SAT-1.307-1-MME-06

Особености при заваряване и термично обработване на титан и неговите сплави

Николай Фердинандов, Данаил Господинов, Стоян Димитров

Features in welding and heat treatmentof titanium and its alloys

Nikolay V. Ferdinandov, Danail D. Gospodinov, Stoyan P. Dimitrov

Abstract: *The paper sets out a number of features related to the possibility for welding of titanium and titanium alloys such as preparation, filler material, suitable for welded and providing the necessary protection. Described are the basic methods used in the preparation of welded joints and the need for heat treatment.*

Keywords: *Titanium alloys, Welding, Heat treatment.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Титанът е един типичен представител от групата на свръхактивните метали, към които спадат още цирконий, молибден, ниобий, тантал, волфрам и др. С повишаване на температурата над 500°C, те поглъщат активно газове (O_2, N_2, H_2) предизвикващи силно окрехкостяване, което определя заваропригодността на тези метали. Всичко това налага осигуряването на съвършена защита на заваръчния шев и околошевната зона от въздействието на газовете от околната среда [13].

Бързото развитие на редица отрасли в промишлеността налага използването на нови конструкционни материали, сред които титана и неговите сплави заемат водещо място. Рядкото съчетание на висока специфична якост, добра пластичност и отлична корозионна устойчивост прави тези материали изключително подходящи за нуждите на самолето- и ракетостроенето, химическата промишленост, машиностроенето и много други.

Тъй като титана и сплавите му се използват основно за изработване на заварени конструкции е необходимо да се отчитат, някои особености свързани с физичните му свойства: висока температура на топене (1668°C) и кипене (3260°C); нисък коефициент на топлопроводност (4 пъти по-нисък от на желязото и 13 пъти по-нисък от на алуминия); високо електросъпротивление (6 пъти по-високо от на желязото и 20 пъти по-високо от на алуминия).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Основните трудности по отношение на заваряването на титан и титанови сплави са свързани с:

- висока химическа активност изискваща качествена защита не само на заваръчния шев, а и на околошевната зона нагрята до темепература над 250-300°C;
- образуването на пори и студени пукнатини вследствие наличието на газови примеси.
- склонност към уедряване на зърната в околошевната зона изискваща прилагането на оптимални режими на работа;

При стайна температура титанът взаимодейства с кислорода и образува повърхностен слой предотвратяващ по-нататъчното му окисление. При нагряване над 300-350°C той активно поглъща кислорода и образува различни окиси (от Ti_6O до TiO_2) притежаващи висока твърдост и ниска пластичност.

При температури над 500°C титанът образува с азота нитриди притежаващи също повишена твърдост и ниска пластичност. По тази причина допустимото съдържание на азот в титана е до 0,05%, а на кислород до 0,15%.

При температури между 200°C и 400°C титанът активно поглъща водород,

който дори и в минимални количества силно влошава свойствата му. С повишаване на температурата водородът се отделя от титана и изгаря. При по-ниски температури съдържанието на водород също се понижава, но хидридите на титана (TiH_2) водят до образуването на газови пори и студени пукнатини. По тази причина допустимото съдържание на водород в титана е до 0,01%.

Преди започване на заваряването е необходимо качествено почистване на частите на разстояние не по-малко от 20-25mm от мястото на шева. Наличието на масло, пръстови отпечатъци и боя води до образуването на пори и затова е необходимо отстраняването им с подходящи разтворители. При тънки оксидни покрития почистването е химично с воден разтвор на 2-4% флуороводородна киселина и 30-40% азотна киселина. По-дебелите оксидни покрития се отстраняват механично чрез продухване с пара или чрез пясъкоструйна обработка.

В случай, че в процеса на заваряване се използва добавъчен материал, то той трябва да бъде близък по химичен състав с този на частите, като често се подлага предварително на вакуумно отгряване за отделяне на водорода.

Основен критерий за определяне на заваропригодността на титана и сплавите му е възможността за изработване на съединения без дефекти и притежаващи достатъчна жилавост и пластичност [6].

