

# SVOJSTVA I PRIMJENA TITANA I NJEGOVIH LEGURA

(Drugi dio)

## Ključne riječi:

- titan
- svojstva i primjena
- toplinska obrada
- zavarivanje titana

## Key words:

- titanium
- properties and applications
- heat treatment
- welding of titanium

## Schlüsselwörter:

- Titan
- Eigenschaften und Anwendung
- Thermische Behandlung
- Titanschweissen

## Adresa autora (Author's address):

prof. dr. sc. Danko Ćorić  
Fakultet strojarstva i brodogradnje  
Ivana Lučića 5, Zagreb, Hrvatska

## Primljeno (Received):

2016-08-15

## Prihvaćeno (Accepted):

2016-08-31

Pregledni članak

U radu je dan pregled titana i njegovih legura koje su atraktivan konstrukcijski materijal zbog visoke čvrstoće, niske gustoće, odlične korozijske postojanosti, toplinske stabilnosti i biokompatibilnosti. Opisane su najvažnije legure iz skupina  $\alpha$ , približno  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  i metastabilnih  $\beta$  legura. Prikazane su mogućnosti toplinske obrade s posebnim osvrtom na rastopno žarenje i dozrijevanje kojim  $\alpha+\beta$  i  $\beta$  legure postižu visoke iznose čvrstoće. Opisane su tehnike zavarivanja titana uz komparativni pregled njihovih prednosti i nedostataka. Na kraju je dan pregled područja primjene titanovih legura koje se prvenstveno koriste tamo gdje do izražaja dolaze jedinstvene karakteristike ovog metala, a to su prije svega visoko čvrste strukture i primjene koje zahtijevaju otpornost na koroziju.

Reviewed paper

## PROPERTIES AND APPLICATION OF TITANIUM AND TITANIUM ALLOYS

An appraisal of titanium and titanium alloys that are accepted as an attractive structural materials due to their intrinsic properties such as high strength, low density, excellent corrosion resistance, thermal stability and bio-compatibility is presented in this contribution. Most important titanium alloys from  $\alpha$ , nearly  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  and metastable  $\beta$  groups are described. Also, possibilities of heat treatment are outlined, particularly detailing the homogenization annealing and ageing processes through which  $\alpha+\beta$  and  $\beta$  alloys gain high strength properties. Processes used in welding titanium are presented too, including a summary of comparative advantages and drawbacks of titanium materials. At the end, a survey of titanium alloys applications is given, particularly used in cases where unique properties of this metal are exploited, such as high strengths structures and application requesting high corrosion resistance.

Übersichtsarbeit

## EIGENSCHAFTEN UND ANWENDUNG VON TITAN UND TITANLEGIERUNGEN

Weil Titan ein sehr attraktives Baumaterial ist wegen seiner hohen Festigkeit, niedrigen Dichtigkeit, sehr guten Korrosionsbeständigkeit, thermischer Stabilität und Biokompatibilität wurde in dieser Arbeit wurde eine Übersicht vom Titan und Titanlegierungen gemacht. Es wurden die wichtigsten Legierungen von der  $\alpha$ , nahezu  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  und metastabilen  $\beta$  Legierungen beschrieben. Es wurden die Möglichkeiten der thermischen Behandlung bei denen die  $\alpha+\beta$  und  $\beta$  Legierungen eine sehr hohe Festigkeit erreichen. Es wurden die Schweisstechnologien von Titan und Titanlegierungen zusammen mit denen Vor- und Nachteilen beschrieben. Am Ende wurde eine Übersicht der Anwendungsgebiet der Titanlegierungen gemacht, vor allen in den Bereichen wo die wichtigsten Eigenschaften vom diesen Material in den Vordergrund kommen, wie z.B. hohe feste Struktur und Korrosionsbeständigkeit.

## 5. TOPLINSKA OBRADA TITANOVIH LEGURA

Toplinska obrada titanovih legura uključuje obradu za redukciju zaostalih naprezanja, žarenje te rastopno žarenje i dozrijevanje. Sve titanove legure mogu se žariti, dok se rastopno žarenje i dozrijevanje provodi samo za  $\alpha+\beta$  i  $\beta$  legure radi povećanja njihove čvrstoće. Budući da  $\alpha$  i približno  $\alpha$  legure ne prolaze faznu transformaciju tijekom toplinske obrade, one nisu toplinski očvrstljive.

Iako danas postoje prevlake kojima se titanove legure mogu zaštititi od štetnog utjecaja kisika, vodika i dušika tijekom toplinske obrade, prednost se ipak daje obradi u vakuumskim pećima. Prije toga, izradak se mora očistiti od organskih nečistoća, uključivo i otisaka prstiju.

### 5.1. Postupci žarenja

Toplinska obrada titanovih legura uključuje različite postupke žarenja: žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja, meko žarenje, žarenje na dupleks strukturu, rekristalizacijsko žarenje te betatizacijsko žarenje.

Žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja provodi se radi uklanjanja naprezanja unesenih oblikovanjem, zavarivanjem, lijevanjem, obradom odvajanjem čestica i toplinskom obradom. Žariti se mogu sve titanove legure bez štetnog utjecaja na njihovu čvrstoću i duktilnost. Kao i kod većine drugih toplinskih procesa, i ovdje se mogu kombinirati različiti temperaturno-vremenski ciklusi, pri čemu više temperature zahtijevaju kraće vrijeme, a niže temperature dulje vrijeme. Ohlađivanje se provodi u peći ili na zraku. Za približno  $\alpha$  i  $\alpha+\beta$  legure temperature žarenja se kreću od 450 do 815 °C, s time da se TiAl6V4 legura mora žariti u području temperatura između 540 i 650 °C.

Meko žarenje, kako i samo ime govori, nije potpuno žarenje pa kod jako deformiranih mikrostruktura, primjerice u limova i ploča, mogu zaostati tragovi hladnoga ili toplog oblikovanja. Za približno  $\alpha$  i  $\alpha+\beta$  legure meko žarenje provodi se kod proizvođača. Legura TiAl6V4 meko se žari pri 700 – 780 °C u trajanju minimalno 1 sat.  $\beta$  legure ne isporučuju se u ovom stanju zbog opasnosti od precipitacije krhkih faza.

Žarenjem na dupleks strukturu poboljšava se otpornost na puzanje kod visoko temperaturnih legura kao što je primjerice TiAl6Sn2Zr4Mo2. Žarenje se provodi u dvije faze: 1) žarenje visoko u  $\alpha+\beta$  području i ohlađivanje na zraku i 2) žarenje pri nižoj temperaturi radi postizanja toplinske stabilnosti.

Rekristalizacijsko žarenje provodi se radi poboljšanja lomne žilavosti. Izradak se zagrijava na temperaturu koja leži visoko u  $\alpha+\beta$  području, drži dovoljno dugo vrijeme i nakon toga sporo ohlađuje.

