

SVOJSTVA I PRIMJENA TITANA I NJEGOVIH LEGURA

(Prvi 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):

izv. 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 α , približno α , $\alpha+\beta$ i metastabilnih β legura. Prikazane su mogućnosti toplinske obrade s posebnim osvrtom na rastopno žarenje i dozrijevanje kojim $\alpha+\beta$ i β 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 α , nearly α , $\alpha+\beta$ and metastable β groups are described. Also, possibilities of heat treatment are outlined, particularly detailing the homogenization annealing and ageing processes through which $\alpha+\beta$ and β 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 strength 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 eine Übersicht vom Titan und Titanlegierungen gemacht. Es wurden die wichtigsten Legierungen von der α , nahezu α , $\alpha+\beta$ und metastabilen β Legierungen beschrieben. Es wurden die Möglichkeiten der thermischen Behandlung bei denen die $\alpha+\beta$ und β 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 Anwendungsgebiete 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.

1. UVOD

Titan (Ti) je metal srebrne boje i ubraja se u vrlo raširene elemente. U zemljinoj kori ima ga oko 0,7 %. Iako je već davno bilo dokaza o njegovu postojanju, tek je 1825. g. Berzelius prvi uspio proizvesti titan. U prirodi se nalazi u rudama kao rutil (TiO_2) i ilmenit (FeTiO_3). Glavna nalazišta su u Rusiji, Kanadi, Norveškoj, Australiji, Indiji, južnoj i srednjoj Africi.

Industrijska proizvodnja započela je nakon Drugoga svjetskog rata kada se spoznalo da je titan, zahvaljujući nizu odličnih svojstava, metal doba svemirskih istraživanja.

2. SVOJSTVA TITANA I NJEGOVH LEGURA

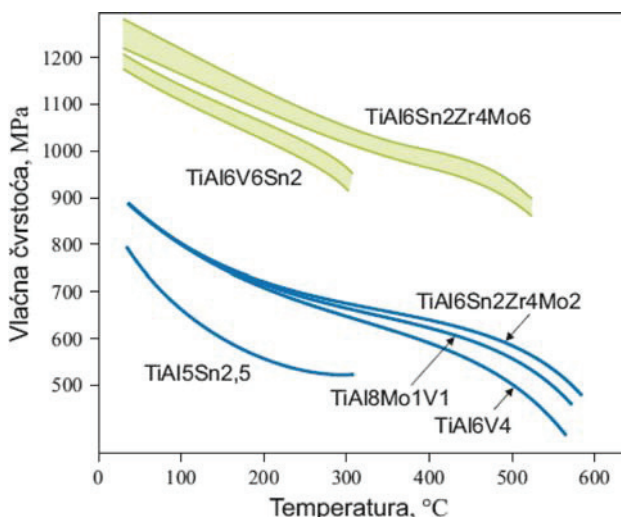
Titan je vrlo privlačan konstrukcijski materijal zbog svoje visoke čvrstoće, niske gustoće i odlične korozijske postojanosti. Zahvaljujući ovim prednostima, titan predstavlja tehnički superiorniji konstrukcijski materijal od čelika i niklovih legura. No važno je spomenuti da svojstva titanovih legura mogu značajno varirati, ovisno o vrsti legure i njenom mikrostrukturnom stanju određenom vrstom i udjelom legiranih dodataka. Kako je titan polimorfan metal koji pokazuje alotropske transformacije kristalne rešetke, to bitno utječe na njegova svojstva.

Osnovne prednosti primjene titana i njegovih legura jesu sljedeće:

- **Ušteda na težini:** visoka čvrstoća u odnosu na masu omogućuje titanovim legurama supstituciju čelika u mnogim primjenama gdje je odlučujuća čvrstoća i dobra lomna žilavost. S gustoćom od oko 4500 kg/m^3 titanove legure dvostruko su lakše od čelika i niklovih superlegura tako da su odličnog omjera čvrstoće i gustoće. Visoku specifičnu čvrstoću zadržavaju u širokom rasponu tempe-

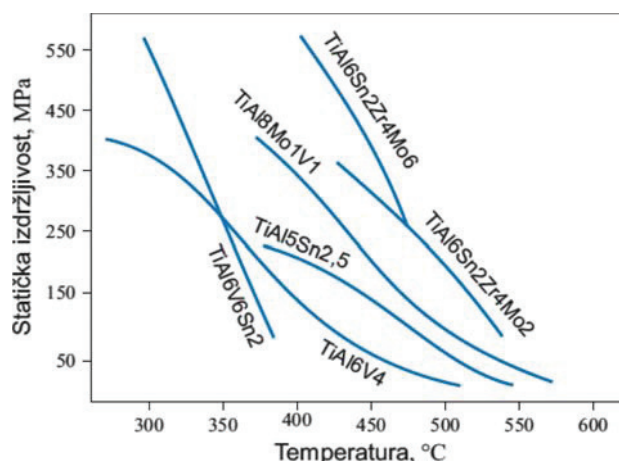
ratura od -200 do 550 °C, što im osigurava značajnu prednost pred drugim inženjerskim materijalima.

