

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 527/2015

Тамара З. Панић

Заварљивост титана и његових легура

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- наведе најважнија својства титана и његове предности и мане,
- детаљно опише методе добијања чистог титана,
- опише најважније легуре титана и могућности поправљања најважнијих својстава (јачине, пластичности, термостойкости, ватроотпорности и тсл.)
- процени заварљивост титана и његових легура,
- укаже и укратко објасни најважније методе спајања титана и његових легура и
- наведе најважније области примене титана и његових легура.

Препоручена литература:

- [1] Јовановић Милорад, Лазић Вукић, Арсић Душан, *Наука о материјалима*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [2] Јовановић Милорад, Адамовић Драган, Лазић Вукић, Ратковић Нада, *Машински материјали*, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [3] Јовановић Милорад, Лазић Вукић, *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.

Ментор:

Крагујевац, 2020. године

Проф. др Вукић Лазић

Abstract:

This workpoint out the most important properties of the titanium (physical, chemical, mechanical, technological), its main advantages as well as detail description of its complex production process. Also, in this work is given the weldability assessment of titanium and its alloys, the most important welding methods and the possible welding defects that may occur. In the and, the examples of application of the titanium and its alloys are given.

Key words: titanium, titanium production, titanium alloys, weldability of titanium, titanium applications

Резиме:

У овом раду наводе се најважнија својства титана (физичка, хемијска, механичка, технолошка), указује на предности и мане и детаљно описују сложени поступци његовог добијања. Процењује се заварљивост титана и његових легура, описују најважније методе заваривања и указује на могуће грешке при спајању заваривањем. Наводе се примери примене овог веома значајног метала и његових легура.

Кључне речи: титан, добијање титана, титанове легуре, заварљивост титана, примена титана

Садржај

1. УВОД	1
2. ДОБИЈАЊЕ ТИТАНА.....	2
2.1. Кролов поступак	2
2.1.1 Хлоровање и пречишћавање титанове руде	4
2.1.2 Редукција и вакуумска сепарација	5
2.1.3 Електролиза магнезијум-хлорида (MgCl_2)	5
2.1.4 Дробљење и димензионирање компактног сунђерастог титана.....	6
2.2. Хантеров поступак.....	7
2.3 "FFC Cambridge" поступак.....	9
3. ТИТАН И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ.....	11
3.1 Титан	11
3.2 Легуре титана	14
3.2.1 Легуре типа α -Ti.....	16
3.2.2 Легуре типа β -Ti.....	18
3.2.3 Легуре типа $(\alpha+\beta)$ -Ti.....	21
4. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ТИТАНА И ЊЕГОВИХ ЛЕГУРА.....	23
4.1 Појам и дефиниција заварљивости	23
4.2 Методе за испитивање заварљивости	27
4.2 Оцена заварљивости титана и његових легура	28
4.2.1 Заваривање титана и његових легура.....	28
4.2.2 Утицај унете топлоте при заваривању на микроструктуру легура	31
5. МЕТОДИ ЗАВАРИВАЊА ТИТАНА И ЊЕГОВИХ ЛЕГУРА.....	34
5.1 ТИГ заваривање	34
5.2 МИГ заваривање	38
5.3 Заваривање електронским снопом	41
5.4 Грешке при заваривању титана	42
5.4.1 Прслине (пукотине)	42
5.4.2 Повећање кртости услед интерстицијског растварања водоника	43
5.4.2 Поре.....	43
6. ПРИМЕНА ТИТАНА	44
7. ЗАКЉУЧАК	48
8. ЛИТЕРАТУРА	49

1. УВОД

Титан је метал мале густине из групе лаксих обојених метала. Добија се из својих бројних руда, сложеним и дуготрајним поступком који се своди на грубо пречишћавање, дробљење, млевење руде и одстрањивање једињења која не садрже титан. Примена титана и његових легура је ограничена због високе цене и своди се на радне делове гасних мотора и турбина, као и на опрему у прехранбеној, хемијској и петрохемијској индустрији. Титан и легуре титана имају веома добре механичке особине, ниску електричну и термичку проводљивост, као и одличну отпорност на корозију. Титан је условно лак метал (4.5 g/cm^3), тежи је од алуминијума, али је 1,7 пута лакши од челика. Употребљава се у облику полупроизвода, као што су отковци, шипке, лимови или плоче. Заступљен је у Земљиној кори у облику минерала: титанита, рутила и илменита. У природи се сматра ретким елементом, десетим по заступљености. Природно пронађени оксиди се ископавају у рудницима, а служе и као комерцијални извор титана.

Титан је хемијски елемент са симболом Ti и атомским бројем 22. То је метал сребрнасте боје. Открио га је Вилијам Грегор, енглески минералог, 1791. године у Кронволу, испитивајући црни песак у притоци реке Манакан. Нови елемент назван је тада манакенит. Титан је поново откривен 1795. године, од стране немачког хемичара Клапорта. Он је испитивајући минерал рутил установио да тај минерал представља оксид новог елемента, који је тада назван титан, по Титанима из грчке митологије. Током Другог светског рата порастао је интерес за титаном као врло важним конструкционим материјалом. Тада је почело усавршавање поступака за добијање једињења, легура и чистог метала. Титан је тада почео да се користи претежно у војне сврхе. Препознавши то, влада САД је титан сматрала стратешким материјалом, па су зато складиштили његове огромне залихе. Научници су установили да при додавању једињења титана у погонска горива долази до стварања слојева отпорних на хабање, па се може користити на површинама осетљивих делова мотора. На тај начин би могао заменити ранија једињења која су штетна по околину. Он је један од главних потенцијалних елемената за замену отровних једињења фосфора, која се налази у већини погонских горива и мазива.

Најчешће области примене титана су скелети авиона, јер се титан одликује изузетно високим односом јачине према тежини (R_m/ρ – специфична јачина). Ова особина титана, заједно са његовом изузетно високом отпорношћу према корозији у морској води, чини га применљивим за израду морских пловних средстава. Титан и његове легуре су нашле примену у медицини (стоматологији, ортопедији и тсл.) због њихове изузетне биокомпатибилности, специфичне јачине, добре отпорности према корозији.

2. ДОБИЈАЊЕ ТИТАНА

Процеси који су тренутно познати за издвајање титана из његових руда су веома скупи и захтевају дуг и мукотрпан рад. Чист титан (99,9% чистоће) први је добио Матју Хантер 1910. године тако што је загревао TiCl_4 са додатком натријума при температури од 700–800°C. На тај начин је добијен поступак који се назива Хантеров процес. Вилијам Крол је 1932. године показао да се титан може произвести редукцијом титан-тетрахлорида (TiCl_4) у комбинацији са калцијумом. Осам година касније, он је побољшао тај процес, тако што је користио магнезијум или чак калијум, па је тај процес по њему и добио име Кролов процес. Иако су настављена истраживања о ефикаснијим и јефтнијим процесима (као што су Кембриц, Армстронгов процес и др), Кролов процес се и до данашњих дана користи за комерцијалну производњу овог метала.

2.1. Кролов поступак

Кролов поступак је савремени индустријски процес који се користи за производњу титана из титан-тетрахлорида (TiCl_4). Сложеност производње Кроловог процеса објашњава његову високу тржишну цену.

На слици 2.1 приказан је ток Кроловог процеса, који се састоји из четири фазе:

1. Хлоровање и пречишћавање титанове руде

Сировине се хлорују и дестилишу да би се произвео чист титан-тетрахлорид (TiCl_4)

2. Редукција и вакуумска сепарација

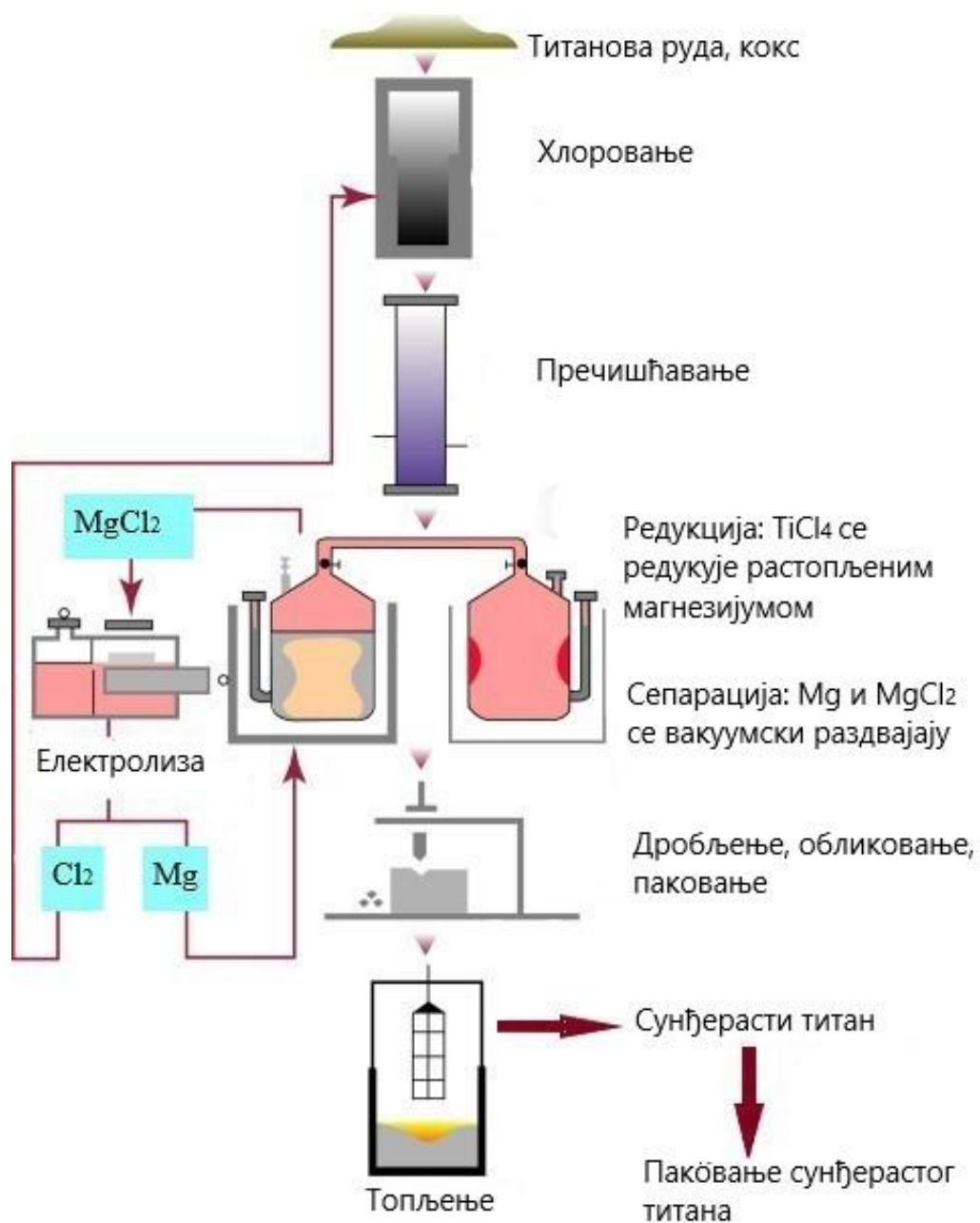
Чист титан-тетрахлорид (TiCl_4) је редукован уз помоћ течног магнезијума да би се добио титанов сунђер. Затим се доводи у вакуум ради уклањања заосталог магнезијума и магнезијум-хлорида (MgCl_2) из титановог сунђера.

3. Електролиза магнезијум-хлорида (MgCl_2)

Магнезијум-хлорид (MgCl_2) који је нуспроизвод реакције, разлаже се у гасове магнезијума и хлора. Ови гасови магнезијума и хлора се поново користе у процесима редукције, као и при процесу хлоровања.

4. Дробљење и обликовање згрудваног титановог сунђера

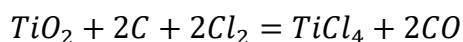
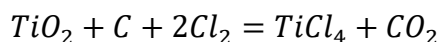
Згрудван титанов сунђер дроби се машином за сечење и дробилицом. Затим се згњечени титан меша и пакује у компактну целину облика ваљка.