Betatizacijsko žarenje zahtijeva temperature iznad  $\alpha/\beta$  prekrystalizacije, nakon čega se izradak hladi na zraku ili gasi u vodi, čime se izbjegava formiranje  $\alpha$  faze. Ovaj postupak maksimalno poboljšava lomnu žilavost, ali znatno snižuje mehaničku otpornost pri dugotrajnom dinamičkom opterećenju.

Kombinacije svojstava koje se postižu postupcima žarenja rezultat su različitih mikrostrukturnih stanja materijala. Lamelarne strukture (*slika 8.a*), koje općenito odlikuje najviša lomna žilavost i najveća otpornost rastu pukotine, nastaju sporim ohlađivanjem iz  $\beta$  područja kojim se potiče nukleacija  $\alpha$  čestica po granicama  $\beta$  zrna, pri čemu se  $\alpha$  faza uvijek izlučuje u Widmanstättenovu obliku tvoreći usmjerenu grubozrnatu mikrostrukturu.

Kupnozrnatu mikrostrukturu osiguravaju veću otpornost puzanju zbog manjih klizanja po granicama zrna. Međutim, za primjene koje zahtijevaju visoku čvrstoću i granicu razvlačenja te dobru žilavost i dinamičku izdržljivost, prednost se daje sitnozrnatm mikrostrukturama. Za razliku od lamelarnih, poligonalno oblikovane strukture (*slika 8.b*) koje mogu nastati rekristalizacijskim žarenjem posjeduju optimalnu kombinaciju čvrstoće i žilavosti te visoku dinamičku izdržljivost.

### 5.2. Rastopno žarenje i dozrijevanje

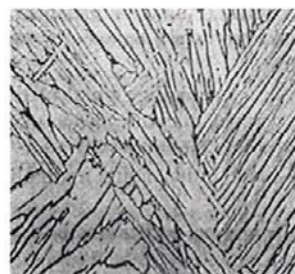
Ova se obrada primjenjuje za  $\alpha+\beta$  i  $\beta$  legure radi povećanja njihove čvrstoće. Rastopnim žarenjem postiže se  $\beta$  fazna mikrostruktura koja se brzim ohlađivanjem zadržava pri sobnoj temperaturi i potom dozrijeva kako bi se potaknulo izlučivanje sitnih precipitata  $\alpha$  faze unutar  $\beta$  matrice koji otežavaju gibanje dislokacija i povisuju čvrstoću.

$\alpha+\beta$  legure se rastopno žare u blizini temperature  $\alpha/\beta$  prekrystalizacije, *slika 9*. Na toj temperaturi visoko u dvofaznom  $\alpha+\beta$  području udio  $\beta$  faze je velik, a  $\alpha$  faze malen. Za maksimalnu čvrstoću žariti se mora 10 – 65 °C ispod temperature prekrystalizacije. Većina  $\alpha+\beta$  legura zahtijeva gašenje u vodi, dok je legure bogatije  $\beta$  stabilizatorima dovoljno hladiti na zraku da bi se  $\beta$  faza sačuvala do sobne temperature. Ovisno o sastavu legure i njenim pretvorbenim temperaturama ( $M_s$ ,  $M_f$ )  $\beta$  faza se može i djelomično ili potpuno transformirati u igličastu  $\alpha'$  strukturu po mehanizmu martenzitne pretvorbe, *slika 9*.

Nastali titanov martenzit, *slika 10*., nije nalik izrazito tvrdom i čvrstom martenzitu koji nastaje kod čelika već je to relativno mekana i prezasićena faza.

Pretvorba u martenzitnu (igličastu)  $\alpha'$  fazu nastupa kod legura sa sadržajem vanadija ispod kritičnog ( $C_k$ ).

Lamelarna Widmanstättenova struktura



a)

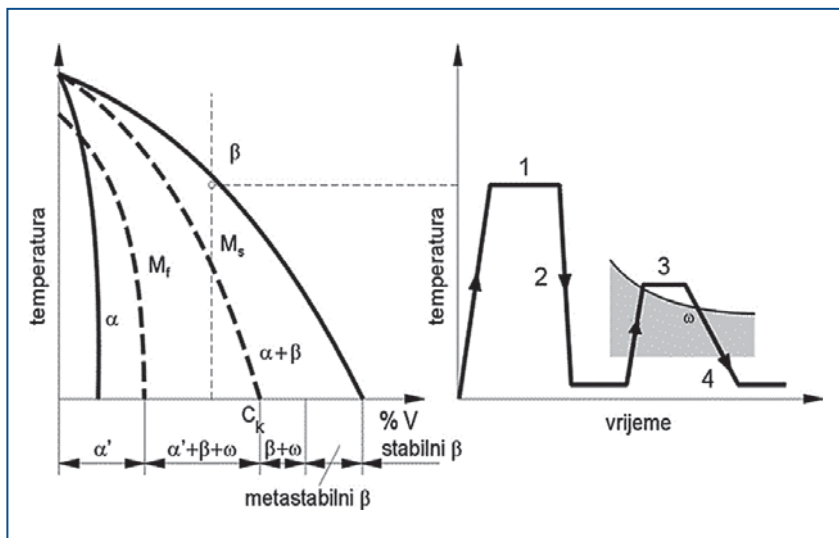
Poligonalna struktura



b)

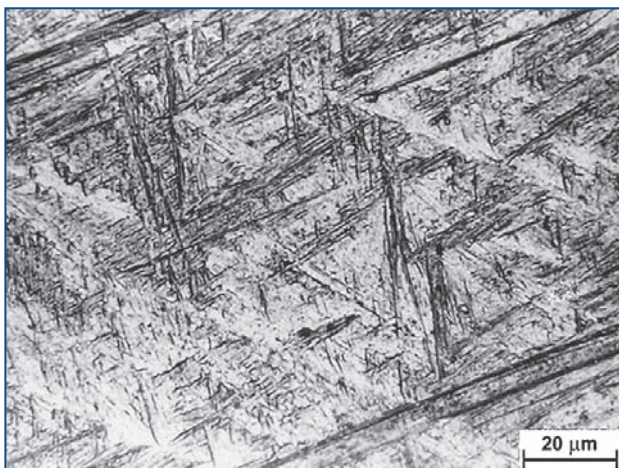
Slika 8. Oblici mikrostrukture titanovih legura [3]

Fig. 8. Microstructure types of titanium alloys [3]



Slika 9. Toplinsko očvršnuće ( $\alpha$   $\beta$ )-legura titana: 1. rastopno žarenje, 2. gašenje, 3. dozrijevanje, 4. hlađenje (zrak ili voda) [5]

Fig. 9. Precipitation hardening of  $\alpha$ + $\beta$  alloys: 1. Solution heat treatment, 2. quenching, 3. aging, 4. cooling (air or water) [5]



Slika 10. Mikrostruktura titanovog martenzita [6]

Fig. 10. Microstructure of titanium martensite [6]

Naknadnim zagrijavanjem (dozrijevanjem) potiče se precipitacija  $\beta$  čestica iz prezasićenog martenzita te ovi precipitati povećavaju čvrstoću u odnosu na martenzit, suprotno onome kod popuštanja čelika.