- **Visoka dinamička izdržljivost:** titanove legure imaju veću dinamičku izdržljivost od primjerice aluminija pa se često koriste za ciklički visokooperećene dijelove.
- **Toplinska stabilnost:** legure titana postojane su do temperatura 315 °C odnosno 600 °C, ovisno o vrsti legure, *slika 1*.
- **Korozijska postojanost:** korozijska otpornost titanovih materijala znatno je bolja od aluminijevih i čeličnih legura. Titanove legure visoko su postojane u različitim agresivnim medijima kao što su kloridne otopine, morska voda i kiseline. To zahvaljuju vrlo stabilnoj i postojanoj, čvrsto prionjenoj oksidnoj prevlaci koja nastaje na površini metala u oksidirajućoj okolini. Ovaj oksidni sloj nositelj je otpornosti na koroziju. Ako dođe do oštećenja oksidne prevlake, ona se iznova obnavlja. Otpornost titanovih materijala prema selektivnom obliku napetosne korozije ovisi o kemijskom sastavu i naknadnoj toplinskoj obradi. Dodatak aluminija općenito povećava sklonost prema ovom obliku korozije tako da su legure s više od 6 % Al osjetljive na koroziju u uvjetima istodobnog djelovanja vlačnog naprezanja i agresivne okoline. Također, štetni su i dodaci Sn, Mg i Co, dok Mo, V i Nb poboljšavaju otpornost na napetosnu koroziju. U spoju titana s drugim metalima može nastupiti kontaktna (galvanska) korozija kada je, u većini slučajeva, titan katodni član galvanskog para koji sporije korodira, osim u kontaktu s plemenitim metalima. Za razliku od čelika i aluminija titan nije sklon galvanskoj koroziji u kontaktu s ugljičnim kompozitima.
- **Odlična biokompatibilnost:** titan i njegove legure otporne su na djelovanje tjelesnih tekućina što im omogućuje široku primjenu u medicini.
- **Dobra otpornost na puzanje:** određene legure titana (α legure) posjeduju znatnu otpornost na



Slika 1. Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama za odabrane Ti-legure [1]

Fig. 1. Tensile strength at elevated temperatures for selected Ti-alloys [1]



Slika 2. Statička izdržljivost nakon 150 sati opterećenja za odabrane Ti-legure [1]

Fig. 2. Creep rupture strength after 150 hours for selected Ti-alloys [1]

puzanje. Na *slici* 2. prikazana je statička izdržljivost za neke Ti-legure.

Osim toga, titan i njegove legure su nemagnetične, vrlo dobro provode toplinu ($\lambda=16,75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) i imaju malu toplinsku rastezljivost ($\alpha=9\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Toplinska rastezljivost niža je od čelika i dvostruko manja u usporedbi s aluminijem, što jamči visoku dimenzijsku stabilnost oblika.

Neke legure titana s heksagonskom kristalnom strukturom (α legure) zadržavaju dobru žilavost i pri niskim temperaturama te nemaju izraženu prijelaznu temperaturu.

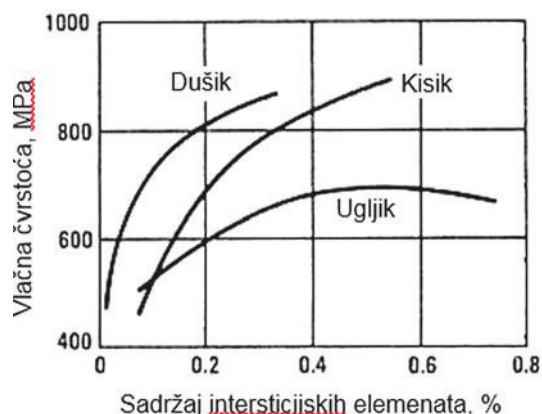
Krutost titanovih materijala, određena vrijednošću modula elastičnosti od 110 GPa, zadovoljavajuća je za većinu konstrukcijskih primjena. Dijelovi od titana pokazuju veću krutost od aluminijevih dijelova, ali su u usporedbi s čelikom elastičniji.

Sposobnost hladnog oblikovanja je ograničena i ako se zahtijevaju veći stupnjevi deformacije, potrebna su česta međuzarenja. Pri višim temperaturama oblikovljivost je bolja, ali se ne smije prijeći temperatura 950 °C zbog velikog afiniteta titana prema kisiku, vodik, dušiku i ugljiku. Pri toplinskoj obradi, ili tijekom deformiranja na zraku, površina se prekriva oksidnom prevlakom koju je potrebno naknadno mehanički ukloniti. Zato se sitni dijelovi toplinski obrađuju u vakuumu ili zaštitnoj atmosferi inertnog plina.

Titan je teško obradljiv odvajanjem čestica jer je vrlo žilav pa se „lijepi“, a postoji opasnost i od zapaljenja strugotine.