В таблица 1 е представена класификация на титана и някои от сплавите му в зависимост от заваропригодността им [8].

Табл. 1 Заваропригодност на титан и на някои титанови сплави [2]

Сплав	Заваропригодност
Нелегиран титан	
Gr -1, Gr -2, Gr -7, Gr -11	отлична
Gr -3	много добра
Gr -4	добра
α и почти α сплави	
Gr -12	отлична
Ti-5Al-2,5Sn (Gr-6), Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (+Si)	добра
Ti-5Al-2,5Sn ELI	много добра
α – β сплави	
Gr -5, Gr -5ELI, Ti-3Al-2,5V (Gr-9), Ti-3Al-2,5V with Ruthenium (Gr-28), Ti-6Al-4V ELI with Ruthenium (Gr-23)	много добра
Ti–4Al–4Mo-2,5Sn, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-7Al-4Mo	ограничена
Ti-8Mn	лоша
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	-
β сплави	
Ti-13V-11Cr-3Al, Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (Gr-19)	добра

Означението на титана и сплавите му е според ASM – Aerospace Specifacation Metals;

Нелегираният титан има средна якост, добра пластичност, добра корозионна устойчивост и заваропригодност [14].

Алфа сплавите имат добра заваропригодност и пластичност. Почти алфа сплавите са с отлична якост на пълзене при повишени температури. Те имат добра заваропригодност, но са налице високи остатъчни напрежения изискващи определени мерки (отгряване) [20].

При алфа-бета сплавите заваряването може значително да промени тяхната якост, жилавост и пластичност вследствие термичния цикъл. Ниската жилавост е следствие от фазовите превръщания в шева или зоната на термично влияние. Сплавта Ti-6Al-4V притежава най-добрата заваропригодност от тази група [15]. При по-голямо съдържание на бета стабилизатори, сплавите са с ограничена заваряемост и са склонни към образуване на пукнатини. Това изисква прилагането на предварително подгряване и отгряване за снемане на напреженията непосредствено след заваряване.

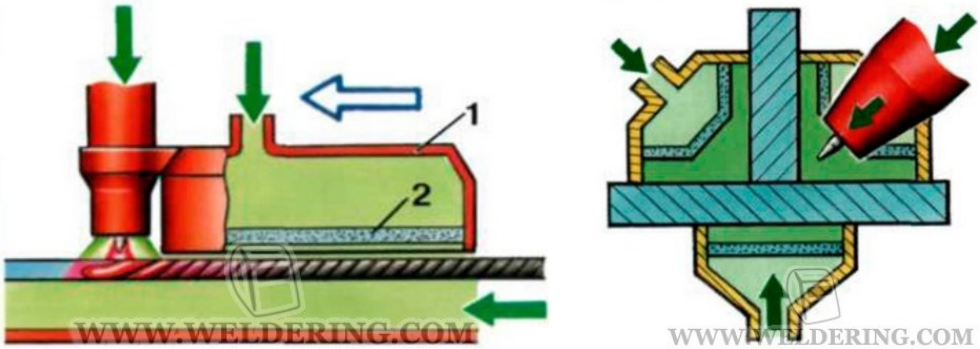
Повечето бета сплави са заваропригодни, те са с добра пластичност, но с ниска якост след заваряване.

По време на заваряването с цел намаляване на опасността от окрехкостяване от кислород, азот и водород е необходимо да се осигури защита на шева и околошевната зона с помощта на инертни газове с висока чистота или вакуум от порядъка на 10^{-2} Pa [19]. В определени случаи се използват и камери, които се запълват най-често с аргон [13].

Основен причинител на газовите пори е разтвореният в метала водород. Източник на него се явяват непочистения добавъчен материал, абсорбираната влага на повърхността на заваряваните части, защитния газ, начина на разкрой на частите, условията на кристализация на заваръчната вана и други [18].