Ako je  $M_f$  temperatura (temperatura završetka  $\beta/\alpha'$  prekrystalizacije) niža od sobne, a  $M_s$  temperatura (temperatura početka  $\beta/\alpha'$  prekrystalizacije) viša od sobne, tada se sva  $\beta$ -faza neće transformirati u  $\alpha'$ -fazu, već se gašenjem javlja i određena količina metastabilne  $\beta$ -faze. Gašenjem legure s udjelom vanadija većim od kritičnog ( $C_k$ ) ne dostiže se  $M_s$  temperatura i mikrostruktura ostaje  $\beta$ -fazna te se dozrijevanjem, iz prezasićenog  $\beta$  mješance, izlučuju  $\alpha$  precipitati. Ove sitne  $\alpha$  čestice značajno povišuju čvrstoću legure. U tom području koncentracija odvija se brza promjena stanja koja može dovesti

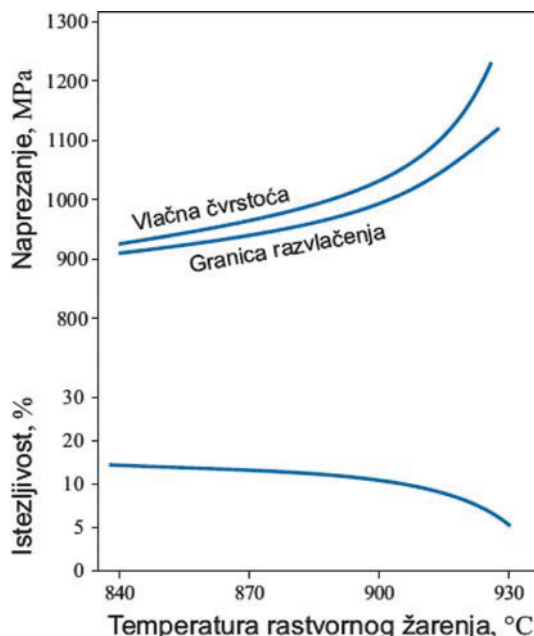
do stvaranja metastabilne prijelazne  $\omega$ -faze.  $\omega$ -faza može nastati pri gašenju ili naknadnom dozrijevanju. Ovu fazu svakako treba izbjeći zbog pojave velike krhkosti.

Tipična obrada za TiAl6V4 leguru uključuje rastopno žarenje pri 905 – 925 °C, ohlađivanje u vodi i potom dozrijevanje pri 540 °C u trajanju 4 h, uz naknadno ohlađivanje na zraku. Na slici 11. opisuje se utjecaj temperature rastopnog žarenja na čvrstoću i duktilnost dozrijevanje legure.

Ta legura kao i druge legure s niskim sadržajem  $\beta$  stabilizatora mora se nakon rastopnog žarenja brzo gasiti da bi postigla željenu čvrstoću. U rastopno žarenom stanju ova se legura ponekad predozrijeva radi povećanja lomne žilavosti i dimenzijske stabilnosti na račun žrtvovanja čvrstoće.

Komercijalne  $\beta$  legure se žare iznad temperature  $\alpha/\beta$  prekrystalizacije i dostupne su već u rastopno žarenom stanju s potpuno  $\beta$  faznom mikrostrukturu.

Ako se želi povišiti čvrstoća potrebno je samo dozrijevat na temperaturama 450 – 650 °C, kada  $\alpha$  faza precipitira u obliku fino dispergiranih čestica unutar  $\beta$  matrice. Tako obrađene  $\beta$  legure postižu čvrstoće usporedive ili bolje od  $\alpha$ + $\beta$  legura.



Slika 11. Utjecaj temperature rastopnog žarenja na svojstva TiAl6V4 legure [3]

Fig. 11. Effect of solution temperature on properties of TiAl6V4 alloy [3]

Tablica 6. Relativna usporedba postupaka zavarivanja titana [3]

Table 6. Relative comparison of titanium welding methods [3]

	TIG	MIG	Zavarivanje plazmom	EB
Debljina materijala (mm)	0,8-6,3	6,3-76,0	3,2-9,6	do 76,0
Jednostavnost postupka	dobra	zadovoljavajuća	dobra	izvrsna
Priprema žlijeba	često	uvijek	ne	ne
Automatizirani ili ručni postupak	oba postupka	automatizirani	oba postupka	automatizirani
Mehanička svojstva	zadovoljavajuća	zadovoljavajuća	dobra	izvrsna
Kvaliteta spoja	dobra	zadovoljavajuća	izvrsna	izvrsna
Cijena opreme	niska	visoka	srednja	vrlo visoka
Deformacije	vrlo velike	velike	srednje	vrlo male

## 6. POSTUPCI SPAJANJA

Titan i njegove legure mogu se spajati zavarivanjem, lemljenjem, lijepljenjem, difuzijskim spajanjem i mehaničkim spojevima.

### 6.1. Zavarivanje

Titan se smatra dobro zavarljivim, no velika se pozornost mora pridati čistoći površine i nužna je primjena inertnih plinova koji sprečavaju onečišćenje iz okoline. Nekoliko čimbenika utječe na zavarljivost titana: njegova niska toplinska vodljivost sprečava odvođenje topline, niski koeficijent toplinskog istezanja pridonosi smanjenju zavarivačkih napetosti, a zahvaljujući visokom specifičnom električnom otporu moguće je elektrootporno zavarivati.

Čisti titan, približno  $\alpha$  legure i neke  $\alpha+\beta$  legure pokazuju dobru zavarljivost. Neke visokočvrste  $\alpha+\beta$  legure, kao  $\text{TiAl6V6Sn2}$  i  $\text{TiAl6Sn2Zr4Mo6}$ , sklone su pojavi pukotina pa nisu tako dobro zavarljive kao  $\text{TiAl6V4}$  legura. Neki beta stabilizirajući elementi koji se dodaju ovim legurama snižuju temperaturu taljenja i proširuju područje skrućavanja. Titanove legure sklone su upijanju plinova u rastaljenom i krutom stanju, čime se u pravilu smanjuje čvrstoća (djelovanje N) i duktilnost (O). Ove legure su osjetljive na pogrubljenje zrna pri visokim temperaturama i smanjenje plastičnosti pa se u pravilu zavaruju s malim unosom topline. Toplinska naprezanja uvedena hlađenjem mogu uzrokovati stvaranje hladnih pukotina kao posljedicu vlačnih zaostalih naprezanja, uz prisutnost nepovoljne krhke strukture nastale upijanjem plinova. Smanjenjem sadržaja vodika na manje od 0,01 % mogu se hladne pukotine izbjeći. Premda većina titanovih legura zahtijeva smanjenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja, posebno pri dugotrajnom dinamičkom opterećenju koje uzrokuje umor, razredi čistog titana 1, 2 i 3 ne zahtijevaju naknadno reduciranje zavarivačkih napetosti, osim ako se ne radi o visoko napregnutom dijelu u reducirajućoj atmosferi.