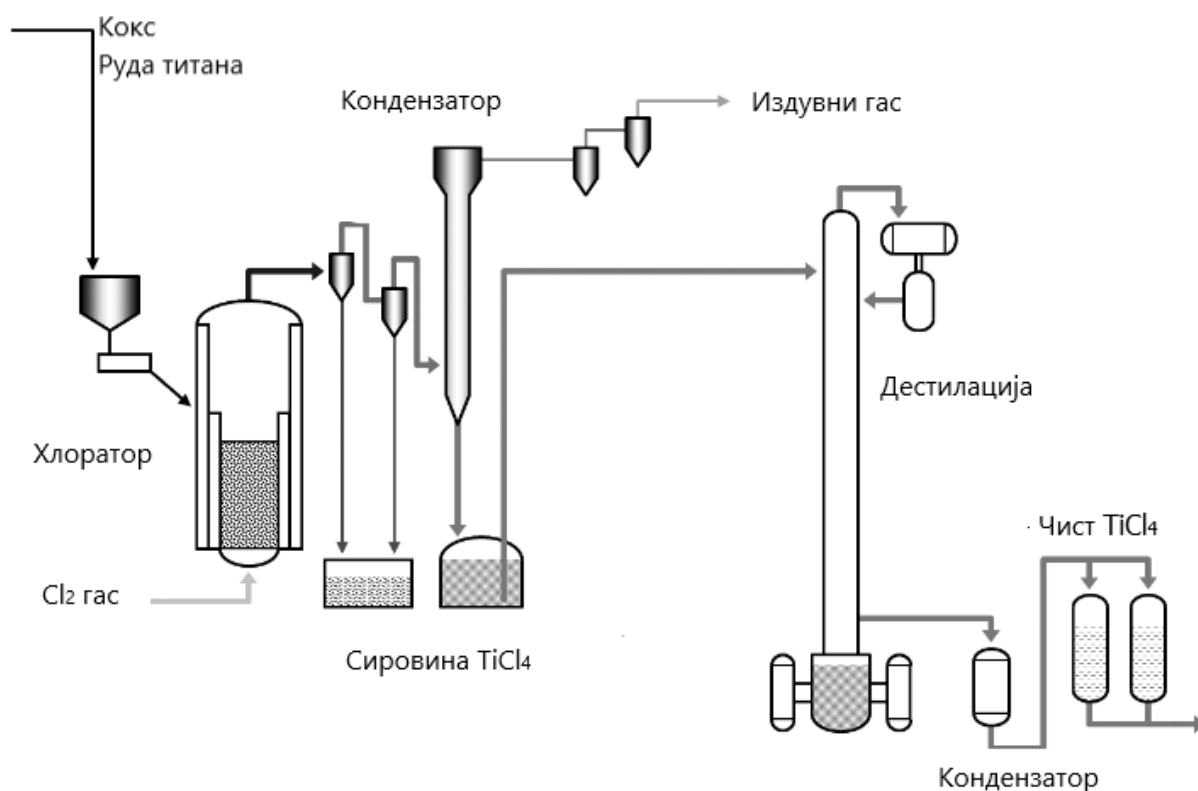
Слика 2.1 Схема Кроловог процеса [5]

2.1.1 Хлоровање и пречишћавање титанове руде

На слици 2.2 дат је схематски приказ процеса настанка $TiCl_4$. Руда титана и кокс уносе се у пећ за хлоровање (хлоратор). Гас хлора се удувава у пећ за хлоровање. Хлоровање се изводи према следећој реакцији:



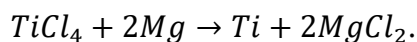
Кисеоник се уклања из руде титана и везује се са хлором формирајући сирови $TiCl_4$. Затим се сирови $TiCl_4$ дестилује да би се уклониле присутне нечистоће. Титан мора да поседује чистоћу од 99,99%. Велики део трошкова производње одлази на сировине. Због тога су ефикасно унапређене технологије које користе и сировине средње и ниже класе, да би се смањили трошкови за набавку материјала. Новије технологије за сортирање и мешање сировина и стабилизацију рада хлоратора омогућавају да се користи 70% сировина средње и лоше класе, а притом се значајније не погоршава квалитет.



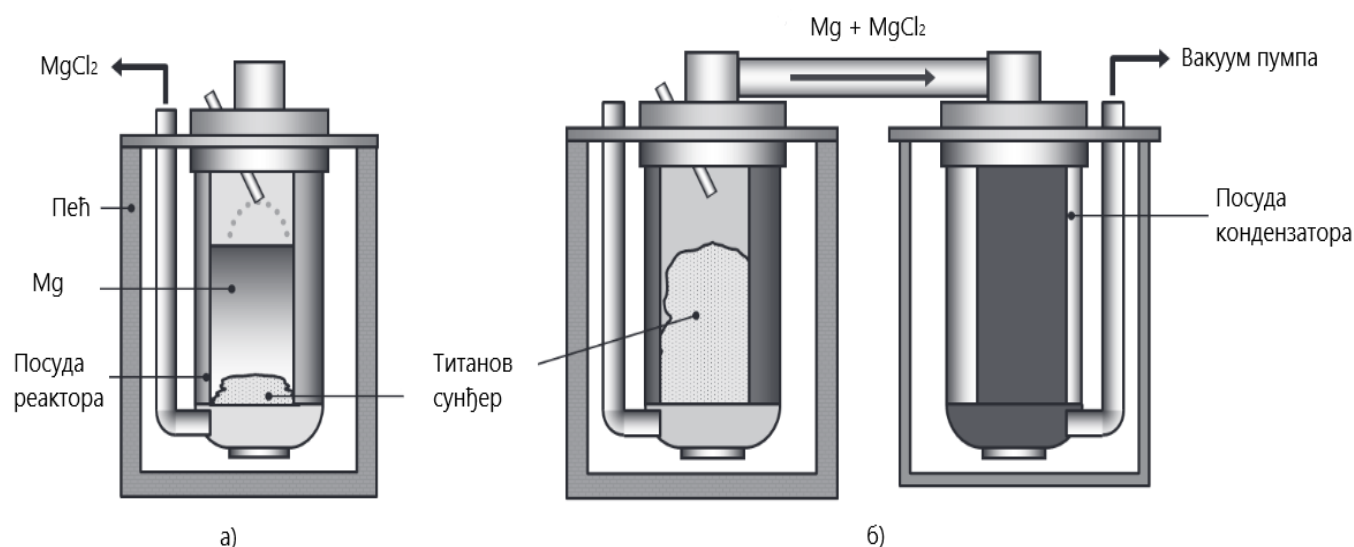
Слика 2.2 Процес производње титан-тетрахлорида ($TiCl_4$) [6]

2.1.2 Редукција и вакуумска сепарација

На слици 2.3 приказан је процес редукције и вакуумске сепарације. После додавања растопљеног магнезијума у посуду, течни $TiCl_4$ се доводи у посуду и настаје реакција за добијање титановог сунђера.



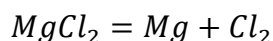
Магнезијум-хлорид ($MgCl_2$), који настаје као споредни производ, се таложи на дну посуде због веће густине, а уклања се под притиском инертног гаса аргона. После завршетка редукције, започиње вакуумско одстрањивање. Посуда се греје са спољне стране електричним грејачем. Унутар посуде се ствара зона вакуума. Као резултат тога, магнезијум-хлорид ($MgCl_2$) и магнезијум, који остају у титановом сунђеру, испаравају и добија се сунђерасти титан високе чистоће. Посуда кондензатора поново се користи за следећу редукцију.



Слика 2.3 Процес редукције и вакуумске сепарације: а) процес редукције и б) процес вакуумске сепарације [6]

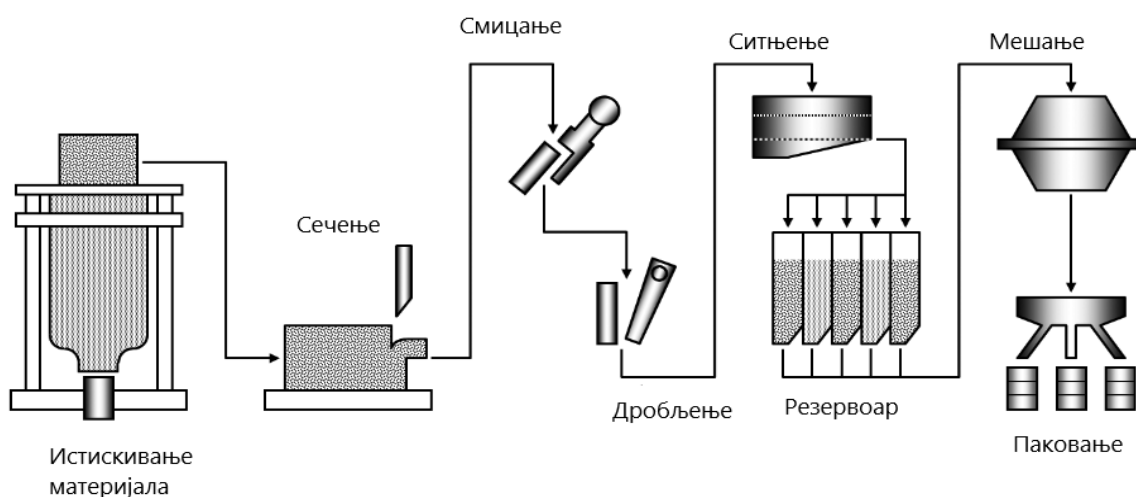
2.1.3 Електролиза магнезијум-хлорида ($MgCl_2$)

У овом процесу, магнезијум-хлорид који је настао у процесу редукције електролитички се разлаже на хлор и магнезијум. Хлор се враћа у процес хлоровања и дестилације, а магнезијум се враћа у поступак редукције и вакуумског одвајања ради поновног коришћења.



2.1.4 Дробљење и димензионирање компактног сунђерастог титана

На слици 2.4 приказује се поступак дробљења, обликовања, ситњења и мешања/паковања. Сунђераст титан се истискује из посуде и дроби на мање комадиће помоћу секача и дробилце. Потом се одређују димензије и пакује у бубњеве.



Слика 2.4 Дробљење, обликовање и сунђерастог титана [6]

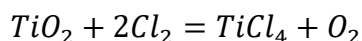
На слици 2.5 приказан је изглед сунђерастог титана.



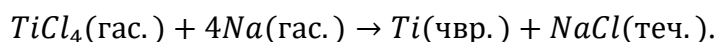
Слика 2.5 Изглед сунђерастог титана добијеног Кроловим поступком [7]

2.2. Хантеров поступак

Хантеров процес се користи за пречишћавање титана натријумом. Био је веома успешан до четрдесетих година прошлог века, када је процес изгубио ширу примену увођењем Кроловог процеса који је још и знатно јефтинији. Да би започео Хантеров процес, кокс, титан-диоксид (TiO_2) и хлор морају да се сједине и загреју. Они се загревају, тако да долази до хемијске реакције која ствара титан-тетрахлорид (TiCl_4). У овој реакцији, титан-диоксид (TiO_2) и хлор се мешају, а кокс је потребан као извор угљеника да би настала ова реакција. Титан-диоксид (TiO_2) реагује са хлором према реакцији:



Иако је титан-тетрахлорид по чистоћи ближи чистом титану него титан-диоксиду, он је још увек далеко од чистог метала. После почетне реакције, натријум се додаје титан-тетрахлориду (TiCl_4) и они се загревају на температури од 1000°C , при чему настаје реакција.



То омогућава натријуму да делује на TiCl_4 и обезбеди одвијање реакције. После хлађења метала, елемент који је добијен је скоро чист титан. Просечна оцена чистоће је 99,9%, што се по многим стандардима сматра чистим титаном. То настаје тако што натријум може да неутралише све елементе који се везују за TiCl_4 издвајајући само чист титан.

Код Хантеровог процеса титан се лепи за унутрашње зидове реактора у знатно мањој количини него при Кроловом процесу. Ниво контаминације гвожђем и другим елементима је релативно низак. Титан се испира разблаженом хлороводовичном киселином, у циљу уклањања NaCl и осталих трагова натријума.

Када је први пут откривен титан, он није могао да се користи као чиста супстанца из веома важног разлога: никада није био чист. Као и многи други елементи, титан је готово увек хемијски везан за друге елементе у облику сложених једињења, да би био чист елемент. Хантеровим процесом је први пут могао да се произведе чист титан. Овај поступак је био зачетник свих новијих начина за добијање титана.

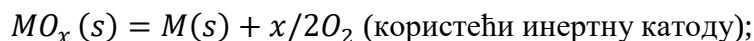
Један од главних проблема Хантеровог процеса је тај што је релативно скуп, посебно у поређењу са Кроловим процесом. Иако се Хантеров поступак ретко користи, сматра се једном од најбољих метода за добијање титана, па и даље проналази употребу. Првенствено се користи када произвођач треба да добије титан највеће чистоће и када је титан везан за превише других елемената, да би могао да се очисти било којим другим поступком.