Većina legura je dobro zavarljiva u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumu. Zavar mora ostati pod zaštitom do potpunog ohlađivanja. Kvaliteta zavara može se jednostavno kontrolirati mjerenjem tvrdoće jer se svako povećanje udjela kisika ili dušika odražava povećanjem tvrdoće.

Naposlijetku, iako je titan četvrti najzastupljeniji element u zemljinoj kori, njegova cijena je vrlo visoka zbog izrazite reaktivnosti i visoke temperature tališta (1670 °C). Titanove legure snažno reagiraju s elementima kao što su fluor, klor, vodik i kadmij, što je u počecima pred-



Slika 3. Utjecaj sadržaja intersticijskih elemenata na vlačnu čvrstoću nelegiranog titana [2]

Fig. 3. Effect of interstitial elements on the tensile strength of unalloyed titanium [2]

stavljalo velike probleme u proizvodnji. Proizvodni troškovi i naročito troškovi prerade titanovih legura još su uvijek vrlo visoki, što djelomično ograničuje primjenu.

3. NELEGIRANI (TEHNIČKI) TITAN

Nelegirani titan je tvrd, sjajan, srebrenkast metal koji je postojan na koroziju zbog sloja oksida koji se stvara na površini. Otporan je na mnoge kiseline (osim HF, H₃PO₄ i koncentriranu H₂SO₄) i lužine te se najčešće koristi u primjenama koje zahtijevaju antikorozijsku, posebno kada čvrstoća materijala nije presudna. Tehnički titan sadrži između 98,9 i 99,5 %Ti. Ostatak čine nečistoće koje znatno utječu na mehanička svojstva, *tablica* 1.

Tablica 1. Pregled komercijalnih razreda čistog titana [1]

Table 1. Grades of commercially pure titanium [1]

Oznaka	R _e ^T , MPa	R _m ^T , MPa	Maks. sadržaj nečistoća, %				
			N	C	H	Fe	O
ASTM razred 1	170	240	0,03	0,08	0,015	0,2	0,18
ASTM razred 2	280	340	0,03	0,08	0,015	0,30	0,25
ASTM razred 3	380	450	0,05	0,08	0,015	0,30	0,35
ASTM razred 4	480	550	0,05	0,08	0,015	0,50	0,40
ASTM razred 7	280	340	0,03	0,08	0,015	0,30	0,25
ASTM razred 11	170	240	0,03	0,08	0,015	0,20	0,18

Postizive čvrstoće ovise o varijacijama intersticijskih elemenata, u prvom redu kisika, dušika i ugljika, *slika* 3.

Visoka topljivost intersticijskih elemenata kisika i dušika čine titan jedinstvenim među metalima, ali stvara i poteškoće zbog oksidacije kod zagrijavanja, ali i otvrdnuća površine koje je posljedica difuzije kisika i dušika u površinske slojeve. Površinski otvrdnut α -sloj mora se ukloniti nekom od mehaničkih obrada jer smanjuje dinamičku izdržljivost i duktilnost.

Tehnički titan može se uporabiti za konstrukcijske i nekonstrukcijske namjene. Vrste titana niže čvrstoće koriste se prvenstveno kad se traži otpornost na koroziju i oblikovljivost. Zahvaljujući čvrsto prionjenoj oksidnoj



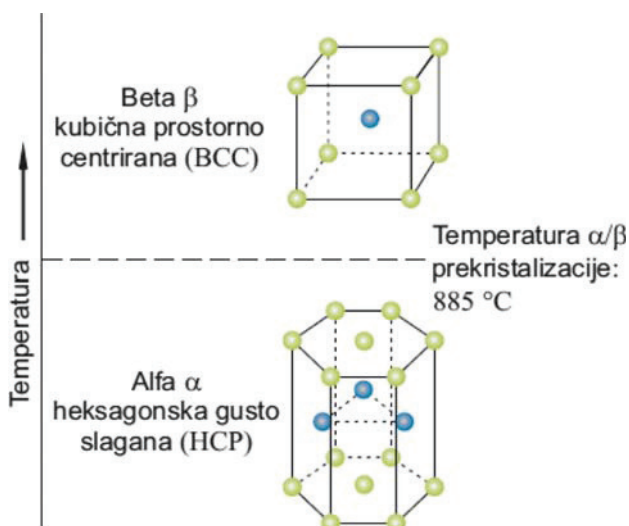
Slika 4. Veliki izmjenjivač topline načinjen od titana [3]

Fig. 4. Large titanium heat exchanger [3]

prevlaci koja nastaje u oksidirajućoj okolini nalazi primjenu u uvjetima agresivnog djelovanja oksidirajuće kiseline ili smjese takvih kiselina. Tehnički titan se rabi za izmjenjivače topline (slika 4.) u postrojenjima za desalinizaciju morske vode i priobalnim elektranama hlađenim morskom ili bočatom vodom.