За заваряването на титан и титанови сплави се прилагат следните методи: ВИГ, МИГ, плазмено, електронно-лъчево, електродъгово с кух катод във вакуум, лазерно, заваряване чрез триене и дифузионно [1, 2, 3, 5, 6, 12, 16, 19, 21, 23,]. Освен чрез заваряване тези материали подлежат на свързване и чрез спояване [11].

При заваряване на открито (ВИГ, МИГ и плазмено), а не в камера е необходимо осигуряването на цялостна защита включваща: защита на заваръчната вана (първична), защита на околошевната зона нагрята до температура над 250-300°C (вторична) и защита на обратната страна на шева (чрез подложки) (фиг. 1) [22].



Фиг. 1 Устройства за защита на шева и околошевната зона при ВИГ заваряване на титан и титанови сплави. 1- керамична камера; 2- порьозен материал

В практиката на термично обработване на титан и неговите сплави са се наложили следните видове термични операции и процеси: отгряване, закаляване с последващо стареене (отвръщане), химико-термично обработване [4, 7, 9, 10, 17].

Отгряване – при титановите сплави е обобщаващо понятие включващо в себе си различни режими в зависимост от желаната промяна на структурата и механичните свойства. Термичните операции определяни като отгряване трябва да водят до: увеличаване на жилавостта и пластичността при стайна температура, гарантиране на размерна стабилност и нарастване на съпротивлението срещу пълзене. Основните видове отгряване според процесите протичащи в структурата на метала при нагряване могат да бъдат класифицирани като: дорекристализационно и рекристализационно отгряване, отгряване за намаляване на напреженията и β-отгряване, а според технологията за тяхното провеждане се делят на просто, изотермично и двойно отгряване. Отгряването на α+β титанови сплави съчетава елементи на отгряване от първи род на основата на рекристализационни процеси и отгряване от втори род на основата на фазова прекристализация.

Закаляване – прилага се за титанови сплави с α+β структура. Уякчаващото термично обработване се основава на получаване при стайна температура на метастабилни фази β, α‘ и α‘‘ при закаляване и посладващото им разпадане с отделяне на дисперсни частици при изкуствено стареене. Закаляването може да бъде с и без полиморфно превръщане. Закаляванто без полиморфно превръщане

може да се проведе както от β, така и от α+β област, при което се фиксира метастабилна β-фаза. Закаляването с полиморфно превръщане също става от споменатите по-горе области, но след охлаждане се фиксира метастабилна мартензитна фаза от вида α‘ или α‘‘. Практиката показва, че по-добро съчетание между якост, пластичност и експлоатационни свойства се получава при закаляване без полиморфно превръщане т.е в случаите когато мартензит не се образува.

Стареене (отвръщане) – прилага се само за материали намиращи се в закалено състояние и основния процес протичащ при тази операция е разпадането на метастабилния твърд разтвор. При закаляване без полиморфно превръщане се разпада преситеният β-твърд разтвор и процеса се нарича стареене, а в случаите на закаляване с полиморфно превръщане се разпада мартензитната фаза и процеса се нарича отвръщане.

На практика за титанови сплави се прилага закаляване без полиморфно превръщане, тъй като разпадането на мартензита не води до значително нарастване на якостните характеристики. След провеждане на стареене якостта може да нарасне в границите от 10 до 90-100%, като изменението на якостта зависи основно от метастабилността на β-фазата.

Основните параметри на процесите на отвръщане и стареене са температурата и времето на задържане, а скоростта на нагряване и охлаждане играе второстепенна роля.

Химико-термично обработване – води до повишаване на твърдостта и износоустойчивостта при работа в условия на триене, увеличаване на уморната якост и топлоустойчивостта. Приложение намират азотиране, силициране и други.