Табела 1. Разлике између Кроловог и Хантеровог процеса

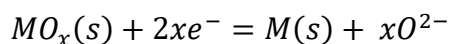
Параметри	Реактант	Температура	Стање реактанта	Тип производа
Кролов процес	Магнезијум (Mg)	800°C	Течно	Титанов прах
Хантеров процес	Натријум (Na)	1000°C	Гасовито	Титанов кристал

2.3 "FFC Cambridge" поступак

Кембриџ поступак сложеним металуршким процесом екстрактује титан из чврстих оксида уз нешто мању потрошњу енергије електрохемијским дејством растопљених соли. Претпоставке су да ће овај поступак надмашити Кролов процес. Овај процес развили су Џорџ Чен (*G. Chen*), Дерек Фрај (*D. Fray*) и Том Фертинг (*T. Farthing*) 1996. године на Кембриџу. Ознака FFC у називу потиче од њихових презимена. Они су солима редуковали присуство оксида у титану. Процес се обично одвија између 900°C и 1100°C, са анодом и катодом у кади растопљеног CaCl₂ (калцијум-хлорид). Овај поступак је први пут изведен електро-редукцијом TiO₂ у чисти титан у растопљеном калцијум-хлориду (CaCl₂), а сада се примењује за смањење разних металних једињења, посебно оксида, на њихове одговарајуће метале, легуре и интерметална једињења. У току поступка, претходно формирано једињење се везује за катоду које се затим таложи на аноди под ћелијским напоном који је довољно висок да јонизује кисеоник у металном једињењу без разлагања електролита. Кембриџ поступак се може представити следећим реакцијама, где М представља метал:



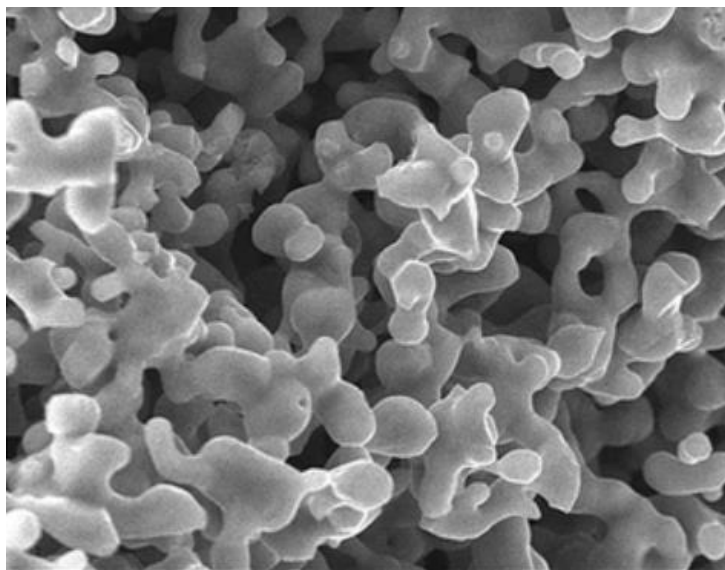
Реакција на катоди:



Реакција на аноди:

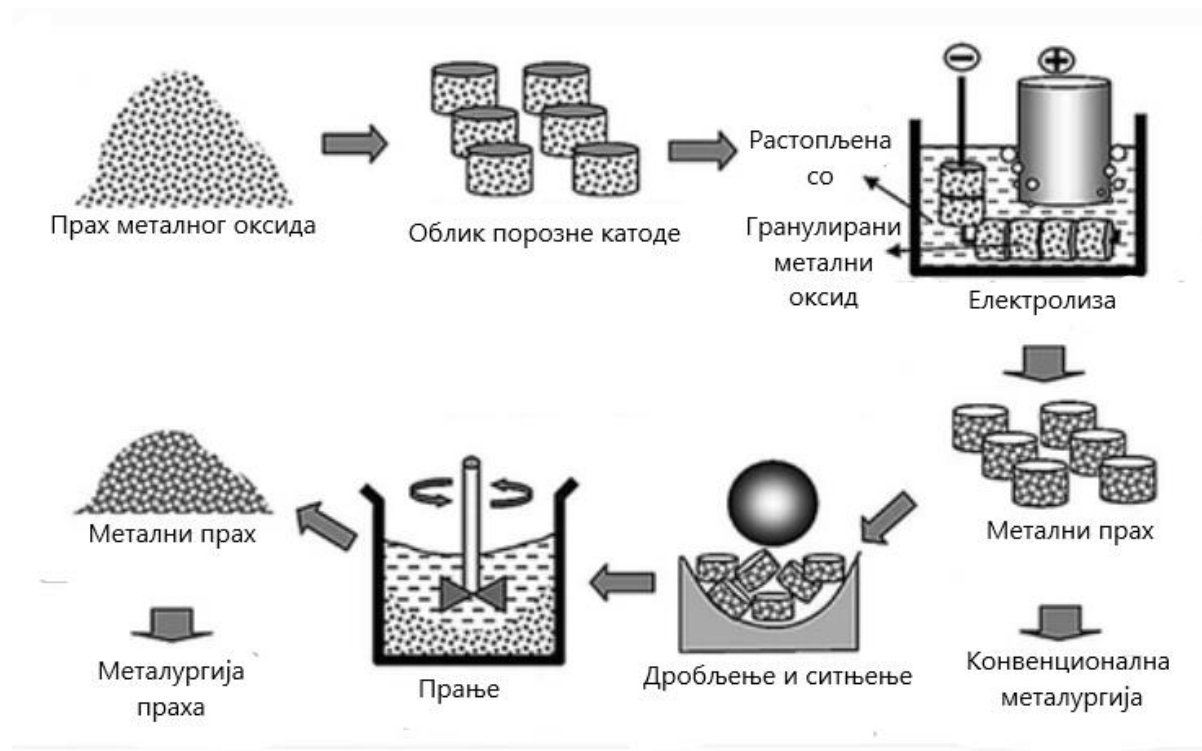


Изглед микроструктуре узорка титана произведеног "FFC Cambridge" поступком.



Слика 2.6 Микроструктура узорка титана произведеног Кембриџ поступком у лабораторијским условима [8]

Овај поступак (сл. 2.7) за производњу титана користи TiO_2 као сировину, што је сигурније за руковање и транспорт од TiCl_4 који се користи у Кроловом процесу. Иако је цена TiO_2 обично двострука већа од оне за TiCl_4 , за добијање 1 kg титана потребно је само 1.66 kg TiO_2 , док је за исту количину потребно 4 kg TiCl_4 . Међутим, пигментни ниво TiO_2 се производи или хлоридним или сулфатним поступком и оба изазивају загађење животне средине.



Слика 2.7 Схема Кембриџ процеса [9]

При производњи TiCl_4 , процес карбохлоровања користи опасне хемикалије и знатне количине енергије и емитује угљене оксиде. Кембриџ поступком је 2006. године показано да се титан, са мало металних нечистоћа, може екстрактовати директно из титанове прашине (сакупљене са пода пећи у постројењу за прераду титана) и метатитанске киселине (у чврстом стању). Употреба ових јефтиних сировина може умањити утицај на животну средину и због тога су се наставила даља истраживања. Шљака богата титаном, синтетичка и природна илменитна руда која садржи Fe, Si, Mg, Ca, Mn, Al, Fe, такође се успешно редукује у феро-титанове легуре.¹ У новије време, Кембриџ поступком се производе јефтиније и нове легуре титана директно из синтетичког рутила или од природне руде рутила.

¹ Феро-титан је легура гвожђа и титана са између 10–20% Fe и 45–75% Ti, а понекад и са малом количином угљеника. Користи се у производњи челика као средство за чишћење гвожђа и челика.

3. ТИТАН И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

3.1 Титан

Као што је у првом поглављу споменуто титан је полиморфан метал беле сребрнасте боје који има две алотропске модификације: α -титан постојан до 882°C (има густо паковану хексагоналну решетку А3) и β -титан постојан од 882-1665°C, тј. до температуре топљења титана (β -титан има просторно центрирану кубну решетку А2).

Титан је лак метал (4.505 g/cm³) који има добре механичке особине, велику отпорност према корозији и слабу електричну и термичку проводност. Чист титан је парамагнетичан и одликује се dobrим својствима деформације па спада у ковне метале.

Физичке, механичке и технолошке особине титана дате су у табели 3.1.

Табела 3.1 Особине технички чистог Ti (Ti 99.5) у жареном стању при температури 20°C

МЕХАНИЧКЕ ОСОБИНЕ		
Техничка граница течења	R _{p0.2} , МПа	200-260
Затезна јачина	R _m , МПа	300-400
Издужење	A _{5.65} , %	40-30
Контракција	Z, %	60-50
Модул еластичности	E, МПа	112000
Тврдоћа	HBS	90-120
ТЕХНОЛОШКЕ ОСОБИНЕ		
Обрадивост на хладно	добра	
Обрадивост на топло	веома добра	
Ливкост	отежана	
Заварљивост	веома добра, условна	
Обрадивост резањем	отежана	

Интерстицијске чврсте растворе са титаном образују Н, С, N и О; њиховим презасићењем добијају се крпе интермедијарне (прелазне) фазе (хидриди, карбиди, нитриди, оксиди). Примесе (Н, С, N) повећавају јачину титана, док му умањују жилавост и отпорност на корозију, отежавају обраду деформисањем и заваривањем. Зато су Н, С, N штетне примесе, а мале количине кисеоника се понекад и намерно уводе ради повећања јачине.

Технички титан се испоручује купцима у облику плоча, лимова, цеви, шипки, жица и других полуфабриката.

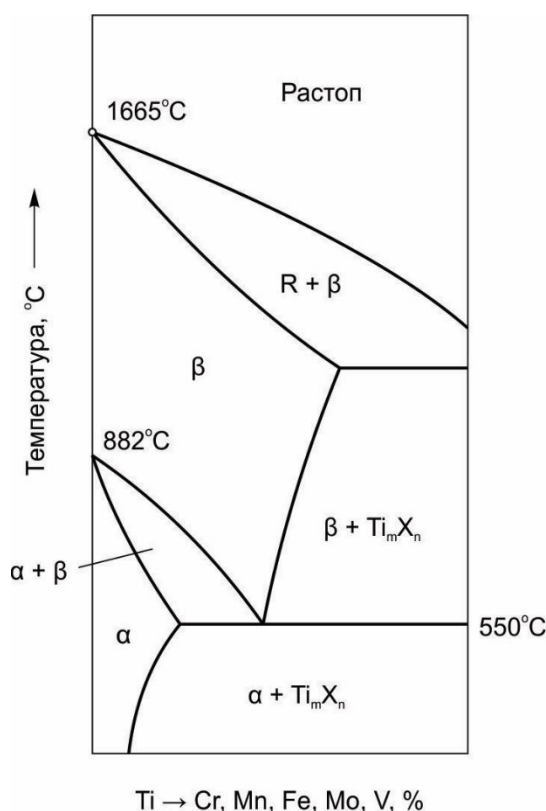
Отпорност титана према корозији у индустријским зонама и у морској води превазилази нерђајуће челике. У овим корозивним срединама, површине титанских предмета подлежу пасивизацији, што даје веома добру отпорност у оксидационим

средионама (нпр. у 70% HNO_3 до 200°C) па чак и у царској води ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$). У органским киселинама, хлорисаним органским једињењима и алкалним растворима, титан је отпоран на корозију и при повишеним температурама, али не и на концентровану сону киселину, концентровану сумпорну киселину, фосфорну киселину и јаке алкалије средње и велике концентрације.

Титан и његове легуре на $T > 500^\circ\text{C}$ лако апсорбују гасове O_2 , N_2 , H_2 што може изазвати порозност и кртост (водоничну кртост).

Пластичном обрадом титана на хладно настаје деформационо ојачање тако да се максимална јачина ($R_m \approx 800 \text{ MPa}$) достиже, зависно од садржаја примеса, већ при малим степенима деформације (око 7%). На хладно се добро прерађују само танки лимови, док је лимове дебљине око 2 mm потребно загрејати на 300 до 400°C ; вучење шипки, жица и цеви је отежано. Деформационо ојачан титан рекристалише се и омекшава после једносатног жарења при температури 650 до 800°C .

Титан се прерађује на топло у интервалу $800\text{--}950^\circ\text{C}$, где структура може бити ($\alpha + \beta$) или β (према хемијском саставу, (сл. 3.1); добро се ваља и кује, док се при екструзији на око 900°C повремено приварује за алат (екструдер).



Слика 3.1 Бинарни равнотежни дијаграм легура титана и Cr, Mn, ...V [2]

На високим температурама титан се лако хемијски сједињује са кисеоником и азотом. И поред тога се при преради не користи заштитна атмосфера, већ је економичније да се после прераде на топло, танке оксидне и нитриране скраме механички одстране.