Postupak elektrolučnog TIG zavarivanja, MIG postupak, zavarivanje plazmom, zavarivanje elektronskim snopom (EB) već su dobro poznate tehnike zavarivanja kod titana i njegovih legura, a sve brže se razvija i postupak laserskog zavarivanja. Značajke pojedinih postupaka dane su u tablici 6.



Slika 12. Zavarivanje titana u zaštitnoj komori  
[preuzeto iz fotoarhive časopisa Zavarivanje]

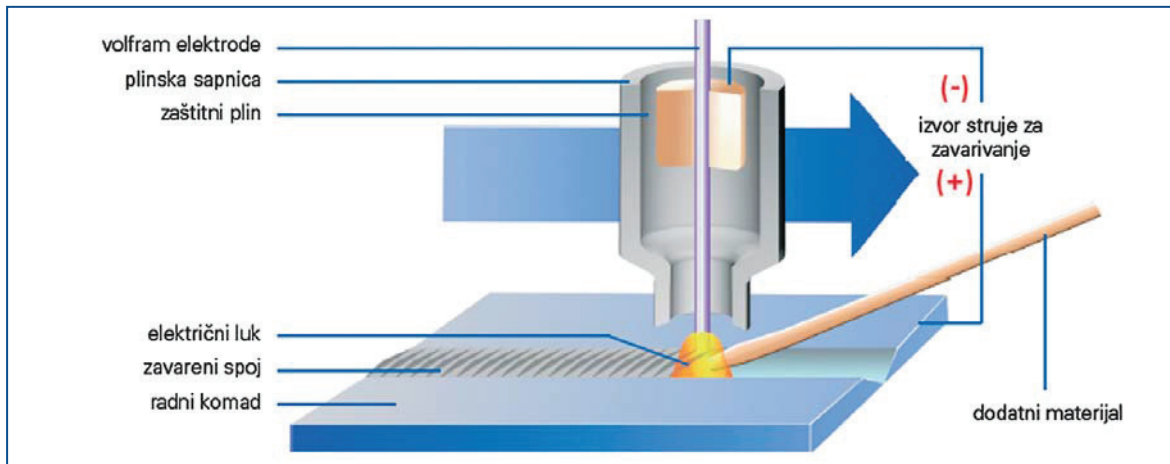
Fig. 12. Welding titanium in a protective chamber  
[taken from the journal Welding]

Neke uobičajene tehnike kao što je ručno elektrolučno zavarivanje (REL) nisu prikladne za titan zbog toga jer on lako stupa u reakciju s plinovima i troškom koji nastaju zavarivanjem.

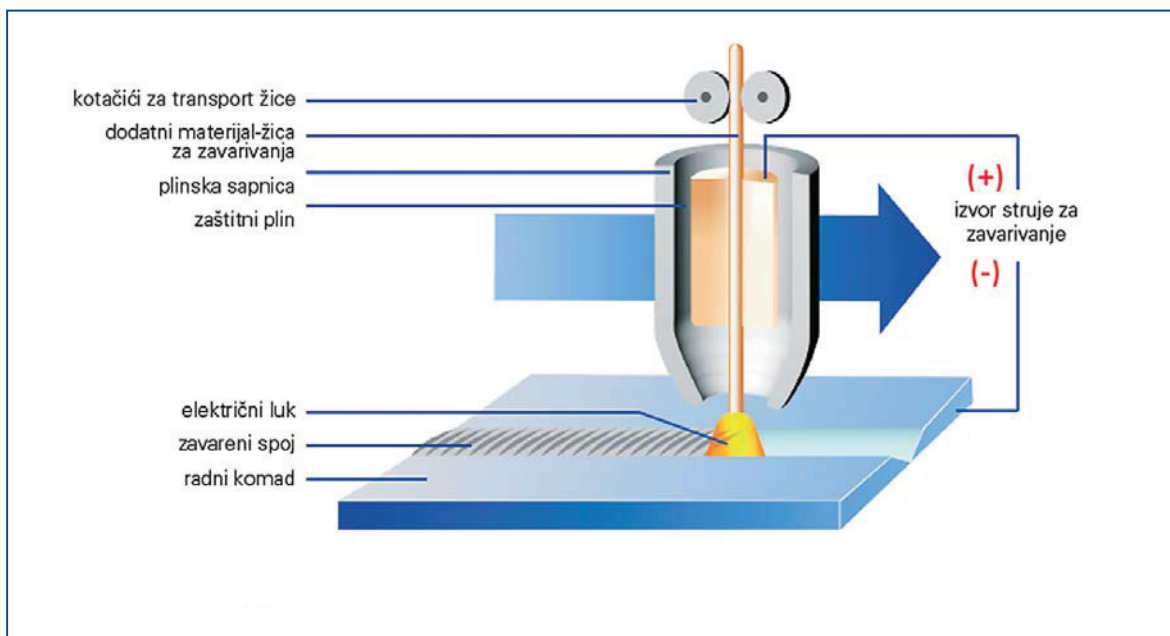
Velika pozornost mora se obratiti čistoći površina koje se zavaruju i zaštiti inertnim plinom ili vakuumom da bi se dobio kvalitetan zavareni spoj. Rastaljeni titan i zone zagrijane iznad 200 °C moraju se dobro zaštititi od atmosferskog onečišćenja. Budući da kisik, vodik i dušik iz atmosfere uzrokuju krhkost, zavarivanje se mora provesti u zaštitnoj atmosferi (argon, helij) ili vakuumskoj komori, slika 12.

Plinoviti helij dopušta više temperature nego argon i time omogućuje bolju penetraciju zavara, veće brzine zavarivanja, ali je njegov zaštitni luk manje stabilan i zahtijeva veće vještine zavarivača. Stoga se većinom kao zaštita upotrebljava argon. Inertni plinovi moraju imati čistoću najmanje 99,95 % i ne smiju sadržati vodenu paru. Zona utjecaja topline i korijen zavara moraju ostati pod zaštitom sve dok temperatura ne padne ispod 200 °C. Atmosfersko onečišćenje može se dovoljno dobro procijeniti na temelju boje zavarenog spoja. Zavar svijetlosrebrene boje je čist (nekontaminiran),





Slika 13. Prikaz TIG postupka [preuzeto od tvrtke Messer Croatia Plin d.o.o.]  
 Fig. 13. TIG welding schematic [taken from the Messer Croatia Gas d.o.o.]



Slika 14. Prikaz MIG postupka [preuzeto od tvrtke Messer Croatia Plin d.o.o.]  
 Fig. 14. MIG welding schematic [taken from the Messer Croatia Gas d.o.o.]

dok svijetloplavi do tamnoplavi ukazuje na neprihvatljivo onečišćenje.