4. LEGIRNI SUSTAVI

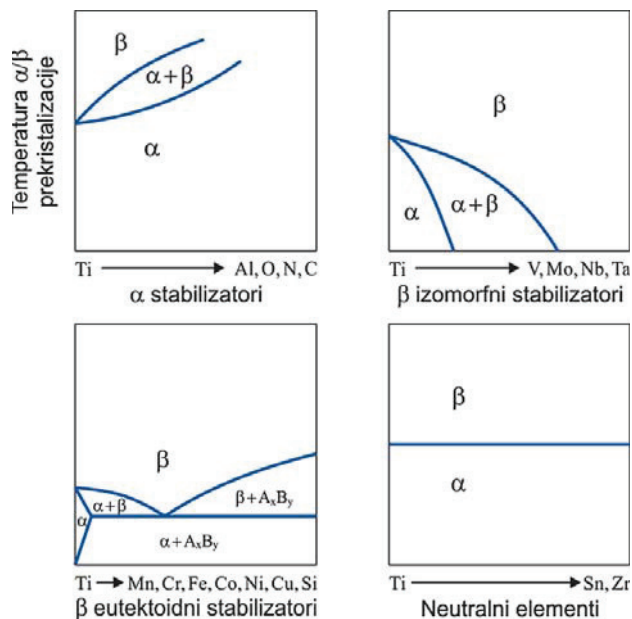
Titan je polimorfan metal koji se javlja u dva kristalna oblika prikazana na slici 5., jedan koji je stabilan pri sobnoj temperaturi s heksagonskom gusto slaganom (HCP) strukturom, a naziva se α , i drugi koji je stabilan na povišenim temperaturama kubične prostorno centrirane (BCC) strukture, poznat kao β . Kod čistog titana α faza je stabilna do temperature 885 °C kada se transformira u β fazu koja ostaje nepromijenjena sve do tališta 1670 °C. Komercijalno čisti titan pretežno sadrži α fazu.



Slika 5. Kristalne strukture čistog titana [3]
Fig. 5. Crystal structures of pure titanium [3]

Međutim, dodatkom legirnih elemenata mijenja se temperatura α/β prekrystalizacije kao i udjeli α i β faze, kako je prikazano slikom 6. Oni elementi koji povišuju temperaturu α/β prekrystalizacije kroz stabilizaciju α faze nazivaju se α stabilizatorima i uključuju Al, O, N, i C. Elementi koji snizuju temperaturu prekrystalizacije i time stabiliziraju β fazu pri nižim temperaturama poznati su kao β stabilizatori. β stabilizatori se dijele na β izomorfne elemente koji imaju visoku topljivost u titanu i β eutektoidne elemente ograničene topljivosti koji formiraju intermetalne spojeve. β izomorfni elementi su: V, Mo, Nb i Ta, dok β eutektoidni elementi uključuju Mn, Cr, Fe, Co, Ni, Cu i Si. Kositar i cirkonij smatraju se neutralnim elementima jer oni niti povećavaju niti snizuju temperaturu α/β prekrystalizacije. No budući da pridonose čvrstoći, česti su legirni dodaci.

Titanove legure općenito klasificiraju se prema sadržaju α i β faze u njihovoj mikrostrukturi na sobnoj tem-



Slika 6. Dijagrami stanja binarnih titanovih legura [3]
Fig. 6. Phase diagrams for binary titanium alloys [3]

Tablica 2. Mehanička svojstva odabranih titanovih legura [1]
Table 2. Mechanical properties of selected titanium alloys [1]

Vrsta legure	Stanje	R_p , MPa	R_m , MPa	E , GPa	A, %	Z, %
α i približno α legure						
TiAl5Sn2,5	žareno	760	790	110,3	16	40
TiAl3V2,5	žareno	517	620	106,9	20	-
TiAl6Sn2Zr4Mo2	žareno	830	900	113,7	15	35
TiAl8Mo1V1	žareno	830	900	124,1	15	28
α+β legure						
TiAl6V4	žareno	830	900	113,7	14	30
	RZD*	1100	1180	113,7	10	25
TiAl6V4 ELI	žareno	760	830	113,7	15	35
TiAl6Sn6V2	žareno	1000	1035	110,3	14	30
	RZD*	1170	1275	110,3	10	20
TiAl6Sn2Zr4Mo6	RZD*	1170	1300	113,7	10	23
TiAl6Sn2Zr2Mo2Cr2	žareno	965	1035	122	-	-
	RZD*	1137	1275	122	11	33
β legure						
TiV10Fe2Al3	RZD*	1100	1170	111,7	10	19
TiV15Al3Cr3Sn3	žareno	770	785	-	22	-
	RZD*	985	1096	-	12	-