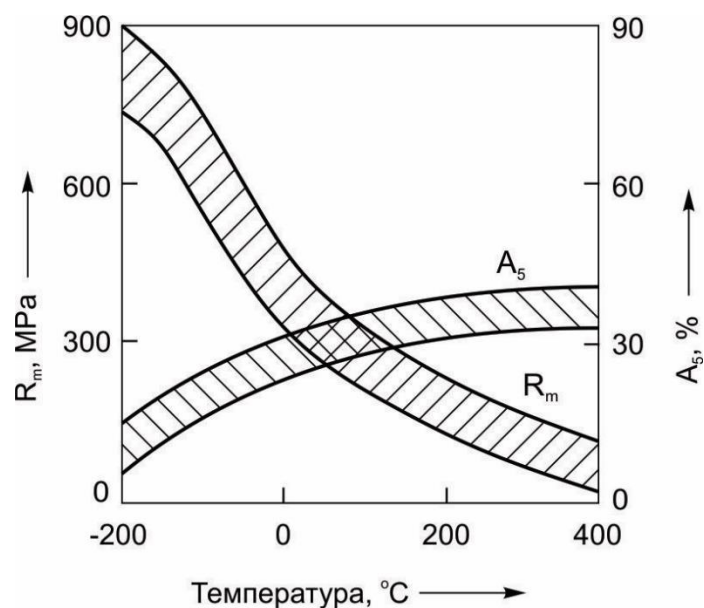
Термичка обрада титана (жарење) изводи се у вакууму (1 h при 1 Pa) или у инертној атмосфери (Ar, He); жарењем се побољшавају својства пластичности титана, а снижава садржај примеса које дифузијом прелазе у вакуум или инертни медијум.

У земљама са развијеном авио-индустријом производе се обично 3-4 врсте титана различитих механичких особина. Класе средње и високе јачине користе се у конструкцијске сврхе, а меке врсте титана намењене су за легуре титана.

Јачина титана опада, а истегљивост расте са порастом температуре па је стога примењив до око 300°C (сл. 3.2).

Област примене титана се може проширити површинским третманом, углавном нитрирањем, што повећава отпорност према заривавању ("хладном приваривању"), оксидацији и корозији.

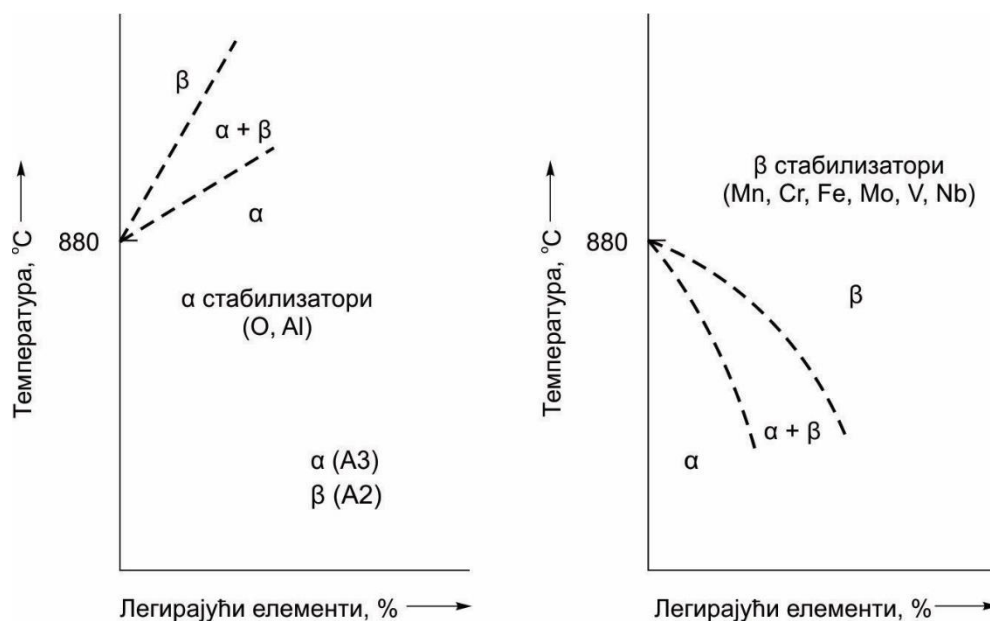
Титан се углавном примењује за скелете авиона (млазни и ракетни мотори), јер се одликује високим односом јачине према тежини (специфична јачина). Ова особина титана, заједно са његовом задовољавајућом отпорношћу против корозије у морској води, чини га примењивим и за специјална морска пловна средства. Даље се титан примењује у хемијској индустрији (пумпе, цевоводи, размењивачи топлоте, резервоари за азотну киселину). Титан такође може бити и легирајући елемент специјалних челика, легура лаких метала и алатних челика.



Слика 3.2 Утицај температуре на јачину и издужење технички чистог титана [2]

3.2 Легуре титана

Легуре титана и алуминијума са додацима хрома, мангана и ванадијума углавном се употребљавају у авионској индустрији и за делове који раде у јако корозивним условима. Алуминијум и калај, као и примесе (C, O, N) стабилизују α -фазу па се трансформација β у α одвија на вишој температури него према слици 3.3. Супротно томе, легирајући елементи Mn, Cr, Fe, Mo, V и Nb снижавају температуре преобраћаја β у α па ће се β -фаза задржати и испод 882°C , а каткад и на собној температури (сл. 3.3).



Слика 3.3 Утицај појединих елемената на стабилизацију α односно β -титана

Према структури која настаје при спором (равнотежном) хлађењу, титан образује легуре (види слику 3.3):

- једнофазне типа α - (Ti5Al2.5Sn),
- једнофазне типа β - (Ti10V2Fe3Al) и
- двофазне типа $(\alpha+\beta)$ - (Ti6Al4V).

Као што је горе наведено титанове легуре су легуре које садрже мешавину титана и других хемијских елемената. Такве легуре имају врло високу затезну јачину и живавост (чак и при екстремним температурама). Релативно су мале густине, имају изузетну отпорност на корозију и способност да издрже екстремно високе температуре. Међутим, високи трошкови, сировина и накнадне обраде, ограничавају њихову употребу у војној опреми, ваздухопловству, свемирским летелицама, бициклима, медицинским уређајима, накиту и тсл. Титанове легуре широко се користе за производњу ортопедских имплантата у артропластици кука, као замена за цементне протезе. У употреби су три главне врсте Ti легура: комерцијално чист титан (CPTi), TiAl_6V_4 , TiAlNb . Титанове легуре поседују одличну отпорност против опште корозије због присуства заштитног филма који се природно појављује на њиховој површини, а који се углавном састоји од TiO_2 . Титанове легуре показују корозивну отпорност у атмосферским условима, сланом раствору, морској води и растворима соли, као што су хлориди, бромиди, јодиди,

сулфити, фосфати, карбонати и тсл. Титанове легуре такође показују високу корозивну отпорност у благо смањеној до високо оксидишућој атмосфери. Без обзира на то, њихов рад зависи од температуре, концентрације киселине и састава легура титана.

Титанове легуре се примењују као биомедицински материјали углавном у замени тврдог ткива, за шта је потребан модул еластичности сличан људским костима и висока отпорност на замор. Типична механичка својства биомедицинских Ti легура наведена су у табели 3.2. Запажено је да легуре титана показују нижи модул еластичности у поређењу са другим металним биомедицинским материјалима, попут нерђајућег челика или легура на бази Co.

Табела 3.2 Механичка својства Ti легура [9]

Легура	Затезна јачина R_m , MPa	Издужење A, %	Модул еластичности E, GPa
$\alpha+\beta$ легуре			
Ti-6Al-4V	860-965	10-15	101-110
Ti-6Al-7Nb	900-1050	8.1-15	114
Ti-5Al-2.5Fe	1020	15	112
Ti-5Al-1.5B	925-1080	15-17	110
β легуре			
Ti-13Nb-13Zr	973-1037	10-16	79-84
Ti-12Mo-6Zr-2Fe	1060-1100	18-22	74-85
Ti-15Mo-5Zr-3Al	852-1100	18-25	80
Ti-15Mo-2.8Nb-0.2Si	979-999	16-18	83
Ti-35.3Nb-5.1Ta-7.1Zr	596.7	19	55
Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr	911	13,2	80

3.2.1 Легуре типа α -Ti

Основна фаза легура титана - α , заступљена је у микроструктури на температурама испод 800°C. Собзиром на то да преовлађује α чврсти раствор титана, својства ових легура се не могу значајно мењати термичком обрадом. Ојачавање α легура титана се претежно остварује хладним деформисањем (обликовањем), комбинацијом хладног деформисања и жарења. Највећи утицај растварајућег ојачања код α легура титана имају алуминијум, силицијум, ванадијум, цирконијум и калај. Тако се додавањем алуминијума и калаја постиже знатно ојачање титана, док се јачина само незнатно повећава додатком цирконијума.

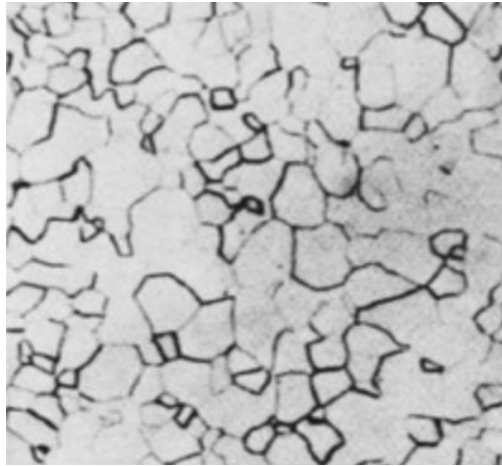
У експлоатацији легура титана, посебна пажња се мора обратити на напонску корозију, као и на прслине напонске корозије. Корозивна средина, нпр. слана вода и влажан ваздух може смањити ниво јачине легуре остварене третманом термичке обраде, па легура постаје подложна стварању и ширењу прслина. Садржај алуминијума у легури значајно утиче на појаву и развој напонске корозије. Образовање α_2 -Ti₃Al фазе смањује могућност стварања прслина услед дејства напонске корозије у сланој води, а донекле и у ваздуху, али се стварањем двофазне α + α_2 - микроструктуре, дејство напонске корозије појачава.

Осетљивост на концентрацију напона се дефинише као мера способности материјала да се у подручјима великих напона локално пластично деформише, уместо да дође до појаве лома или прслина. Осетљивост материјала на зарезе се одређује затезањем специјално припремљених узорак - епрувета на којој је претходно направљен зарез ради концентрације напона и упоређивањем добијене вредности са затезном чврстоћом, вредношћу која је добијена испитивањем затезањем глатке епрувете. Титанове легуре α -типа су у потпуности заварљиве, претежно методима заваривања у заштити инертног гаса/гасова.

Легуре типа α се могу поделити у три подгрупе:

- Једнофазне α -легуре, које своју јачину остварују термичком обрадом растворног жарења и отврдњавања - најраширенији једнофазни α материјал је у ствари комерцијални чист (CP) титан, који је у основи TiO₂ легура, очврснута додавањем контролисане количине кисеоника, који се интерстицијски раствара у металу.
- Легуре које садрже до 2% посебно изабраних β стабилизирајућих елемената и које се могу ковати или термички обрађивати - ове легуре показују највећу отпорност на пузање изнад 400°C и од свих Ti легура имају најбоља својства за употребу као легуре диска компресора у гасним турбинама и тсл.
- Легуре које се могу ојачати на уобичајан начин - јачина се додатно повећава ако је легура пре тога хладно обликована. Овај начин ојачања у комбинацији са заваривањем, чини је прикладном за употребу, на пример, у склоповима кућишта мотора за гасне турбине и др.

На слици 3.4 су приказана уједначена α -зрна која настају приликом обраде легура и жаре се у фазној области α . Величине зрна су релативно мале, јер је раст зрна ограничен због релативно ниских температура, као и због елемената који коче (успоравају) пораст зрна.



Слика 3.4 Микроструктура комерцијално чистог титана – загревање 1 h на 700°C
(уједначена величина зрна α) [10]

3.2.2 Легуре типа β -Ti

У групу β легура титана сврставају се легуре код којих у микроструктури преовладава чврст раствор на основи β модификације титана. Основни легирајући елементи β легура титана су ванадијум, молибден, волфрам, хром и ниобијум (таб. 3.3), који припадају групи β стабилизатора. У састав ових легура скоро увек улази и алуминијум који утиче на значајно повећање јачине. Захваљујући кубној решетки, карактеристичној за β фазу, лакше се подвргавају хладној пластичној преради од α и $\alpha+\beta$ легура. Термичком обрадом, тј. процесом растворног жарења (каљења), преципитације и старења, чврстоћа β легура се може повећати у великој мери, а једна од основних карактеристика ових легура је свакако и добра заварљивост. Густина ових легура нешто је повећана додатком хрома и ванадијума и тешким металима високе густине, који се додају у циљу стабилизације β фазе. Састав и својства неких од легура овог типа приказана су у табели 3.3.