Čistoća površina je važna zbog velike reaktivnosti titana prema vlazi (H, O), mazivu i drugim metalima kada se formiraju krhki intermetalni spojevi. Prije zavarivanja potrebno je pažljivo ukloniti masnoće, boje i druge strane materijale na široj udaljenosti oko zavarenog spoja i sa dodatnog materijala. Za čišćenje su prikladna neklorodna otapala kao što su aceton, etanol ili toluen. Trikloretilen i tetraklor ugljik mogu kasnije biti uzročnici korozije uz naprezanje. Za mehaničko čišćenje površina i uklanjanje površinskoga oksidnog sloja treba koristiti četke od titana ili nehrđajućeg CrNi čelika.

Najčešća tehnika zavarivanja titana je TIG postupak u kojem se toplina zavarivanja osigurava održavanjem luka između netaljive volframove elektrode i radnoga komada. Kod ovog postupka, prikazanog na slici 13., izvor napajanja je istosmjerna struja takvog polariteta da je elektroda negativna. Negativna elektroda je hladnija od pozitivnoga komada te jaka struja koja njome teče rezultira dubokom penetracijom zavara.

Rastaljeni metal i okolni ZUT moraju se zaštititi inertnim plinom. Za debljine materijala do 3 mm TIG se može provoditi ručno ili automatski, bez specijalne pripreme spoja ili punjenja žice. Kod debljih materijala zahtijeva se priprema žlijeba i žice punjene posebnim

prahom. Pri ručnom zavarivanju važno je onemogućiti kontakt volframove elektrode i rastaljenog metala zbog mogućeg onečišćenja volframom. Za TIG zavarivanje može se koristiti konvencionalna oprema, ali uz primjenu dodatnih zaštitnih plinova (argon ili helij).

Zavarivanje plazmom je slično TIG postupku samo što je plazmeni luk ograničen mlaznicom koja povećava gustoću energije i temperaturu zavarivanja. Viša gustoća energije omogućuje bolju penetraciju zavara i veće brzine zavarivanja.

Kod MIG postupka rabi se taljiva elektroda, za razliku od TIG-a gdje je elektroda netaljiva. U MIG postupku, *slika 14.*, izvor napajanja je istosmjerna struja s pozitivnom elektrodom. Pozitivna elektroda je toplija od negativnoga komada, što osigurava taljenje žice u zavareni spoj.

Prednost MIG-a je taljenje više metala u zavar po jedinici vremena uz istu jačinu struje. Za ploče deblje od 12 mm MIG je isplativija tehnika od TIG-a. Međutim, lošija stabilnost električnog luka može uzrokovati prskanje tijekom zavarivanja što smanjuje učinkovitost postupka.

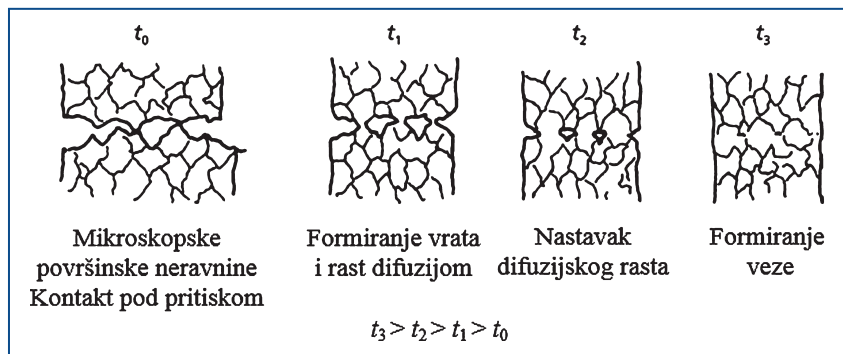
Zavarivanje snopom elektrona koristi fokusiranu zraku elektrona visoke energije koja omogućuje velike dubine penetracije i zavarivanje debelih komada (do 76,0 mm). Druge prednosti su vrlo uski ZUT, male deformacije i čisti zavari budući da se zavarivanje provodi u vakuumskoj komori. Najveći nedostatak ovog postupka je visoka cijena opreme.

Lasersko zavarivanje koristi koherentnu, usmjerenu zraku svjetlosti visokog intenziteta koja stvara uski ZUT. Međutim, ovaj postupak je ograničen na limove i ploče debljine do 13 mm. Prednosti laserskog zavarivanja u odnosu na zavarivanje snopom elektrona je da se ono može provoditi u otvorenoj atmosferi uz odgovarajuću zaštitu inertnim plinom, dok zavarivanje elektronskim snopom zahtijeva vakuumsku komoru.

Titanove legure se mogu lako elektrootporno zavari ti točkastim i šavnim zavarivanjem.

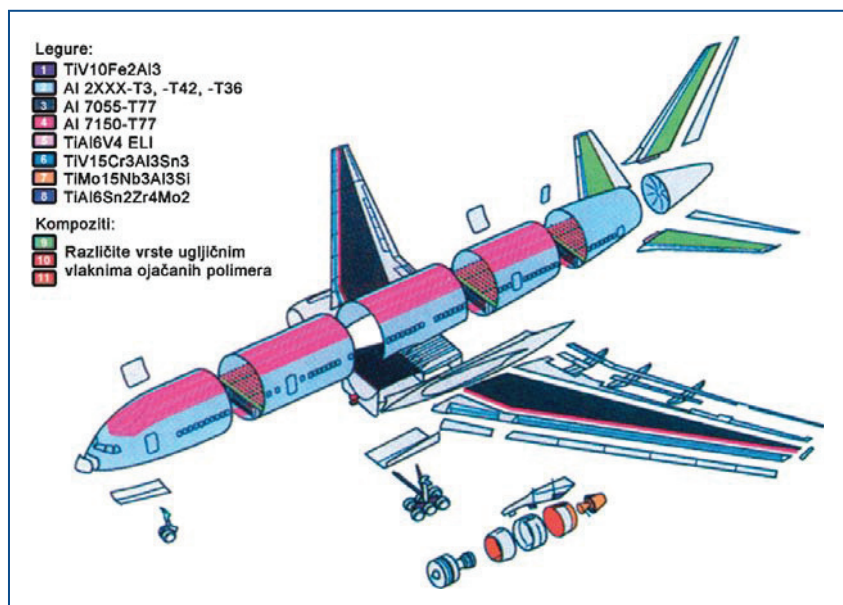
Kao i kod svih drugih postupaka važna je čistoća materijala. Zbog brzih toplinskih ciklusa elektrootporno zavarivanje ne zahtijeva zaštitu inertnim plinom.