ИЗВОДИ

Представените данни по отношение на особеностите при заваряването и термичното обработване на титан и неговите сплави позволяват да се направят следните по-важни изводи:

1. Основните проблеми при заваряването на титан и титанови сплави са свързани с високата му химическа активност, образуването на газови пори и студени пукнатини, както и склонността му към уедряване на зърната в околошевната зона;
2. Най-добра заваропригодност притежава технически чистият титан и алфа и почти алфа сплавите. Алфа-бета и бета сплавите в повечето случаи са с ограничена или лоша заваропригодност следствие на по-голямо съдържание на бета стабилизатори.
3. Сплавта Ti-6Al-4V притежава добри механични характеристики и най-добрата заваропригодност от групата на алфа-бета сплавите и като такава е една от най-често използваните.
4. При термично обработване на титан и неговите сплави най-често се използват следните основните видове операции и процеси: отгряване, закаляване с последващо стареене (отвръщане) и химико-термично обработване. Целта в повечето случаи е повишаване на якостта, пластичността и експлоатационните свойства на обработваните материали.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Dhinakaran V. Numerical Prediction of Weld Bead Geometry in Plasma Arc Welding of Titanium Sheets Using Comsol. National Institute of Technology. Tiruchirapalli Tamilnadu. Comsol Conference. Bangalore. 2014.

[2] Donachie Matthew J. Selection Of Titanium Alloys For Design - Chapter 5. Mechanical Engineers’ Handbook: Materials and Mechanical Design, Volume 1, Third Edition. 2006.

[3] Lisiecki A. 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. December 2012. p. 209-218

[4] Matthew J. Donachie Jr. Heat Treating Titanium And Its Alloys - Heat Treating, Chapter 8 in Titanium: A Technical Guide, 2nd. ASM International, Materials Park, Ohio, December 2000, 381 p.

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

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

[7] Robert Hill Jr. The Vacuum Heat Treatment of Titanium Alloys for Commercial Airframes. Annual Conference Aerospace Material and Process. Orlando Florida. October. 2010.

[8] Titanium Alloy Guide. RMI Titanium Company. 2000.

[9] Thomas G., V. Ramachandra, M. Nair, K. Nagarajan, R. Vasudevan. Effect of Preweld and Postweld Heat Treatment on the Properties of GTA Welds in Ti-6Al-4V Sheet. Welding Research Supplement. 1992. p. 15-20

[10] Todorov Hristo, Venceslav Dimitrov. Structural State of Titanium Tubes after Low Temperature Tempering. International Scientific Conference. 19 – 20 November 2010, Gabrovo. p. 151-155.

[11] Winiowski A. Mechanical and Structural Properties of Joints of Stainless Steel and Titanium Brazed with Silver Filler Metals containing tin. Metallurgy and materials. Volume 55. Issue 4. 2010. DOI: 10.2478/v10172-010-0001-9.

[12] Yassin Mustafa Ahmed, Khairul Salleh Mohamed Sahari, M. Ishak. Welding of Titanium (Ti-6Al-4V) Alloys: A Review. Proceedings National Graduate Conference 2012.

[13] Желев А., Материалознание - техника и технология, Том 2: Технологични процеси и обработваемост – София, 2002 – 430с.

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

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

[16] Каракозов Е., Л. Орлова, В. Пешков. Дифузионная сварка титана. М. Металлургия. 1977. 270 с.

[17] Меркулова Г. А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов. Красноярск. 2007.

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

[19] Неровный В.М., Ямпольский В.М. Сварочные дуговые процессы в вакууме. М. Машиностроение, 2002. 264 с.

[20] Хорев А. И. Научные основы достижения высокой и сверхвысокой конструкционной прочности свариваемых титановых сплавов. Сварочное производство. 2011. №9. с. 14-26. ISSN 0491-6441

[21] http://www.twi-global.com/

[22] www.weldering.com

[23] http://www.welding-fabrication.com/titanium-welding/

За контакти:

Доц. д-р Данаил Господинов, Катедра “Материалознание и технология на материалите”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, e-mail: dgospodinov@uni-ruse.bg

Гл.ас. д-р Николай Фердинандов, Катедра “Материалознание и технология на материалите”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, e-mail: nferdinandov@uni-ruse.bg

Инж. Стоян Димитров, докторант към катедра “Материалознание и технология на материалите”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, e-mail: sdimitrov@uni-ruse.bg