Табела 3.3 Састав и својства неких β легура титана

Врста легуре	R_p , MPa	R_m , MPa	Мах садржај нечистоћа, %					Садржај легирајућих елемената, %				
			N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Остали
TiV10Fe2Al3	1100	1170	0,05	0,05	0,015	2,5	0,16	3	-	-	-	10V
TiAl3V8Cr6Mo4Zr4	830	900	0,03	0,05	0,020	0,25	0,12	3	-	4	4	6Cr,8V
TiV15Al3Cr3Sn3	985	1096	0,05	0,05	0,015	0,25	0,13	3	3	-	-	15V,3Cr
TiMo15Al3Nb2.7Si0.25	793	862	0,05	0,05	0,015	0,25	0,13	3	-	-	15	2,7Nb, 0,25 Si

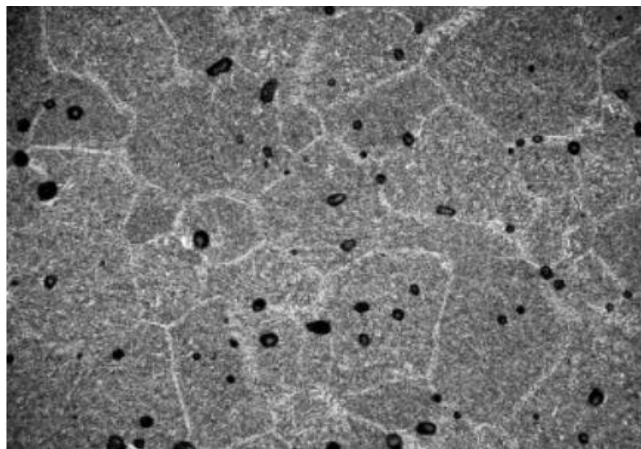
Треба нагласити да је развијена специјална легура TiMo15Al3Nb2.7Si0.25 (таб. 3.3) за рад у условима високе оксидационе постојаности на температурама до 650°C. Намењена је за израду металних матрица композита изложених високим температурама. Реч је о јединој легури титана која је отпорна на хидрауличка уља која се између осталог користе у авио-индустрији.

Легуре типа β -Ti захтевају додавање довољно β -стабилизирајућих елемената, као што је нпр. ванадијум, као што је приказано на фазном дијаграму (сл. 3.3). Један пример ове групе је Ti13V11Cr3Al, а коначно ојачање се остварује таложним отврдњавањем, које заједно са ојачањем чврстог раствора помоћу β -стабилизирајућих елемената, може дати затезну јачину већу и од 1300 MPa. То је била прва β легура титана која се користила у ваздухопловству.

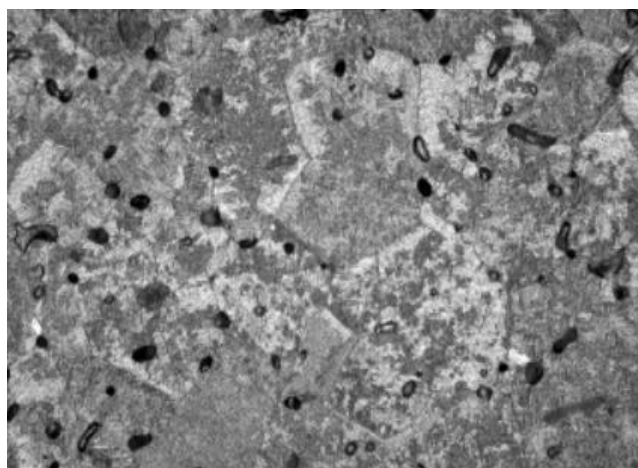
Развијана је и нова β -легура која садржи Ta и Nb, позната као "Gum metal", која има јединствене карактеристике: низак модул еластичности и изузетно високу јачину. "Gum metal" има еластичну деформацију до 2.5%, што је осетно веће од експериментално измерених вредности код других метала и легура. Примењује се у производњи оквира наочара и прецизним завртњевима, али потенцијално је широко применљив за аутомобилске делове, медицинску опрему и тсл.

Метастабилне β легуре велике јачине, попут Ti5Al5B5Mo3Cr (Ti-5553) и Ti10B2Fe3Al (Ti-1023), све се више користе због одличне комбинације својстава јачине и деформације.

На сликама 3.5 и 3.6 приказане су микроструктуре неких карактеристичних легура β титана, а у табели 3.4 су дате примене неких титанових легура овог типа при изради делова авиона.



Слика 3.5 Микроструктура легуре $Ti5Al5B5Mo3Cr$ (Ti-5553) [10]



Слика 3.6 Микроструктура легуре $Ti10B2Fe3Al$ (Ti-1023) [10]

Табеле 3.4 Својства и примена легура β -Ti у конструкцијама авиона

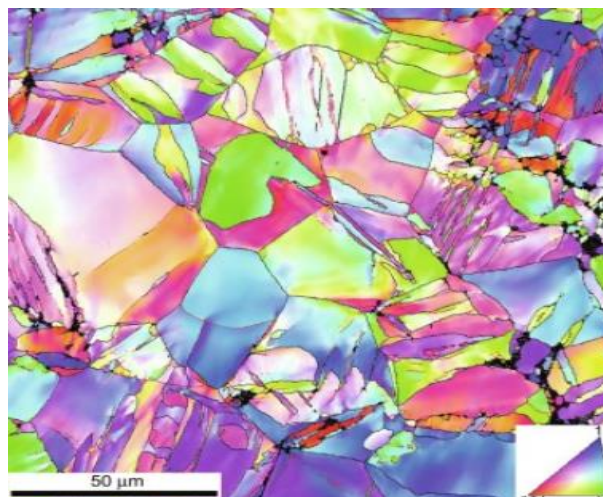
Легуре	Модул еластичности E, GPa	Затезна јачина R_m, MPa	Примена
Ti13V11Cr3Al	103	1280	SR-71 "Црна птица"
Ti8V6Cr4Mo4Zr3Al	103	1225	Авионски ојачивачи
Ti11.5Mo6Zr4Sn	103	1390	Авионски ојачивачи и
Ti10V2Fe3Al	103	1320	Ваздушни оквири, опрема за слетање, лопатице ротора хеликоптера
Ti15V3Al3Cr3Sn	103	1000	Ваздушни оквири
Ti15Mo2.7Nb3Al0.2Si	103	1240	Кућиште за млазни мотор

Прва легура β -Ti која је коришћена у комерцијалне сврхе била је Ti13V11Cr3Al, која је примењена у ваздушном оквиру војног авиона SR-71 (сл. 3.7). Легура је коришћена у оквиру трупа, као и у крилима, преградама, ребрима и механизмима за приземљивање. Будући да легуре алуминијума омекшавају на овим температурама, па је зато замењена овом легура титана, због њене супериорне термостојаности на високим температурама. Боинг 777 користи легуре β -Ti у многим компонентама, укључујући опрему за слетање, издувне чепове, млазнице и тсл. Легура Ti10V2Fe3Al се користи при изради неких делова авиона Боинг 777, као замена неких делова до тада израђиваних од челика повишене јачине. Јасно, реч је о деловима знатно мање густине (масе, тежине).



Слика 3.7 SR-71 "Црна птица" чију конструкцију чини легура β -титана (Ti13V11Cr3Al) [11]

Ti15Mo је метастабилна легура β -титана која се може користити у биомедицини, јер не садржи никакве токсичне елементе. Ова легура има нешто мањи модул еластичности због тога што нема чвршће α фазе. Микроструктура легуре састоји се од крупних металних зрна типичне величине за ову врсту легура (сл. 3.8).



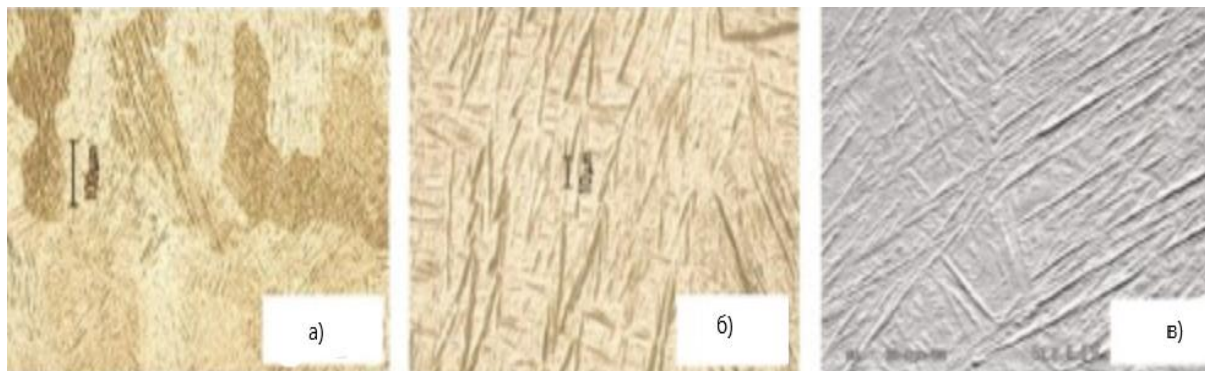
Слика 3.8 Микроструктура легуре Ti15Mo [12]

3.2.3 Легуре типа $(\alpha+\beta)$ -Ti

Легуре овог типа чине главни део производње титанових легура. Међу њима је и TiAl6V4 која се користи у количини једнакој свим осталим титановим легурама. Легуре титана типа $(\alpha+\beta)$ поседују најбољу комбинацију механичких својстава и користе се при температурама од 315 до 400°C. Иако имају врло добра механичка својства термопостојаности до наведених температура, ипак су им нешто лошија својства при раду на повишеним температурама у односу на α легуре титана. Управо због тога се могу само краткотрајно излагати повишеним температурама.

Термичком обрадом $\alpha+\beta$ легура титана могуће је значајно повећати њихову јачину уз релативно мало смањење пластичности. Заварљивост $\alpha+\beta$ легура је ограничена. Поред алуминијума, $\alpha+\beta$ легуре титана, садрже додатне легирајуће елементе који стабилизују β фазу. То су елементи са запремински центрираном кубном решетком, као што су молибден и ванадијум.

Производња $(\alpha+\beta)$ легура титана се стално унапређује и замењује α легуре титана. У ствари, чини се да је TiAl6V4 најзаступљенија $(\alpha+\beta)$ легура у авио-индустрији и биомедицинској технологији. Њена структура (сл. 3.9) је повољнија од СР титана, док је њен модул еластичности мањи и од нерђајућег челика и од легура типа CoCrMo. Микроструктура ове легуре зависи од термичке обраде. Ако се легура загрева у фазном пољу β (изнад 1000°C), а затим се полако хлади до собне температуре, ствара се двофазна структура. Ti6Al4V је легура титана ($\alpha + \beta$) која садржи α стабилизирајући елемент Al и β стабилизаторски елемент V. Легура TiAl6V4 користи се у комерцијалним и војним авионима дуги низ година, због своје повољне специфичне јачине, високе отпорности на раст и ширење оштећења и одличне отпорности на корозију.



Слика 3.9 Структура легуре Ti-Al-4V увећана оптичким микроскопом:
а) 100× пута, б) 1000 × и в) 1500 × [13]

Велики напори су уложени у развој интерметалних легура на бази Ti за рад на високим температурама. То су легуре: Ti3Al, Ti2AlNb и TiAl. Нажалост, ове интерметалне легуре угрожавају животну средину и имају велику цену, па до сада нису нашле значајнију примену. Неке од недавно развијених легура титана наведене су у табели 3.5.

Табела 3.5 Стандардизоване легуре титана [13]

Назив	Тип	UNS број ²	ASTM ³ стандард	ISO стандард ⁴
Ti3Al2.5V	$\alpha+\beta$	R56320	ASTM B 348	
Ti5Al2.5Fe	$\alpha+\beta$			ISO 5832-10
Ti6Al7Nb	$\alpha+\beta$	R56700	ASTM F 1295	ISO 5832-11
Ti15Mo	β	R58150	ASTM F 2066	
Ti13Nb13Zr	β	R58130	ASTM F 1713	
Ti12Mo6Zr2Fe	β	R58120	ASTM F 1813	
Ti45Nb	β	R58450	AMS 4982	
Ti35Nb7Zr5Ta	β	R58350		

² UNS број - унифицирани систем нумерисања (УНС) је систем означавања легура који је прихваћен у Северној Америци.

³ ASTM стандард- Америчког друштво за испитивање и материјале.

⁴ ISO стандард - Међународна организација за стандардизацију.

4. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ТИТАНА И ЊЕГОВИХ ЛЕГУРА

4.1 Појам и дефиниција заварљивости

Заварљивост је комплексна технолошка карактеристика материјала којом се углавном изражава утицај процеса заваривања на заварени спој и његово понашање у топлотном и деформационом смислу у току и после заваривања. Стога се може рећи да појам заварљивости одређује релативну способност материјала да ствара заварене спојеве одабраном технологијом заваривања, а да изведени спојеви удовољавају свему што се од њих тражи у радним условима. То значи да, нпр. при РЕЛ заваривању, материјал заварљив овим поступком може образовати спој чија су тражена својства приближно једнака својствима завариваног материјала. Тражена својства своде се на испуњавање техничких услова који се односе на механичке, структурне и хемијске особине метала шавова и зоне око шавова и споја у целини [3].

С обзиром на комплексност заварљивости, дефиниције и оцене, подела на уже појмове олакшава проучавање и оцену погодности материјала за одређене заварене конструкције. Стога се посебно разматрају: *металуршка, конструкциона и технолошка заварљивост*.