*RZD – rastopno žareno i dozrijevano

peraturi. S obzirom na mikrostrukturu razlikuju se: α , približno α , $\alpha+\beta$ i metastabilne β legure. Kako samo ime ukazuje, α legure ne sadrže β fazu, dok približno α legure sadrže uglavnom α fazu uz neznatnu količinu β faze kao rezultat prisutnosti željeza, a ponekad i nekih β stabilizatora. Dvofazne $\alpha+\beta$ legure predstavljaju kompromis između monofaznih α i β legura. One su toplinski očvrstljive i oblikovljive deformiranjem, a mogu se i za-

varivati, iako se pri zavarivanju mogu javiti poteškoće. Metastabilne β legure većinom sadrže β fazu uz tek vrlo malu količinu α faze. β legure se nazivaju metastabilnim jer termodinamički gledano nakon dovoljno dugo vremena β faza će se transformirati u ravnotežne konstituente: α fazu i intermetalni spoj. Međutim, u praksi to nije slučaj tako da se često nazivaju samo β legurama.

Zbog velikog afiniteta titana prema intersticijskim elementima kao što su O i N koji povećavaju čvrstoću, ali snižuju žilavost i lomnu žilavost, skupina titanovih ELI (engl. *Extra Low Interstitial*) legura s niskim sadržajem intersticijskih elemenata posebno je namijenjena lomno kritičnim primjenama.

U tablici 2. prikazuju se komercijalno najvažnije Ti-legure i njihova mehanička svojstva.

4.1. Alfa (α) i približno α legure

Alfa (α) i približno α legure nisu toplinski očvrstljive, otežano su oblikovljive i dobro zavarljive, osrednje su čvrstoće i dobre lomne žilavosti te vrlo dobro postojeane prema puzanju u području temperatura 315 - 590 °C. Budući da ove legure zadržavaju čvrstoću pri povišenim temperaturama i najbolje su otporne puzanju od svih titanovih legura, u pravilu su namijenjene visokotemperaturnim primjenama. Osim toga, α i približno α legure dobro se ponašaju i pri niskim temperaturama zahvaljujući heksagonskoj gusto slaganoj (HCP) strukturi koja jamči žilavost i čvrstoću i pri sniženim temperaturama. Zbog ograničenog broja kliznih sustava HCP rešetke ove legure su relativno slabo hladno oblikovljive. Otpornost na koroziju podjednaka je β i $\alpha+\beta$ legurama.

Ovu skupinu čine legure s aluminijem kao glavnim legirnim elementom koji snažno djeluje na porast čvrstoće. Međutim, sadržaj Al ograničuje se na oko 6 % zbog opasnosti od pojave krhke Ti_3Al intermetalne faze. Jedina prava komercijalno dostupna α legura je $TiAl5Sn2,5$. Glavna su joj obilježja: oksidacijska i korozijska postojanost i odlična svojstva pri niskim temperaturama. Ova legura koristi se već dugi niz godina u kovanom i lijevanom stanju, među ostalim za dijelove zrakoplova i svermirskih letjelica.

Ostale legure su približno α legure sa sadržajem 5 - 8 % Al, uz dodatak Zr i Sn te nekih β stabilizatora koji

uzrokuju pojavu male količine β faze u α matrici. Premda ove legure sadrže β fazu, one su većinom α fazne tako da se više ponašaju kao α nego $\alpha+\beta$ legure. Približno α legure zadržavaju mehaničku otpornost pri povišenim temperaturama i otporne su puzanju tako da se najčešće rabe na povišenim temperaturama.

U približno α legure ubrajaju se $TiAl6Sn2Zr4Mo2$ i $TiAl5,5Sn3,5Zr3Nb1Si0,3$ koje su sposobne izdržati temperature do 540 °C. Legure $TiAl5,8Sn4Zr3,5Nb0,7Mo0,5Si0,35$ i $TiAl6Sn2,8Zr4Mo0,4Si0,4$ izdržavaju i više radne temperature do 590 °C. One se uglavnom primjenjuju za disk kompresora i lopatice plinske turbine zrakoplovnog motora. Legura $TiAl8Mo1V1$ rabi se u primjenama gdje je presudna visoka čvrstoća i niska gustoća te dobra zavarljivost. Od ove legure izrađuju se lopatice ventilatora plinske turbine. $TiAl2,25Sn11Zr5Mo1$ legura koristi se za velike otkivke odnosno sve one primjene koje zahtijevaju otpornost puzanju i visoku čvrstoću.

Ostale α i približno α legure, razvijene za dijelove zrakoplovnog motora imaju dobru kombinaciju vlačne čvrstoće i granice puzanja na temperaturama 370 - 550 °C, kao i zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. To su primjerice legure $TiAl7Zr12$, $TiAl5Sn5Zr5$ i $TiAl7Nb2Ta1$.

Tablica 3. sadrži sastav i svojstva odabranih α i približno α legura titana.

