследването режими. Анализът на получените резултати показва, че при използване на кух катод с цилиндрична форма (режими 1, 2, 3) големините на зоните на разтопяване и на термично влияние нарастват с увеличаване на тока (режим 1 и 2). Увеличаването на големината на тока при същевременното увеличаване и на скоростта на заваряване (режим 3) води до запазване н а размерите в сравнение с получените за режим едно.

Промяната на напречното сечение на катода във формата на елипса, геомертично ориентирана с широката си страна по оста на заваряване води до намаляване на размерите, както на зоната на разтопяване, така и на зоната на термично влияние (табл.3, режими 4 и 5).

В табл. 4 са показани резултатите получени при предварително изпитване на използваните в изследването материали. Те са сравнени с литературните данни за механичните свойства на Ti-6Al-4V при различни видове термично обработване, при което е установено, че доставното състояние на материала е закаляване и стареене.

№ на режима	Широчина на зоната на разтопяване mm	Размери на зоната на термично влияние mm
1	9	2,3
2	10,5	2,5
3	9	2,5
4	7	1,65
5	8	2,05

Табл.3. Размери на получените след заваряване зони

Табл.4 Характеристики на механичните свойства на Ti-6Al-4V

	Граница на провлачване R _{p0,2} , MPa	Якост на опън Rm, MPa	Относително удължение А, %	Твърдост HV5 (HRc)
по справочни данни	965-1100	1035-1170	8-10	376-396 (39-41)
преди заваряване	1002	1089	10	390 (39,8)

Поместените в табл. 5 резултати показват, че след заваряване както якостните, така и деформационните характеристики са по-ниски от тези поместени в табл.4. Това се дължи на промените в структурата протичащи основно в зоните намиращи се при температури повисоки от тази на фазова трансформация (за Ti-6Al-4V – по-високи от 995 ± 15 °C). Трябва да се отбележи и факта, че при всички режими разруша ването на пробните тела става на границата на разтопената зона и зоната на термично влияние (фиг.3). Подобно поведение са наблюдавали и други автори (Denney, P., (1989); Kramár T., (2012))

	Граница на провлачване	Якост на опън	на опън Относително удължение		Твърдост	
№ на режима	Rp0,2, MPa Rm, MPa	R _m , MPa	A, %	разтопена зона	зона на термично влияние	
				HV5 (HRc)		
1	940	1010	5	363 (37,0)	359 (36,4)	
2	780	975	5	369 (37,8)	356 (36,1)	
3	840	930	4,5	364 (37,1)	353 (35,9)	
4	843	957	5	366 (37,6)	355 (36,0)	
5	850	955	6	365 (37,2)	350 (35,5)	

Табл.5 Характеристики на механичните свойства на съединенията след заваряване

След проявяване на макроструктурата на заварените пробни тела (фиг. 4) в зоната на разтопяване се наблюдават големи (2-3 mm), ориентирани перпендикулярно на повърхността на шева кристални зърна. При прехода към зоната на термично влияние размерът на тези зърна намалява постепенно и ориентацията им изчезва. Рязко е очертана границата между ЗТВ и основния метал.



Фиг.3. Общ вид на разрушено пробно тяло след изпитване на опън



Фиг.4. Макроструктура на завареното съединение

Структурата на основния метал е влакнеста, резултат от валцоване – фигура 5а. Състои се от колонии (α + остатъчна β) и малко количество остатъчна β-фаза (черна). α-фаза та в колониите (α + остатъчна β) е силнодребнозърнеста (типично за α, получена след стареене) и не може да се наблюдава с оптичен микроскоп. При по-малко увеличение (фи гура 5б), поради големия брой граници в колониите, разсейващи светлината, колониите изглеждат черни (Vander Voort, G. F., (2004)).





Фиг. 5. Микроструктура на заварено съедиение: а) основен метал; б) граница "основен метал/зона на термично влияние

Границата между основния метал и зоната на термично влияние (фигура 5б) е рязка, поради ниската топлопроводимост на титана. С приближаване към зоната на разтопяване структурата се уедрява, а влакнеста структура в ЗТВ не се наблюдава. Равноосната ми кроструктура в зоната на термично влияние показва, че там се е извършила прекристализация $\alpha \rightarrow \beta$, в резултат на която са се получили равноосни β -кристали. При следващо то им охлаждане в тях са се формирали равноосни колонии от иглести кристали α и затворена между тях остатъчна β -фаза. Тези колонии са с различни размери и с различна ориентация. По границите на бившите β -зърна се е отделила алотриоморфна α -фаза, обра зуваща мрежа – фигура ба. С приближаване към зоната на разтопяване размерът на бившите β -зърна нараства, а мрежата от α по границите им започва да се разкъсва – фигу ра бб и бг. Така в зоната на разтопяване колониите (α + остатъчна β) са най-едри, а по границите им липсва α – фигура бв и бд.