Металуршка заварљивост материјала зависи од низа фактора: хемијског састава, почетне структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. На ову заварљивост утичу све металуршке промене у материјалу које настају под дејством топлоте унете при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног снижења механичких и технолошких особина споја, нарочито у зони око шавова, што значи да код материјала рђаве заварљивости могу настати знатне промене хемијског састава, односно могу се појавити тврде и крпе структурне компоненте, пролине и тел., све зависно од датог случаја.

Утврђено је да су метали и легуре незаварљиви са металуршке тачке гледишта ако се њихови саставни хемијски елементи међусобно не растварају у чврстом агрегатном стању већ образују тврда и крта хемијска једињења (нпр. Fe-Al, Fe-Cr, Ni-Al, ...).

Насупрот томе, заварљиви су сви хомогени метални материјали који образују чврсте растворе и нееутектичке или еутектичке смеше, односно сви материјали који поседују металуршку заварљивост могу се успешно заварити, ако се одабере одговарајући метод, поступак и технологија заваривања.

Конструкциона заварљивост показује утицај низа параметара на пројектовање заварене конструкције, нпр. дебљине, врсте, броја и распореда шавова, које конструктор поставља пројектним захтевом за дати случај, све према врсти оптерећења и другим радним условима.

Технолошка заварљивост обухвата технолошке параметре који утичу на особине заварених спојева, нпр. додатни материјал, метод и поступак заваривања, погонску енергију (унос топлоте), брзину хлађења, итд. При томе се цени да ли се технолошки поступак изводи без тешкоћа или се морају применити посебне мере (предгревање, догревање у току и отпуштање после заваривања, рад у специјалним атмосферама), а оцена се доноси према предузетим мерама и добијеним резултатима [3].

Са оперативног становишта које се односи на понашање неких материјала у току заваривања или наваривања, они се оцењују као "добро заварљиви" када је шав чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал стапају у хомогену легуру, а при томе се топе без тешкоћа, без великог прштања (бризгања) и појаве прслина, гасних мехурова и других грешака.

Нечистоће на страницама жлеба и околини: прљавштине, масти и уља, коварине и тсл., погоршавају оперативну заварљивост па је неопходно да се све споменуто одстрани из зоне топлења у оквиру припреме за заваривање.

Општа заварљивост представља глобалну оцену појединачно објашњених компонената заварљивости при чему се за коначну оцену процењује већи број фактора као што су: основни и додатни материјал, заваривачки рад, врста напрезања у шавовима и у близини концентратора напона. Све наведено се разликује од случаја до случаја. При процени склоности завареног споја ка кртом лому, битан је критеријум да ли је спој способан да све велике сопствене напоне поништи или смањи пластичним деформисањем, тј. претварањем еластичних деформација у пластичне⁵.

Оцена заварљивости метала и легура своди се на то да се предвиде особине заварених спојева после заваривања. Коначне особине за дати материјал и технологију зависе од процеса и појава који се дешавају и настају у основним зонама завареног споја:

- у шаву, где се материјал потпуно топи и меша са додатним материјалом а затим очвршћава,
- у прелазној зони - зони стапања - полуистопљеног материјала и
- у зони утицаја топлоте (ЗУТ-у), где се основни материјал у чврстом агрегатном стању мења услед загревања и хлађења.

Само неке промене настале у овим зонама могу се непосредно запазити, док се о већини закључује на основу резултата испитивања већ изведених пробних спојева, односно оцењује се склоност материјала ка образовању прслина, склоност према кртом лому, старењу и тсл.

Из изложеног се може закључити да је при заваривању одређеног материјала потребно утврдити:

- како се материјал понаша при заваривању одређеним технолошким поступком и
- како се заварени спој понаша у најнеповољнијим процесним условима заваривања.

То значи да ће материјал добре заварљивости образовати поуздане спојеве, односно компактне и непрекидне заваре, и довољно јаке и пластичне шавове и ЗУТ да издрже сва напрезања у процесу заваривања, тј. да поседују одговарајућу технолошку чврстину и да се одупру свим непредвиђеним преоптерећењима у току рада тако што ће се локално пластично деформисати. Другим речима основни материјал мора да поседује добру пластичност и жилавост [3].

⁵ Код материјала добрих својстава пластичности, велики локални напони поништавају се пластичним деформисањем, док се код кртих материјала појављују прслине које се даље шире и доводе до лома.

Образовање нових структура у завареном споју зависи од кинетике кристализације и преображаја унутрашње грађе у чврстом стању све зависно од услова заваривања, хемијског састава основног и додатног материјала и стања растопа.

Стога за неке материјале (ливено гвожђе, бакар), добра металуршка заварљивост не значи истовремено и довољну глобалну заварљивост, јер се метал шава и ЗУТ, и поред добре металуршке заварљивости могу знатно разликовати од основног материјала поготову по механичким особинама и херметичности споја.

Зато ће и при задовољавајућој металуршкој заварљивости, тек, технолошка заварљивост указати на способност основног материјала да се са одабраном технологијом остваре тражена својства и компактан спој. То доказује да се, полазећи од добре металуршке заварљивости, може изабрати одговарајући метод и поступак заваривања који даје заварени спој задовољавајућег квалитета [3].

Из до сада познатих сазнања за оцену и дефиницију заварљивости запажа се да нема једнозначних и бројно одређених величина, ове за праксу важне карактеристике. Може се зато, као пример, навести најраспрострањенија дефиниција заварљивости Међународног института за заваривање која гласи:

"Метални материјал се сматра, на одређени начин заварљив, ако помоћу заваривања, при коришћењу одговарајуће технике спајања, настају јединствени метални спојеви, који испуњавају захтеве, који се постављају за својства локалних шавова и њихов утицај на чврстину конструкције".

Глобални смисао ове дефиниције и других дефиниција је да су непотпуне и неподобне за праксу што упућује на даља истраживања заварљивости посебно са становишта поузданости. То је разумљиво, јер је заварљивост комплексан појам и својство зависно од материјала и његовог понашања у току и после заваривања, а такође и од технолошког поступка заваривања, као и од врсте заварене конструкције. Из наведеног се запажа да за оцену заварљивости треба увек узимати у обзир узајамну везу (1) *конструкције* (крутост, дебљина, врста споја), (2) *материјала* (способност заваривања) и (3) *технологије* (могућност заваривања). Због повезаности ових чинилаца производног система није увек могуће заварљивост оценити само једном врстом практичних проба заварљивости, па се за челике уводе допунски показатељи који се односе на:

- структуру,
- компактност,
- механичка својства и др.

У пракси су уобичајена два приступа за оцену заварљивости:

- процена задовољавајућих вредности показатеља заварљивости за испитани облик споја, материјал и начин заваривања (тестирање материјала) и
- избор услова и других мера при заваривању да би се постигли задовољавајући резултати (потврда технологије).

Практичним пробама одређују се поједини видови заварљивости и доносе оцене о подобности испитиваног материјала и одабране технологије. Најважнији критеријум за

оцену заварљивости је одржавање металног континуитета тј. целовитости завареног споја, што може бити нарушено кад год се појаве прслине одређене величине и распореда. Према механизму настајања прслине могу бити:

- *Вруће (топле),*
- *Хладне,*
- *Ламеларне и*
- *Прслине жарења.*

Поред наведеног критеријума целовитости, битне су и граничне механичке особине:

- *Тврдоћа завареног споја* (укључујући метал шава, ЗУТ и ОМ),
- *Својстава отпорности и*

Ударна жилавост. Вредности тврдоће и затезне јачине, као међусобно линеарно зависне величине, користе се као једноставан показатељ заварљивости јер њихово повећање у ЗУТ-у указује на смањење пластичности и ударне жилавости, односно погоршање заварљивости.

Ударна жилавост је индикатор који најбоље указује на промене технологије и/или режима заваривања, које се нарочито испољавају у ЗУТ-у, па се често оцена заварљивости доноси испитивањем жилавости у зони утицаја топлоте, зони стапања и основном материјалу (нпр. проба Чабелке) [3].

4.2 Методе за испитивање заварљивости

У практичним условима нема "идеалне заварљивости", тј. не може се ниједном методом заваривања добити спој потпуно истих особина у шаву, ЗУТ-у и основном материјалу.

Како се стварна заварљивост разликује од идеалне, услед неизбежних разлика у особинама насталих при заваривању, то се заварљивост своди на процењивање граничних величина неких показатеља заварљивости.

Према многим препорукама полазна основа за процену заварљивости непознатог материјала је одређивање хемијског састава и механичких особина; у том смислу користе се:

1. Рачунске и емпиријске методе и
2. Практичне пробе заварљивости.

Подаци потребни за оцену заварљивости горњим методама су:

- хемијски састав материјала,
- дебљина, тип и понекад крутост завареног споја и
- начин заваривања.

У овом раду неће се детаљније говорити о методама за процену заварљивости челика, ливених гвожђа, алуминијума и његових легура, бакра и његових легура и тсл., већ ће се акценат ставити на проблематику заварљивости титана и његових легура.

4.2 Оцена заварљивости титана и његових легура

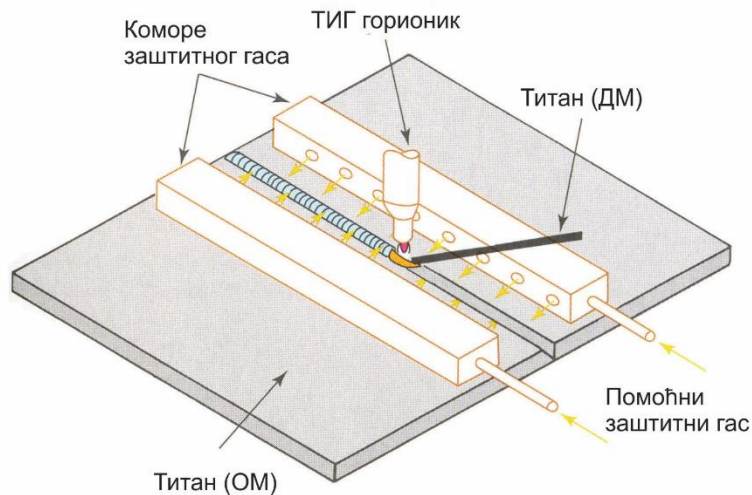
Титан и легуре титана имају веома добра својства отпорности и деформације, као и одличну отпорност на корозију. Титан је тежи од алуминијума, али је 1.7 пута лакши од челика. Употребљава се у облику полупроизвода, као што су отковци, шипке, лимови или плоче. Кад се титан ожари постаје знатно мекши и пластичнији. Максималну јачину легуре титана добијају после растворне термичке обраде и старења. Јачина на кидање може надмашити 1380 МПа. Према ASTM-у, чист титан се сврстава у четири класе: то су класа 1, класа 2, класа 3 и класа 4. Кад се титан легира са другим елементима, они се укључују као део ознаке. Примери: Ti-5Al-2.5Sn, Ti-2Al-11Sn-5Zr-1Mo, Ti-6Al-4V, Ti-8Mn и Ti-8Mo-8V-3Al-2Fe (AWS). Цифре испред хемијских симбола означавају проценатални садржај тих елемената. Титански додатни метал и заваривачке електроде означавају се на исти начин. Пошто је титан биокompatibilан метал, употребљава се за медицинска помагала, као што су: вештачки ливени кукови, зубни имплантанти и тсл. [3].

4.2.1 Заваривање титана и његових легура

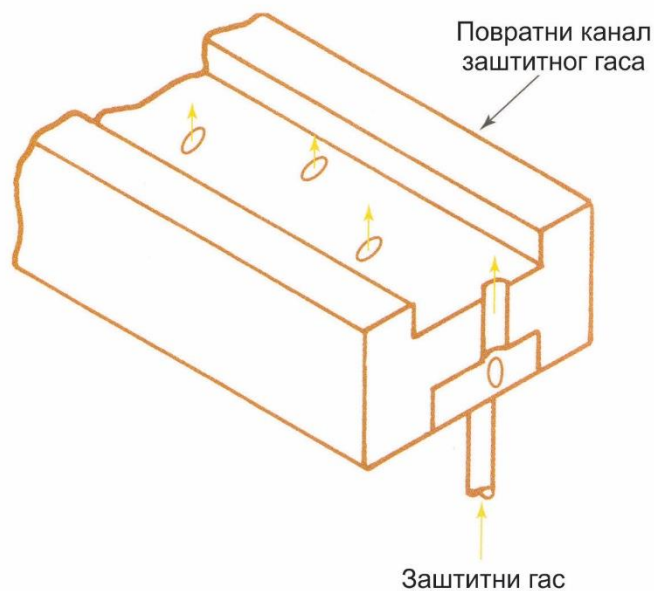
Највеће тешкоће при заваривању титана и његових легура проистичу отуда што је титан реактиван метал⁶ који на повишеним температурама, раствара кисеоник, азот и водоник. Међутим, мале количине растворених кисеоника и азота, делују позитивно јер повећавају јачину и тврдоћу метала. Веће растварање ових елемената или пак нечистоћа као што су масти, уља или влага доводе до тога да титан постане веома крт. Стога је пре заваривања потребно чишћење радног предмета. Да се спречи контаминација при заваривању користи се инертни заштитни гас, који мора да буде веома чист, без примеса и влаге. Заштитни инертни гас доводи се са обе стране жлеба. Растопљени метал купке и зона под утицајем топлоте морају да буду прекривени инертним гасом све док се не охладе до 260°C.