4.2. Alfa+beta ($\alpha+\beta$) legure

Legure ove skupine posjeduju najbolju kombinaciju mehaničkih svojstava i predstavljaju glavni dio proizvodnje titanovih materijala. Nasuprot α i približno α legurama, $\alpha+\beta$ legure mogu se toplinski obraditi do umjerenih visokih čvrstoća, premda nisu sklone očvrstnuću u tolikoj mjeri kao β legure. Općenito, $\alpha+\beta$ legure posjeduju dobru čvrstoću na sobnoj temperaturi i mogu se kratkotrajno izlagati povišenim temperaturama premda nisu otporne na puzanje. Primjenjive su na temperaturama 315 - 400 °C. Oblikovljivost legura ove skupine je bolja nego za α i približno α legure, dok zavarljivost otežava dvofazna mikrostruktura.

Najvažnija $\alpha+\beta$ legura je $TiAl6V4$ koja se proizvodi u količini jednakoj svim ostalim titanovim materijalima uključujući i čisti titan. Ona sadrži 90 %Ti, 6 %Al i 4 %V, pri

Tablica 3. Sastav i svojstva nekih α i približno α legura titana [4]

Table 3. Chemical composition and properties of some α and near α alloys [4]

Vrsta legure	R_p , MPa	R_m , MPa	Maks. sadržaj nečistoća, %					Sadržaj legirnih elemenata, %				
			N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Ostali
TiAl5Sn2,5	760	790	0,05	0,08	0,020	0,50	0,20	5	2,5	-	-	-
TiAl5Sn2,5 ELI	620	690	0,07	0,08	0,0125	0,25	0,12	5	2,5	-	-	-
TiAl8Mo1V1	830	900	0,05	0,08	0,015	0,30	0,12	8	-	-	1	1 V
TiAl6Sn2Zr4Mo2	830	900	0,05	0,05	0,0125	0,25	0,15	6	2	4	2	0,08 Si
TiAl6Nb2Ta1Mo0,8	690	790	0,02	0,03	0,0125	0,12	0,10	6	-	-	1	2 Nb, 1 Ta
TiAl2,25Sn11Zr5Mo1	900	1000	0,04	0,04	0,008	0,12	0,17	2,25	11	5	1	0,2 Si
TiAl5,8Sn4Zr3,5Nb0,7Mo0,5Si0,35	910	1030	0,03	0,08	0,006	0,05	0,15	5,8	4	3,5	0,5	0,7 Nb 0,35 Si

čemu aluminij stabilizira α fazu dok vanadij stabilizira β fazu. Ova legura je razvijena 50-ih godina 20. stoljeća i ima odlična mehanička svojstva te dobru obradljivost i zavarljivost. Zbog tih razloga to je standardna legura s kojom se uspoređuju svi ostali titanovi materijali. Gnječena TiAl6V4 legura često se toplinski obrađuje na jedan od sljedećih načina:

1) **Meko žarenje** (najčešća toplinska obrada). Mekim žarenjem se postiže vlačna čvrstoća od približno 900 MPa, dobra otpornost na umor, osrednja lomna žilavost i umjerena brzina rasta pukotine.

2) **Rekristalizacijsko žarenje** koristi se za dijelove koji zahtijevaju povećanu otpornost na pojavu oštećenja. Njime se neznatno snižuje čvrstoća i dinamička izdržljivost, a povećava lomna žilavost i usporava brzina rasta pukotine.

3) **Betizacijsko žarenje** maksimalno povećava lomnu žilavost i usporava rast pukotine, ali snižuje vrijednost dinamičke izdržljivosti.

4) **Rastopno žarenje i dozrijevanje** osigurava maksimalnu čvrstoću od 1100 MPa i veću.

TiAl6V4 ELI legura, s niskim sadržajem kisika (< 0,13 %), namijenjena je primjenama za lomno kritične elemente te pri sniženim temperaturama. Premda je kisik u ovoj leguri snažan očvršćujući element, on mora ostati u niskim granicama ako se želi zadržati visoka lomna žilavost. Dok komercijalna TiAl6V4 legura sadrži između 0,16 i 0,20 %O, u ELI leguri sadržaj je ograni-

čen na svega 0,10 - 0,13 % O. Zbog toga je komercijalna legura čvršća, ali ELI legura ima znatno bolju lomnu žilavost (za ≈ 25 %). Usporedbu svojstava komercijalne i ELI TiAl6V4 legure ilustrira *slika 7*.

Sadržaj kisika također utječe i na temperaturu α/β prekrystalizacije tako da se kod komercijalne TiAl6V4 legure ova transformacija zbiva između 1010 i 1020 °C, a kod ELI legure na temperaturama 960 – 980 °C.