Difuzijsko zavarivanje je proces spajanja u čvrstom stanju koji počiva na istodobnoj primjeni topline i pritiska, čime nastaje čvrsta veza. Zavarivanje difuzijom provodi se u četiri stupnja, *slika 15.*: (1) stvaranje polaznih kontakata između površinskih neravnina (visokotemperaturno puzanje); (2) formiranje metalne veze;



Slika 15. Faze difuzijskog zavarivanja [3]

Fig. 15. Stages in diffusion bonding [3]



Slika 16. Konstrukcijski materijali zrakoplova Boeing 777 [7]

Fig. 16. Construction materials on Boeing 777 airplane [7]

(3) difuzija atoma na kontaktnim površinama; (4) rast zrna.

Za formiranje kvalitetne veze nužna je čistoća površina. Prednost je titana da se na temperaturama iznad 620 °C rastvara površinski oksid ( $\text{TiO}_2$ ), čime se stvaraju nužni uvjeti za difuzijsko zavarivanje. Druga je prednost da mnoge titanove legure pokazuju superplastičnost na temperaturama vezivanja (900 – 950 °C), što značajno olakšava polazni kontakt. Tipični parametri difuzijskog zavarivanja za TiAl6V4 leguru uključuju temperaturu 900 – 945 °C i pritisak od 1,38 – 13,79 GPa u trajanju 1 – 6 sati.

## 7. PRIMJENA TITANA I NJEGOVIH LEGURA

Titan i njegove legure su tehnički superiorni konstrukcijski materijali koji se rabe u primjenama gdje do iz-



Slika 17. Mlazni motor [8]  
Fig. 17. Turbojet engine [8]

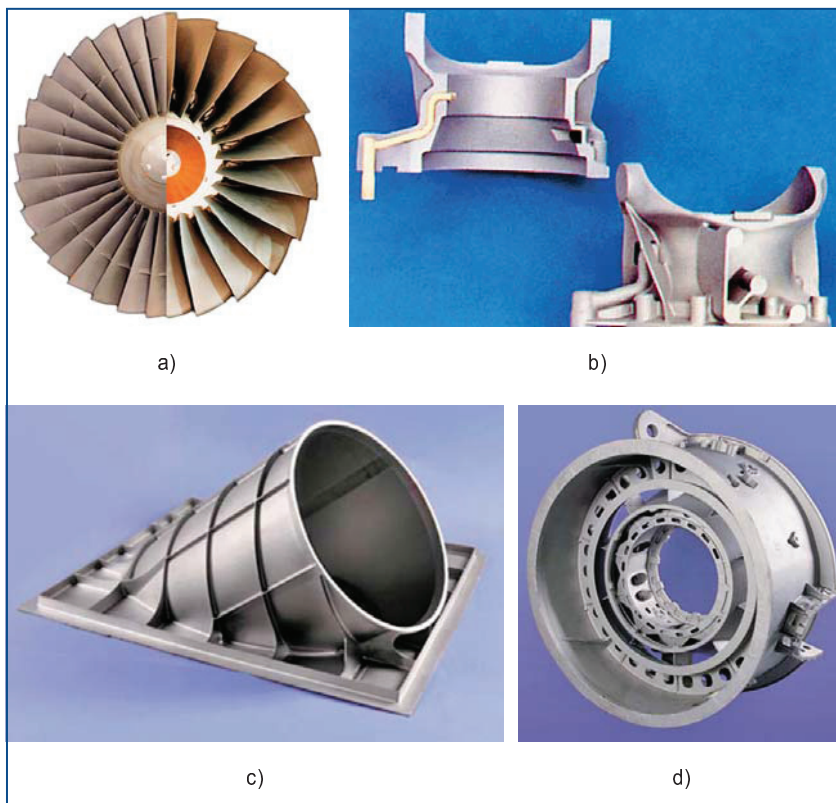
ražaja dolaze njihove jedinstvene značajke, a to su prije svega visoka čvrstoća i odlična korozijska postojanost. Većinom se koriste u zrakoplovnoj industriji, svemirskoj i raketnoj tehnici, ali i u kemijskoj industriji, brodogradnji, medicini, arhitekturi, industriji sportske opreme i dr.

Primjena titanovih legura u zrakoplovstvu počiva na maloj masi i visokoj čvrstoći, čime se učinkovito reducira masa naročito kada je riječ o visokopterećenim dijelovima izloženim visokim i niskim radnim temperaturama. Iako su ovi materijali većinom zastupljeni u vojnim letjelicama, danas se uspješno rabe i u civilnom zrakoplovstvu. Kod suvremenih borbenih letjelica, kao što je F-22, legure titana zastupljene su s približno 42 % mase, dok je njihov udio kod putničkih zrakoplova nešto manji, ali također u stalnom porastu, tako da Boeing 777 već sadrži oko 10 % materijala na bazi titana, slika 16.

Titanove legure masovno se koriste u motorima komercijalnih putničkih zrakoplova, čineći 20 – 30 % njegove mase, naročito kada je riječ o niskotlačnom i visokotlačnom kompresoru, slika 17.

Od ovih legura izrađuju se lopatice kompresora i ventilatora (slika 18.a), mlaznice, glavine, kućišta i dijelovi nosača motora (slika 19.), ali i drugi dinamički visokopterećeni elementi, primjerice kod helikoptera (slika 18.b). Precizno lijevanje je raširena tehnologija oblikovanja tankostijenih (slike 18.c), velikih i geometrijski složenih dijelova (slika 18.d).

Od titana se izrađuju ne samo sekundarni već i primarni konstrukcijski elementi poput trupa borbenih zrakoplova. Na slici 20. prikazuje se *Blackbird*, prvi zrakoplov koji je gotovo u cijelosti načinjen od titana.

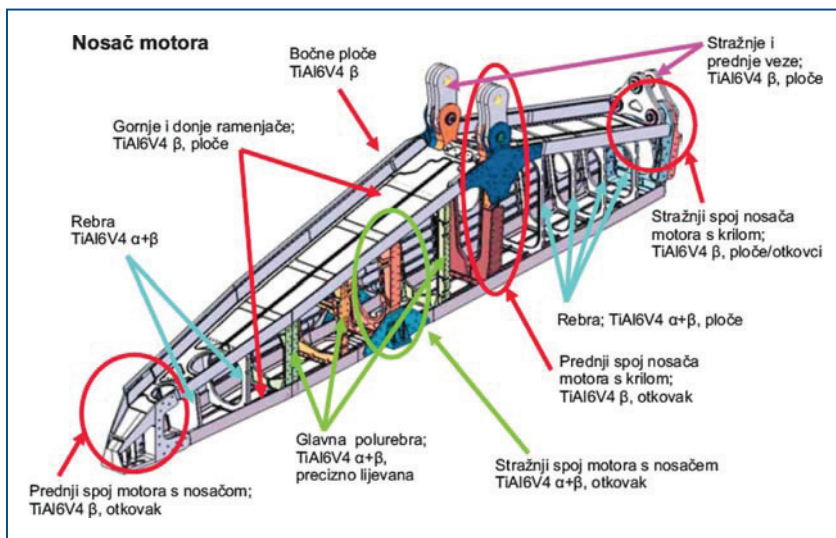


Slika 18. Primjeri primjene Ti-legura u zrakoplovstvu:

- lopaticе ventilatora,
- precizno lijevani dijelovi helikoptera,
- precizno lijevana ispušna cijev pomoćnog sustava napajanja,
- precizno lijevano kućište ventilatora plinske turbine [9]

Fig. 18. Examples of Ti-alloys application in aerospace:

- fan blades,
- parts of helicopter,
- duct for an auxiliary power unit,
- gas turbine fan frame [9]



Slika 19. Primjeri primjene Ti-legura za dijelove nosača motora zrakoplova A380 [10]

Fig. 19. Ti-alloys application on engine carrier of A380 airplane [10]

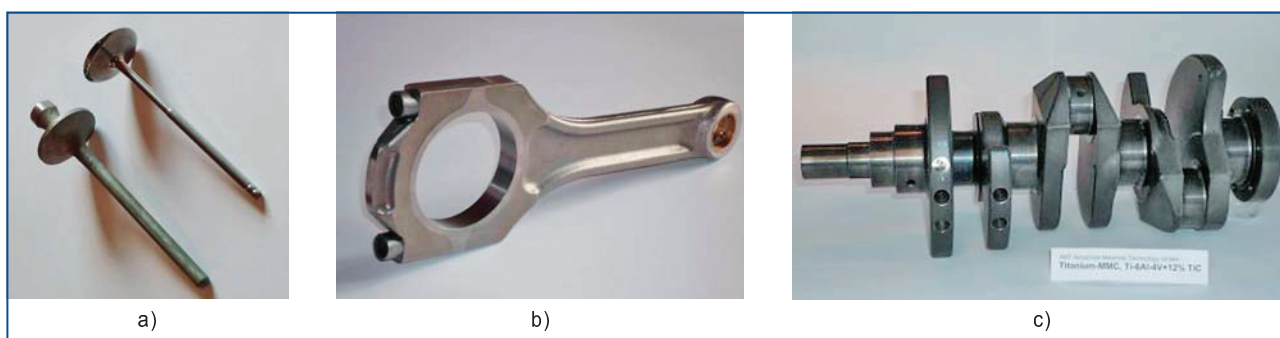




Slika 20. Blackbird SR-71 [11]  
Fig. 20. Blackbird SR-71 [11]



Slika 22. Trup podmornice načinjen od titana [13]  
Fig. 22. Submarine hull made of titanium [13]



Slika 21. Primjeri primjene Ti-legura u automobilske industriji: a) usisni ventili, b) klipnjača, c) bregasta osovina [12]  
Fig. 21. Examples of Ti-alloys application in the automotive industry: a) intake valves, b) conrod, c) crankshaft [12]

Krila i trup ovog zrakoplova u potpunosti su prekriveni oplatom od lakih i čvrstih titanovih legura.

Zahvaljujući visokoj čvrstoći i maloj gustoći te dobroj lomnoj otpornosti Ti-materijali nalaze primjenu i u automobilske industriji (slika 21.), gdje pridonose sigurnosti i smanjenju mase vozila što se odražava na manju potrošnju goriva i emisiju štetnih plinova.

Titan, zbog svoje otpornosti na koroziju u morskoj vodi, čest je konstrukcijski materijal i u brodogradnji, prvenstveno za vojne brodove i podmornice. Od tih legura izrađuju se npr. ventili u podmornicama, razni odjeljci, izmjenjivači topline koji koriste morsku vodu pa sve do oplata trupa podmornice, slika 22.

Osim toga, upotrebljavaju se za izradu niza drugih metalnih dijelova na brodovima kao što su kuke, spojnice, okovi, zatezači (slika 23.), pri čemu zamjenjuje nehrđajući čelik. Razlog tome je što je titan 40 % čvršći, 40 % lakši i najvažnije je da nije sklon koroziji i pucanju.

Titan i njegove legure visoke čvrstoće, relativno niskog modula elastičnosti te odlične biokompatibilnosti, široko su primjenjive u medicini i stomatologiji za izradu implantata, operacijskog pribora, pejsmejкера i cijelog niza drugih medicinskih pomagala, slika 24.

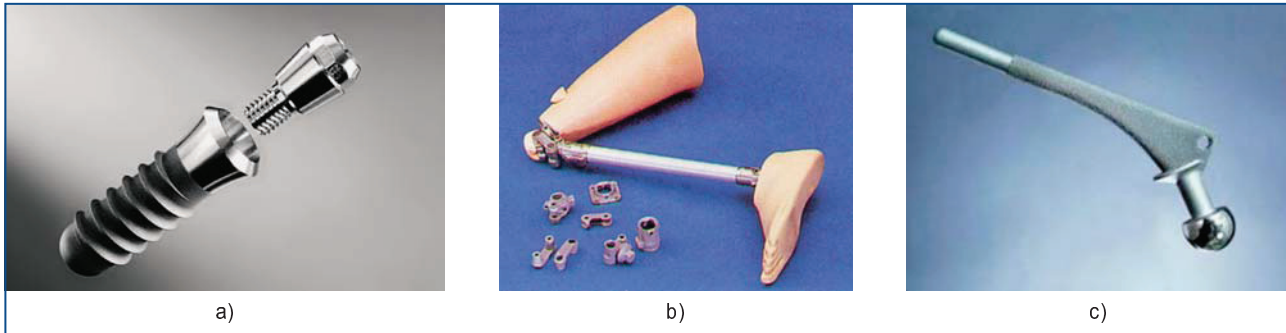
Otpornost na atmosfersku koroziju, visoka čvrstoća i mala masa, niski koeficijent toplinskog rastezanja (podjednak onomu za staklo i granit te blizak koefici-



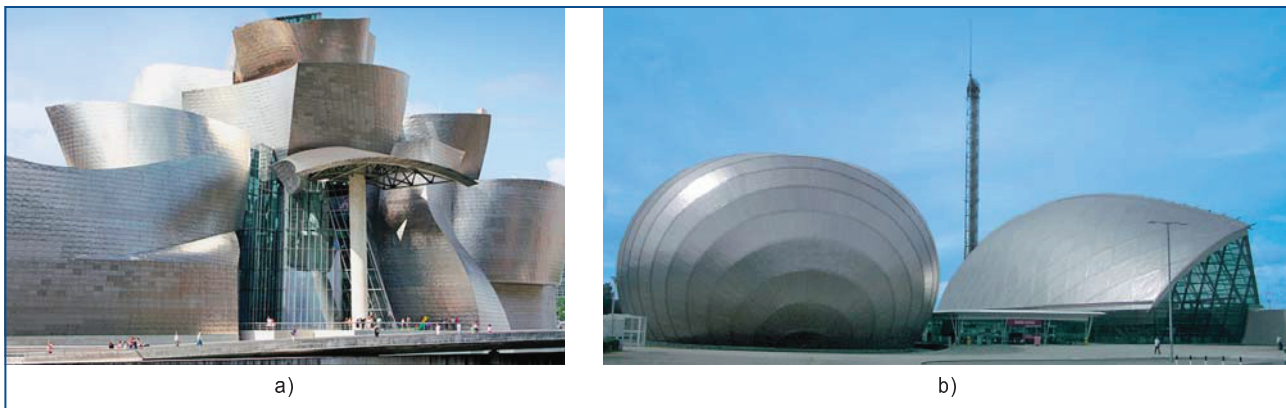
Slika 23. Karike i spojnice od titana [14]  
Fig. 23. Titanium shackles and swivels [14]