Један од начина обостране заштите приказан је на слици 4.1. Поред лица шава заштићеног аргонским гориоником, корен шава се штити помоћним гасом. Канал за довођење гаса са коренске стране шава приказан је на слици 4.2. Заваривачки горионик нормално доводи *примарни заштитни гас* око заваривачке купке. Гас који се посебно доводи да изолира растоп и ЗУТ при заваривању зове се и *секундарни (помоћни) заштитни гас*.

⁶ У реактивне метале спадају берилијум, ниобијум, молибден, тантал, титан, волфрам и цирконијум. Њихова је карактеристика што имају велики афинитет према кисеонику и неким другим хемијским елементима.



Слика 4.1 Секундарни заштитни гас доводи се са доње стране титанског споја [3]



Слика 4.2 Канал за довођење заштитног гаса са коренске стране шави при заваривању титана [3]

Други начин заштите метала од контаминације, јесте заваривање титана у атмосфери чистог инертног гаса, тј. у комори потпуно напуњеној тим гасом. У примени су две врсте комора:

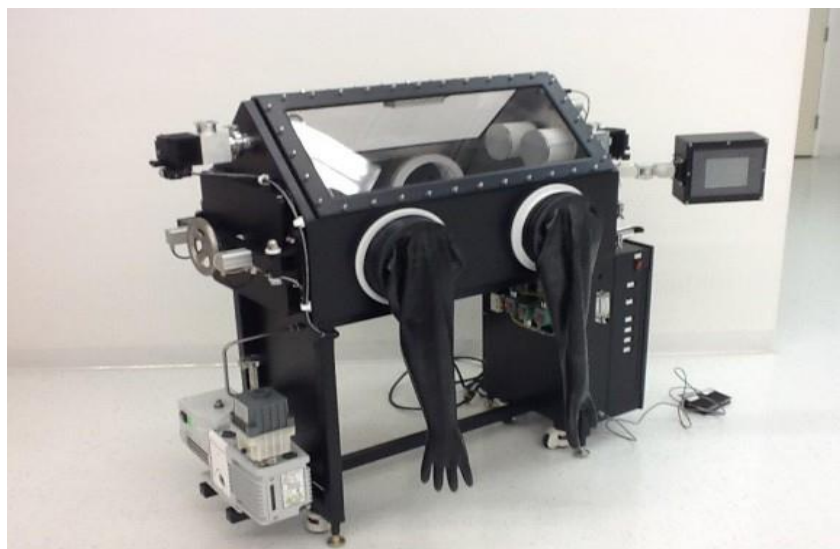
- мала комора, у којој су споља уграђене ручке за манипулацију држачом електроде и
- велика комора са гасом под кључем. Она је испуњена заштитним гасом, а заваривач у посебној одећи улази у комору. Он мора да носи апаратуру за дисање: ваздушни респиратор или сопствени апарат за дисање. У случају да радник уђе у комору без специјалне опреме за дисање, изгубиће свест, а за мање од 10 секунди наступа смрт.

Додатни метали или електроде које се препоручују за заваривање титана по хемијском саставу одговарају основном металу. Класификација додатних метала и електрода иста је као за основни метал. Главни легирајући елемент и његов процентуални садржај дају се у другом делу ознаке. Примери су: ERTi-1, ERTi-2 (комерцијално чисте класе 1 и 2), ERTi-3Al-2.5V, ERTi-8Al-1Mo-1V и ERTi-6Al-4V (AWS). У овим примерима Е означава електроду, R- шипку. Најчешћи методи заваривања титана су МИГ и ТИГ. Други начини су плазмено лучно заваривање, електронски сноп, ласерско заваривање, фрикционо, електроотпорско и тврдо лемљење.

Као што је већ речено, предмети од титана припремљени за заваривање морају да буду потпуно чисти. Сви оксиди, масти, уља и чак отисци прстију треба да се уклоне. После чишћења, радним предметима се рукује у рукавицама. Сваки контаминант на радном предмету може на температури заваривања, да изазове хемијску реакцију са кисеоником, водоником и азотом и ослаби заварени спој. Код ТИГ-методе користи се једносмерна струја, са торираном електродом (EWTh-2) везаном за минус пол извора напајања (Е-). Лук се увек успоставља на посебном помоћном предмету од титана који се поставља близу подужне осе заваривања.

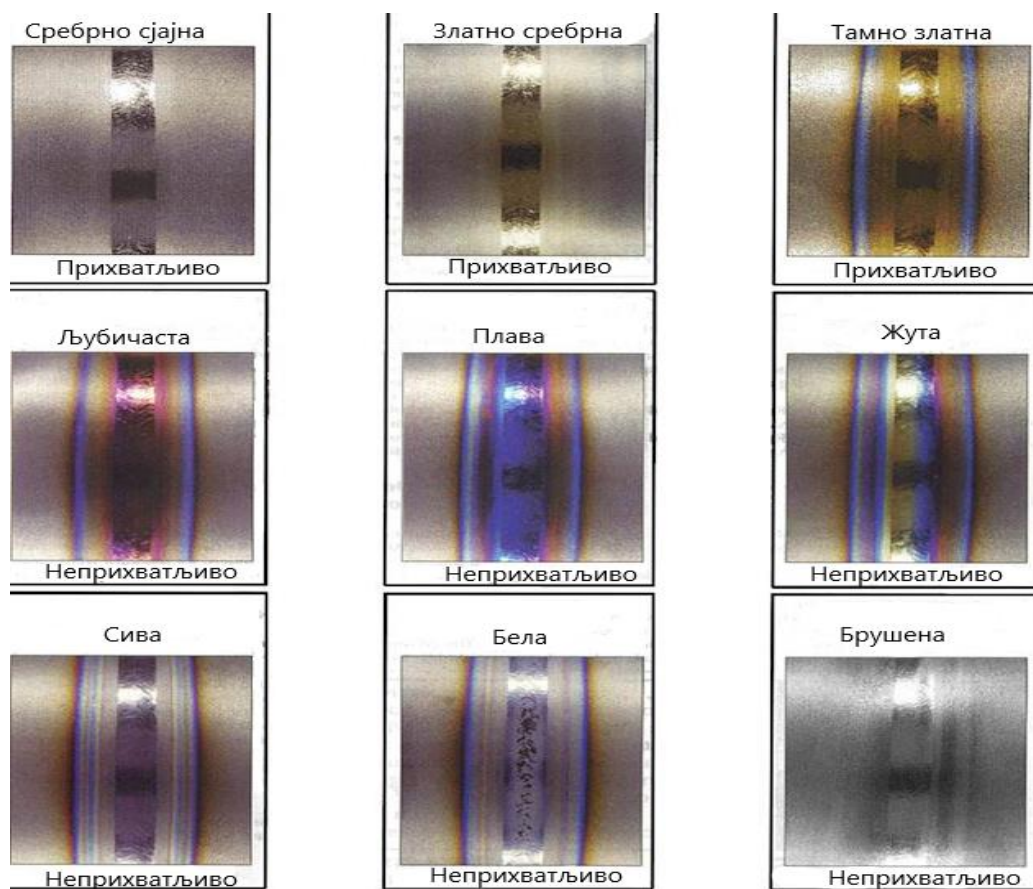
Код МИГ-а, битно је да се зона заваривања потпуно заштити од кисеоника, водоника и азота. Заштитни гас мора да буде изузетно чист. Помоћни заштитни гас доводи се са стране слично као код ТИГ-а, али и са коренске стране шави тј. одоздо. Шав и ЗУТ, морају да остану заштићени инертним гасом све док се спој не охлади до испод 260°C. Такође је потребно да електродна жица буде потпуно чиста, без уља, масти и прашине на њој. Поклопац на калему за жицу треба у току рада затворити да се спречи продирање прашине. Кад се не користи, калем титанске жице треба склонити са машине и спаковати га у пластичну врећу и одложити у посебну комору.

Као што је напоменуто титан и његове легуре треба обазриво заваривати уз примену посебних мера. На слици 4.3 приказана је специјална вакуумска комора. Овај модел користи отвор са рукавицама и има хемисферну куполу од плексигласа за гледање. После убацивања делова, вакуумска пумпа брзо уклања ваздух, а комора се затим напуни инертним гасом за заваривање.



Слика 4.3 Комора за заваривање са вакуумском пумпом и инертним гасом [19]

На слици 4.4 је схематски приказан метод процене квалитета оствареног споја титана и његових легура.



Слика 4.4 Схема за контролу квалитета заваривања титана [14]

4.2.2 Утицај унете топлоте при заваривању на микроструктуру легура

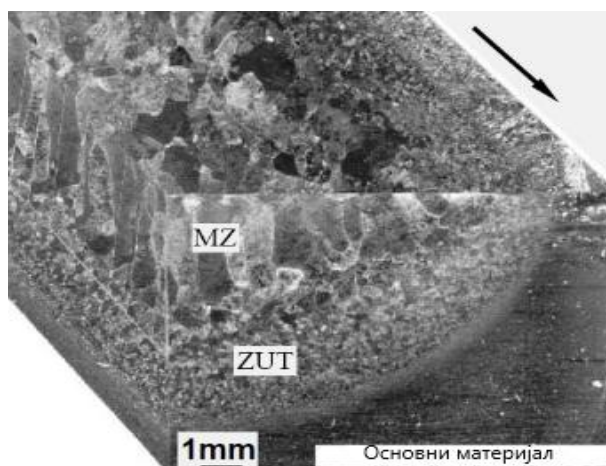
Као што је споменуто хемијски састав легуре и њена микроструктура одређују заварљивост. Општа заварљивост титанових легура пропорционална је повећању садржаја α фазе и обрнуто пропорционална повећању јачине легуре. Разлог је тај што се код легура високе јачине заваривачка својства разликују од својстава основног материјала и што део таквих легура може садржати легирајуће елементе, као што су гвожђе и хром, који неповољно утичу на механичка својства зава.

Чист титан, као и α , $\alpha+\beta$ легуре титана показују добру заварљивост. Неке високо чврсте легуре $\alpha+\beta$, као што су TiAl6V6Sn2 и TiAl6Sn2Zr4Mo6 , подложне су настанку прелина па нису добро заварљиве, као што је то пример код легуре TiAl6V4 . Метастабилне β легуре имају ограничену заварљивост, јер метал зава и зона под утицајем топлоте имају тенденцију повећања крутости због фазних трансформација које настају током заваривања и каснијег хлађења после заваривања. Приликом заваривања титана са другим металима настају проблеми због повећања кртости, јер се формирају интерметалне фазе. Ако основни материјал садржи легирајуће елементе као што су гвожђе или хром, ови елементи ће се одвојити на местима зава метала и хладиће се

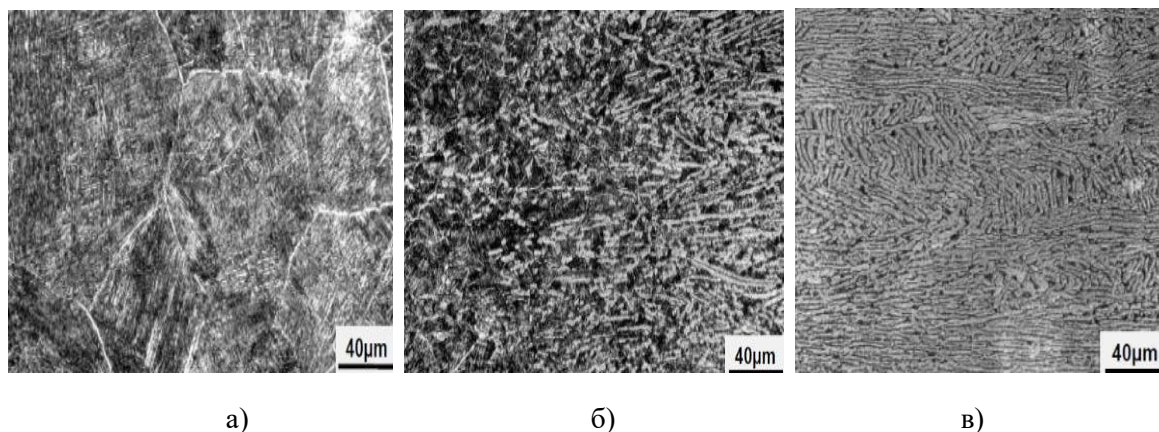
веома споро. Део који је заварен је обогашен тим елементима и на тај начин је настала опасност од настанка пукотина. Предгревање делова је најефикаснији начин за избегавање оваквих типова прслина код легура титана.