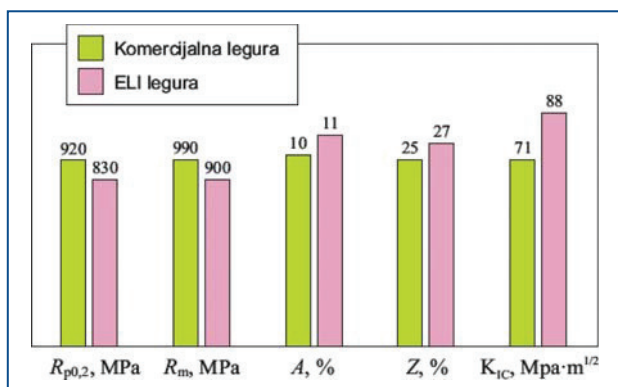
TiAl4,5V3Mo2Fe2 legura razvijena je zbog dobre oblikovljivosti pri nižim temperaturama. Ona se oblikuje već pri 700 °C, dok se standardna TiAl6V4 legura oblikuje pri 900 °C. Time se smanjuje potrošnja energije, produljuje životni vijek i smanjuje debljina površinskog α sloja bogatog kisikom. Izrazito krhka α prevlaka znatno skraćuje vijek trajanja u uvjetima dinamičkog opterećenja.

Legure TiAl6Sn6V2, TiAl6Sn2Zr4Mo6, TiAl5Sn2Zr2Mo4Cr4 i TiAl6Sn2Zr2Mo2Cr2 specijalno su razvijene za dijelove koji zahtijevaju čvrstoću višu od one za TiAl6V4 leguru.

U *tablici 4*. navedene su neke $\alpha+\beta$ legure s pripadajućim svojstvima.

4.3. Beta (β) legure

Metastabilne β legure, bogate β stabilizatorima, sadrže visok udjel β faze prostorno centrirane kubične rešetke. Time se znatno povećava njihova osjetljivost na toplinsku obradu, postiže bolja duktilnost i žilavost u žarenom stanju te znatno bolja oblikovljivost. Neke legure ove skupine mogu se oblikovati i na sobnoj temperaturi. β legure su općenito dobro prokaljive, visoke lomne žilavosti i dobre otpornosti rastu pukotine, ali su ograničeno primjenjive pri povišenim temperaturama jer su sklone puzanju. Budući da su to metastabilne legure koje pri povišenim temperaturama započinju precipitirati α fazu, one su neprikladne za visokotemperaturne primjene bez prethodne stabilizacije. Gornja temperatura primjene je oko 370 °C. Nasuprot monofaznim α legurama, β legure mogu postići visoku čvrstoću toplinskom obradom, naročito u hladno očvršnutom stanju. Toplinsko očvršnuće se ostvaruje rastopnim žarenjem i dozrijevanjem kada precipitiraju α čestice koje djeluju izrazito očvršćujuće. Time se postižu visoke vrijednosti specifične čvrstoće, unatoč povišenoj gustoći zbog sadržaja Cr, Mo, V i Nb, teških metala više gustoće, koji se



Slika 7. Svojstva komercijalne i ELI TiAl6V4 legure [1]

Fig. 7. Properties of commercial and ELI TiAl6V4 alloy [1]

Tablica 4. Sastav i svojstva nekih $\alpha+\beta$ legura titana [4]

Table 4. Chemical composition and properties of some $\alpha+\beta$ alloys [4]

Vrsta legure	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	Maks. sadržaj nečistoća, %					Sadržaj legirnih elemenata, %				
			N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Ostali
TiAl6V4	830	900	0,05	0,10	0,0125	0,30	0,20	6	-	-	-	4 V
TiAl6V4 ELI	760	830	0,05	0,08	0,0125	0,25	0,13	6	-	-	-	4 V
TiAl6V6Sn2	970	1030	0,04	0,05	0,015	1,0	0,20	6	2	-	-	0,75 Cu, 6 V
TiAl6Sn2Zr4Mo6	1100	1170	0,04	0,04	0,0125	0,25	0,15	6	2	4	6	-
TiAl5Sn2Zr2Mo4Cr4	1055	1125	0,04	0,05	0,0125	0,3	0,13	5	2	2	4	4 Cr
TiAl6Sn2Zr2Mo2Cr2	965	1035	0,03	0,05	0,0125	0,25	0,14	5,7	2	2	2	2 Cr, 0,25 Si
TiAl3V2,5	520	620	0,015	0,05	0,015	0,30	0,12	3	-	-	-	2,5 V
TiAl4Mo4Sn2Si0,5	960	1100	0,04	0,02	0,0125	0,20	0,14	4	2	-	4	0,5 Si

Tablica 5. Sastav i svojstva nekih β legura titana [4]Table 5. Chemical composition and properties of some β alloys [4]

Vrsta legure	R_e , MPa	R_m , MPa	Maks. sadržaj nečistoća, %					Sadržaj legirnih elemenata, %				
			N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Ostali
TiV10Fe2Al3	1100	1170	0,05	0,05	0,015	2,5	0,16	3	-	-	-	10 V
TiAl3V8Cr6Mo4Zr4	830	900	0,03	0,05	0,020	0,25	0,12	3	-	4	4	6 Cr, 8 V
TiV15Al3Cr3Sn3	985	1096	0,05	0,05	0,015	0,25	0,13	3	3	-	-	15 V, 3 Cr
TiMo15Al3Nb2,7Si0,25	793	862	0,05	0,05	0,015	0,25	0,13	3	-	-	15	2,7 Nb, 0,25 Si

dodaju radi stabilizacije β faze na sobnoj temperaturi. Iako je žilavost u rastopno žarenom i dozrijevanom stanju snižena, lomna žilavost precipitacijski očvrstnutih β legura u pravilu je veća od istovjetno očvrstnutih $\alpha+\beta$ legura podjednake čvrstoće.