jentu toplinske ekspanzije betona) čine titan privlačnim arhitektonskim materijalom. Titanove legure prikladne su za unutarnje i vanjske obloge kao što su oplata, pokrovi krovova i obloge stupova, spomenika i skulptura. Neke procjene govore da je do danas širom svijeta upotrebjeno blizu 2000 tona titana kao arhitektonskog materijala. Tako je npr. *Guggenheim Museum*, Bilbao (slika 25.a) obložen s ukupno 32000 m<sup>2</sup> ploča od titana, dok





**Slika 24.** Primjeri primjene Ti-legura u stomatologiji i medicini: a) zubni implantat, b) proteza, c) umjetni kuk [15], [16]  
**Fig. 24.** Examples of Ti-alloys application in dentistry and medicine: a) dental implant, b) prosthesis, c) artificial hip [15], [16]



**Slika 25.** Primjeri primjene Ti-legura u arhitekturi: a) *Guggenheim Museum*, Bilbao, b) Muzej znanosti i IMAX centar, Glasgow [17], [18]  
**Fig. 25.** Examples of Ti-alloys application in architecture: a) *Guggenheim Museum*, Bilbao, b) Glasgow Science Centre and cineworld IMAX [17], [18]



**Slika 26.** Primjeri primjene Ti-legura za sportsku opremu [19]  
**Fig. 26.** Examples of Ti-alloys application for sports equipment [19]

su Muzej znanosti u Glasgouu i obližnji IMAX centar (slika 25.b) u cijelosti obloženi oplatom od titana.

Od drugih područja primjene može se još istaknuti industrija sportskih rekvizita (slika 26.), gdje se TiAl3V2,5 legura rabi za izradu palica za golf, okvira za reket, bicikala, palica za kriket i hokej i duge visokokvalitetne sportske opreme.

#### LITERATURA

- [1] ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Volume 2, ASM, Ohio, 1990.
- [2] www.australwright.com.au (preuzeto 12. 9. 2016.)
- [3] F.C. Campbell: Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, Elsevier, 2006.
- [4] D. Ćorić, T. Filetin: Materijali u zrakoplovstvu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

- [5] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (6. izdanje), 2011.
- [6] J. Sieniawski, W. Ziąja, K. Kubiak and M. Motyka: Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Two-Phase Titanium Alloys, Intech Open Science, 2013. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com) (preuzeto 18. 7. 2016.)
- [7] B. Smith: The Boeing 777, Advanced Materials&Processes, September 2003.
- [8] R. Brooks: GE to Seek New Inspections for Jet Engines, American Machinist, October 2012.
- [9] Časopis: Advanced Materials&Processes Vol.166, 6, 2008.
- [10] K.-H. Rendigs: Current Aircrafts Metal Technologies, Airbus; <http://www.polishengineers.org>
- [11] [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org) (preuzeto 5. 9. 2016.)
- [12] [www.amt-advanced-materials-technology.com](http://www.amt-advanced-materials-technology.com) (preuzeto 13. 9. 2016.)
- [13] [www.uk.pinterest.com](http://www.uk.pinterest.com) (preuzeto 8. 9. 2016.)
- [14] [www.titan-marine-hardware.com](http://www.titan-marine-hardware.com) (preuzeto 8. 9. 2016.)
- [15] [www.micropat.ch](http://www.micropat.ch) (preuzeto 18. 7. 2016.)
- [16] [www.cam111.com](http://www.cam111.com) (preuzeto 15. 7. 2016.)
- [17] C. Leyens, M Peters: Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2005.
- [18] [www.scottishcinemas.org.uk](http://www.scottishcinemas.org.uk) (preuzeto 16. 9. 2016.)
- [19] [www.metalpedia.asianmetal.com](http://www.metalpedia.asianmetal.com) (preuzeto 8. 9. 2016.)
- [20] CES – Cambridge Engineering Selector, Granta Design, Cambridge, 2009.
- [21] M. F. Ashby, K. Johnson: Materials in Design, Butterworth-Heinemann, 2003.
- [22] T. Filetin, M. Franz, Đ. Španiček, V. Ivušić: Svojstva i karakteristike materijala - Katalog opisa, III. izd., Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

## 9. MEĐUNARODNO ZNANSTVENO-STRUČNO SAVJETOVANJE - SBZ 2017.

### STROJARSKE TEHNOLOGIJE U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, SBZ 2017.

Slavonski Brod, 25. - 27. 10. 2017.

#### TEME

- Nove tehnologije i materijali
- Postupci zavarivanja
- Robotizacija i automatizacija
- Posude pod tlakom
- Zavarivanju srodne tehnike
- Izrada zavarenih konstrukcija
- Kontrola kvalitete zavarenih proizvoda
- Pouzdanost i sigurnost zavarenih proizvoda i konstrukcija
- Zavarljivost materijala
- Dodatni materijali za zavarivanje
- Oprema za zavarivanje i srodne postupke
- Kadrovi i obrazovanje u zavarivanju
- Metalurgija
- Ekologija i zaštita na radu
- Ekonomski aspekti u zavarivanju



#### DATUM I MJESTO ODRŽAVANJA

Savjetovanje će se, kao i dosadašnjih godina, održati u kazališno-koncertnoj dvorani Ivane Brlić Mažuranić i Đuri Đakoviću u Slavonskom Brodu, 25. – 27. listopada 2017.

#### VAŽNI DATUMI

- 1. srpnja: krajnji rok za slanje radova
- 15. listopada: krajnji rok za prijavu sudionika

Najnovije informacije o skupu možete pronaći na:  
<http://www.sfsb.hr/dtzsb/>

Smještaj: Turistička zajednica Slavonski Brod:  
<http://www.tzgsb.hr>

#### KONTAKT

DTZ Slavonski Brod  
Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu  
Trg I. B. Mažuranić 2, 35 000 SLAVONSKI BROD  
E-mail: [dtzsb@sfsb.hr](mailto:dtzsb@sfsb.hr)

Miroslav Duspara  
Tel.: 035 493 412, Fax. 035 446 446  
E-mail: [miroslav.duspara@sfsb.hr](mailto:miroslav.duspara@sfsb.hr)

Božo Despotović  
Tel./Ffax: 035 218 330  
E-mail: [despotovic.bozo@gmail.com](mailto:despotovic.bozo@gmail.com)