Мрежата от α , наблюдавана в ЗТВ, е резултат от сравнително ниската скорост на охлаждане на β . По-голямото прегряване в зоната на разтопяване води до по-големи скорос ти на охлаждане, така че образуването на α по границите на β -зърната е възпрепятствано, а полиморфното превръщане $\beta \rightarrow \alpha$ започва в обема на зърната, където се появяват зародиши на α . При ед новременното си нарастване те се срещат и блокират следващия си растеж. По този начин, колониите (α + остатъчна β), образувани в зоната на разтопяване, са с по-фин игле ст строеж от същите в ЗТВ (фигура 6). Тази по-дребноиглеста структура на α обяснява повисоките измерени твърдости в разтопената зона от тези в ЗТВ.



Фиг. 6. Микроструктура на заварено съедиение: а) зона на термично влияние; б) граница "зона на термично влияние/разтопена зона "; в) разтопена зона; г) граница "зона на термично влияние/разтопена зона" (по-малко увеличение от 5б); д) разтопена зона (помалко увеличение от 5в).

Разположението на алотриоморфната α по границите на бившите β-зърна изяснява защо при изпитването на опън разрушението се извършва в ЗТВ. Известно е, че α-фазата е с кристална решетка hcp, която има ниска склонност към пластично деформиране (има само 3 системи на плъзгане спрямо 12 за bcc). Така, при изпитването на опън, решаваща за мя стото на скъсване се явява алотриоморфната α-фаза. Тя, разположена по границите на предишните β-кристали, благоприятства "междукристално" крехко разрушение (в действителност разрушението е по границите между отделните колонии от иглеста α и остатъчна β).

ИЗВОДИ

- 1. Чрез промяна на основните параметри на режима на работа (големина на тока и скорост на движение) могат да се получават зони на разтопяване и термично влияние с различни размери.
- 2. Използването на елипсовидна вместо кръгла форма на катода позволява значително да се намалят геометричните размери на получените след заваряване зони.
- 3. Получаваните след заваряване структури са с по-ниски механични свойства, както по отношение на якостта, така и по отношение на пластичността. Повишаване на механичните им свойства може да се очаква при реализиране на режими осигуряващи по-големи скорости на охлаждане.
- 4. Използваните режими на заваряване осигуряват получаване на равновесни фази в структурата на шева и на зоната на термично влияние.
- 5. Формираните структури са определящи за мястото на разрушаване и за стойностите на твърдостите в зоната на термично влияние и в зоната на разтопяване.

REFERENCES

Denney, P., E. Metzbower, E.A. (1989), Laser Beam Welding of Titanium, Welding Research Supplement, August 1989.

Kramár T., Michalec I., Kovačócy P. (2012), The laser beam welding of titanium grade 2 alloy, GRANT journal, ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online), ETTN 072-11-00002-09-4.

Lisiecki, A. (2012). *Welding of titanium alloy by different types of lasers*. International Scientific Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering. Volume 58, Issue 2. p. 209-218.

Lütjering, G., Williams, J.C. (2007). *Titanium*. Springer Verlag. Germany.

Niagaj, J. (2012). *Peculiarities of a-Tig Welding of Titanium and its Alloys*. Metallurgy and materials. Volume 57. Issue 1. DOI: 10.2478/v10172-010-0001-9.

Ranatowski, E. (2008). *Weldability of Titanium and its Alloys* – Progress in Joining. Advances in Materials Science, Vol. 8, No. 2(16).

Vander Voort, G. F., (2004) ASM Handbook, vol.9, Metallography and Microstructures, ASM International.

Yassin, A., Salleh, K., Sahari, M., Ishak, M. (2012). *Welding of Titanium (Ti-6Al-4V) Alloys:* A Review. Proceedings National Graduate Conference.

Зубарев, Ю., Коломенский, Б. (2010). Влияние режимов сварки на ударную вязкость сварных соединений из титановых сплавов. Сварочное производство. №4. с. 9-11. ISSN 0491-6441.

Зубарев, Ю., Коломенский, Б., Ткачев, А., Клопов, К. (2011). Влияние термических циклов сварки и отжига на технологическую пластичность листовых титановых сплавов. Металловедение и термическая обработка металлов. №5. с. 29-31. ISSN 0026-0819.

Муравьев, И., Клешнина, О., Кузнецов, А. (2010). Влияние режимов термического цикла сварки на структуру и свойства металла шва титановых сплавов. Сварочное производство. №8. с. 3-9. ISSN 0491-6441.

Неровный, В., Ямпольский В. (2002). *Сварочные дуговые процессы в вакууме*. М. Машиностроение. 264 с.