β -legure poput TiV10Fe2Al3, TiV15Al3Cr3Sn3 i TiMo15Al3Nb2,7Si0,25 spadaju u skupinu visokočvrstih legura s čvrstoćom do 1380 MPa za rastopno žareno i dozrijevano stanje. Unatoč visokoj čvrstoći legure su otporne na napetosnu koroziju. Međutim, njihova dinamička izdržljivost varira tako da je TiV10Fe2Al3 legura otporna na umor dok je TiV15Al3Cr3Sn3 lošija u tom pogledu. Legura TiMo15Al3Nb2,7Si0,25 razvijena je radi oksidacijske postojanosti pri visokim temperaturama (do 650 °C) i namijenjena je izradi metalnih matrica visokotemperaturnih kompozita. Mada je to β legura, ona ima prihvatljivu otpornost na puzanje, bolju nego TiAl6V4 legura.

Jedna od čestih β legura je i TiV13Cr11Al3 s čvrstoćom od 1820 MPa u rastopno žarenom, hladno oblikovanom i dozrijevanom stanju. Ova legura posjeduje dobru duktilnost i visoki omjer čvrstoće i gustoće, a može se i zavarivati. Do 300 °C zadržava velik dio svoje čvrstoće, ali duljim izlaganjem iznad 320 °C postupno gubi mehaničku otpornost.

Toplinski obrađena TiAl3V8Cr6Mo4Zr4 legura često se rabi za opružne primjene kao i TiV15Al3Cr3Sn3 legura koja se može hladno oblikovati u tanke izratke nakon čega se dozrijeva do visokih čvrstoća.

Razvijen je i niz drugih β legura specifičnih svojstava s povećanom stabilnošću pri povišenim temperaturama (TiV8Fe5Al1) i povećanom otpornošću na napetosnu koroziju (TiMo12Sn6).

Sastav i svojstva važnijih β legura prikazani su u tablici 5.

(Nastavak u sljedećem broju)



ZAVOD ZA ZAVARIVANJE I TOPLINSKU TEHNOLOGIJU d.o.o.

HRVATSKA, 10000 ZAGREB, Ulica grada Vukovara 68 (Pučko otvoreno učilište), tel.: 6119-882, faks: 6119-883

PODRUČJA DJELATNOSTI

1. TEČAJEVI ZA ZAVARIVAČE I REZAČE

- RUČNO ELEKTROLUČNO (REL), početni - napredni
- PLINSKO (autogeno), početni - napredni
- TIG (u zaštitnoj atmosferi argona)
- MIG (u zaštitnoj atmosferi argona)
- MAG (u zaštitnoj atmosferi CO₂)
- plinsko rezanje

2. PROVJERA STRUČNE OSPOSOBLJENOSTI ZAVARIVAČA (ATESTIRANJE) prema HRN, DIN, API, ASME, EN i drugim međunarodno važećim standardima i to u ZAVODU ili kod NARUČITELJA

- kontrola ultrazvukom
- radiografska kontrola X i gama zrakama
- kontrola pukotina i propusnosti penetrantskim metodama
- kontrola nepropusnosti zavara na posudama vakumiranjem

3. KONTROLA BEZ RAZARANJA

- kontrola ultrazvukom
- radiografska kontrola X i gama zrakama
- kontrola pukotina i propusnosti penetrantskim metodama
- kontrola nepropusnosti zavara na posudama vakumiranjem

- mjerenje debljine stijenke posuda i cjevovoda u eksploataciji
- kontrola antikorozijske zaštite
- kontrola hidroizolacije visokim naponom

4. TOPLINSKA OBRADA PRIJE I POSLIJE ZAVARIVANJA

- predgrijavanje
- odžarivanje
- normalizacija

5. REPARATurna ZAVARIVANJA

6. NADZOR I TEHNOLOGIJA

- izrada plana zavarivanja
- izrada plana kontrole zavarivanja
- izrada tehnoloških postupaka
- ispitivanje posuda pod tlakom
- periodično ispitivanje u tijeku eksploatacije
- nadzor izrade i montaže zavarenih konstrukcija
- atestacija postupka zavarivanja

Zavod za zavarivanje osnovalo je Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske 13. 05. 1967.

Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja u suradnji s Katedrom za zavarene konstrukcije FSB-a u Zagrebu

objavilo je novi priručnik:

LASERSKA TEHNIKA (autori: Kožuh/ Kralj/ Misir)

Priručnik se može naručiti na adresi: I. Lučića 1, 10000 Zagreb, ili fax: ++385 1 6157 108, ili e-mail: hdtz.cws@fsb.hr