Механичка својства заварених спојева ретко кад достижу или надмашују својства основних материјала, тако да обично одговарају својствима ламеларних микроструктура који се добијају ливењем. Типичне вредности завареног споја као што су: затезна јачина, напон течења, динамичка издржљивост и тсл. смањене су у односу на основни материјал. Својства која су побољшана у зони утицаја топлоте су отпорност на раст и ширење прслине настале услед замора материјала и отпорност на пузање.

Пример овакве ламеларне структуре приказан је на следећим сликама (слике 4.5 и 4.6) при различитим увећањима. Поред ламеларне микроструктуре, микроструктура метала шава је приметно оштећена. Видљиво је да су бета зрна већа и стубичастог облика.



Слика 4.5 Композит микроструктуре дела завареног TIG поступком



Слика 4.6 Ламеларна микроструктура у зони утицаја топлоте под већим увећањем (а), део зоне утицаја топлоте где није прекорачена температура рекристализације (б) и микроструктура основног материјала (в)

Прва слика (а) приказује исти спој само под већим увећањем. Приказани су делови зоне утицаја топлоте који су загрејани изнад температуре α/β рекристализације. Ламеларна структура у овом делу врло је слична оној у завареном металу шава само су β зрна мање величине. Друга слика (б) показује зону утицаја топлоте чија температура приликом заваривања није надмашила температуру α/β рекристализације. Видљива су ситнија зрна у односу на претходно приказане слике. Иако није постигнута температура α/β рекристализације и даље је постигнута довољно висока температура да се формира ламеларна микроструктура. Микроструктура основног материјала је приказана на трећој слици (в). Реч је о типично жареној микроструктури топоваљане плоче која се није у потпуности рекристализовала.

5. МЕТОДИ ЗАВАРИВАЊА ТИТАНА И ЊЕГОВИХ ЛЕГУРА

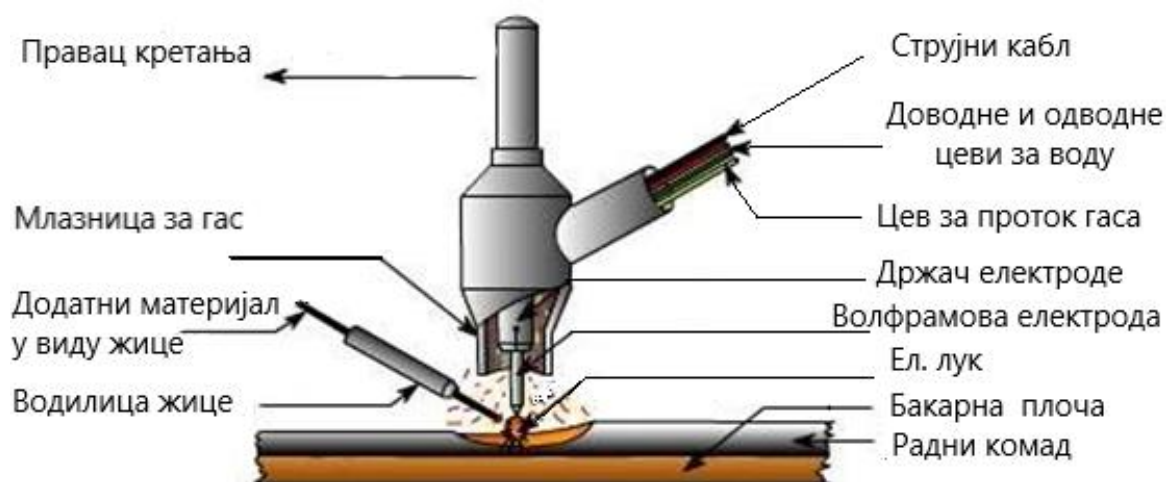
Титан и његове легуре, као што је споменуто, најуспешније се заварују ТИГ-ом (у заштити аргона, хелијума или њихове смеше), МИГ-ом (заштита инертним гасовима) или електронским снопом електрона. У овом раду истакнуће се само главне смернице и тешкоће при заваривању титана и његових легура, без детаљнијег описивања наведених начина заваривања.

5.1 ТИГ заваривање

ТИГ је електролучни метод заваривања нетопљивом волфрамском електродом у заштитној атмосфери инертног гаса (аргон, хелијум). Код ТИГ поступка заваривања топлота ослобођена у електричном луку, успостављеном између нетопљиве волфрамске електроде и основног материјала, топи основни, а по потреби и додатни материјал. Иако се у почетку место заваривања штитило хелијумом, данас је у употреби претежно аргон. Инертни гас/гасови штити од штетног деловања кисеоника и азота из околине. Нетопљива електрода служи искључиво за успостављање и одржавање електричног лука. Електрични лук се успоставља притиском на прекидач на пиштољу помоћу посебног високофреквентног јонизатора (HF). Избегава се кратак спој, јер оштећује врх електроде чиме се смањује стабилност лука и долази до преношења честица истопљеног волфрама у метал завара с неповољним последицама по механичка својства шави. Додатни материјал, ако је неопходан (за веће дебљине завариваних делова), је обично у облику шипке за ручне поступке, или у облику намотане жице за аутоматске поступке. Радни делови веће дебљине захтевају припрему споја и употребу додатног материјала. Метод заваривања је приказан на сликама 5.1 и 5.2.



Слика 5.1 ТИГ метод заваривања [14]



Слика 5.2 Приказ електролучног заваривања нетопљивом електродом у заштити инертних гасова-TIG метод заваривања (пиштољ хлађен расхладним средством) [15]

За ТИГ заваривање примењују се једносмерни (Е-, Е+), наизменични и пулсни извори струје. Пиштољи за ТИГ заваривање се деле на две групе: оне са хлађењем уз помоћ специјалног расхладног средства и без хлађења. Пиштољи који се не хладе расхладном течностју, хладе се индиректно протоком инертног заштитног гаса. Такви пиштољи су обично јефтинији, користе се за заваривање танких делова, при максималној јачини струје заваривања од 200 А. Пиштољи који се хладе расхладном течностју могу константно да раде при јачини струје од око 200 А, док су неки конструисани да раде и до 500 А. Обично су такви пиштољи скупљи и тежи од оних без хлађења расхладном течностју.

У ранијим фазама употребе ТИГ начина заваривања била је чешће употреба хелијума као заштитног гаса, док је данас аргон доминантан у примени. Оба гаса су инертна и у њиховој атмосфери се не одвијају хемијске реакције између заштитног гаса и истопљених делова основног и додатног материјала. Поред испуњавања примарног задатка заштите растопљеног материјала од спољашњег утицаја атмосфере, заштитни гас директно утиче на стабилност и квалитет електричног лука, геометријске карактеристике зава, естетски изглед зава и на количину паре која се ослобађа за време заваривања. Аргон је погодан за све врсте материјала који се заварују, чак и тешко заварљивих метала као што су алуминијум и нерђајући челик. Чешћа употреба аргона као заштитног гаса у односу на хелијум је и због следећих разлога: мирнији и тиши рад, стабилнији електрични лук, нижа цена и боља доступност, смањене количне гаса које су потребне за квалитетну заштиту. Хелијум се користи у случајевима када је потребно заварити делове веће дебљине и у принудним положајима, јер је лакши од ваздуха. Мешавина хелијума и аргона је корисна када су потребне веће брзине заваривања, јер утицај хелијума даје већи унос топлоте, док аргон надокнађује лакше успостављање електричног лука. Успешно заваривање титана захтева високу чистоћу заштитног гаса, не мању од 99.9%. Обично је потребна већа количина заштитног гаса. Могуће је користити аргон и хелијум. За материјале дебљине до 3 mm користи се аргон због веће густине гаса (тежи од ваздуха) и добрих заштитних својстава.

Додатни материјал за TIG заваривање испоручује се у облику шипки приказаних на слици 5.3, који се додају ручно или жице које се додају аутоматски.



Слика 5.3 Шипке додатног материјала за заваривање TIG методом [16]

Код ручног TIG заваривања начин додавања додатног материјала утиче на број потребних пролаза, завршни изглед и изглед завареног споја. Код механичког заваривања брзина додавања жице одређује количину додатног материјала. При малој брзини додавања материјала може доћи до настанка пукотина по средини завареног споја. Приликом заваривања титана и његових легура веома је важна чистоћа површине због велике реактивности титана са елементима из атмосфере попут кисеоника, водоника, азота и тсл. Пре заваривања потребно је пажљиво уклонити нечистоће и боје. За чишћење је прикладан ацетон, етанол или толуен. За механичко чишћење површине и уклањање површинског оксидног слоја треба користити четке од титана или нерђајућег челика. Након што су радни делови очишћени, зона споја не сме се дирати голим рукама, јер масноће и влага с руку могу неповољно утицати на завар. Заштита инертним гасовима је изузетно важна при заваривању титана ако је потребан висок квалитет завара. С обзиром на реактивност титана са елементима из атмосфере, сви делови који се загревају изнад 200°C морају бити заштићени. Због тога се приликом TIG заваривања употребљавају аргон и хелијум чистоће 99.9%. Аутоматско заваривање при већим брзинама захтева и допунску заштиту дела иза пиштоља приликом извођења заваривања како би се умањила изложеност још увек врућег завара спољашњој атмосфери. Заваривање титана је сложеније и скупље од заваривања многих других метала. За веће серије једноставније је коришћење комора за заваривање које се испуне инертним гасом. Ове коморе могу бити израђене и од пластике са отворима за пиштољ са електродом и руку заваривача (сл. 5.4). Аргон је тежи од ваздуха па пада на дно коморе и истискује заостали атмосферски ваздух кроз вентил на врху коморе. Постоје примери аутоматизације TIG-а, али су чешћи случајеви ручног заваривања.

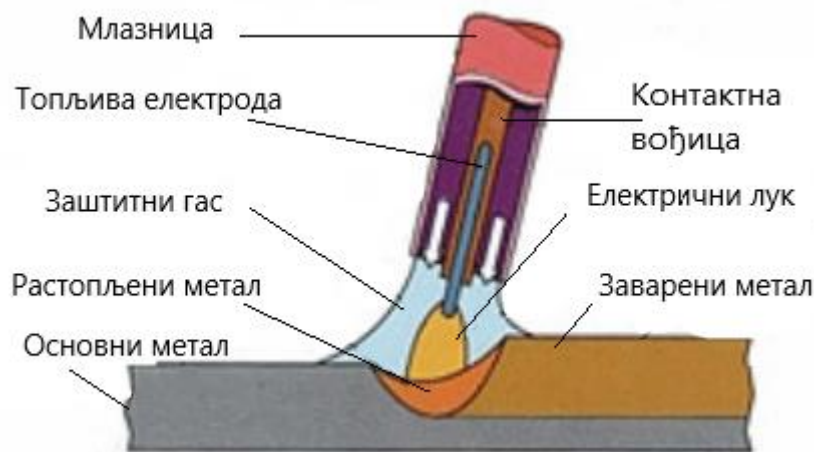


Слика 5.4 Извођење ТИГ заваривања у пластичној комори испуњеној аргоном [17]

5.2 МИГ заваривање

МИГ (енгл. metal inert gas) је електролучно заваривање топљивом електродом у заштити инертног гаса. Потребна топлота за заваривање добија се из електричног лука који се успоставља између топљиве електродне жице и основног материјала. Процес може бити: полуаутоматски, аутоматски и роботски. Програмиран је процес роботског MIG заваривања, при чему су параметри унапред задати, а оператер надгледа и контролише рад робота. У индустрији се највише користи полуатомски поступак MIG заваривања, јер је прилагодљив свим радним условима и има високу продуктивност. Главна предност коришћења МИГ метода јесте заваривање спојева са великим размаком између делова који се заварују. Оваква ситуација се неретко налази код дебљих делова где је отежана припрема споја. У случајевима када цена додатног материјала није превелика и када није потребна прецизна припрема споја, МИГ може бити економски оправдан метод за заваривање титана и његових легура. Посебно је погодан када се заварени спој може остварити једним пролазом или са мањим бројем пролаза у поређењу са ТИГ методом заваривања. Мере опреза при заваривању титана и његових легура су сличне за ТИГ и МИГ метод заваривања. Потребно је инертним гасовима осигурати заштиту метала завара и осталих делова споја загрејаних изнад 200°C. Предност МИГ-а јесте топљење веће количине метала у јединици времена уз исту јачину струје. За плоче које су дебље од 12 mm МИГ је исплативији начин заваривања од ТИГ-а. Међутим, лоша стабилност електричног лука може проузроковати прскање током заваривања што смањује учинковитост поступка.

Електрична енергија се обезбеђује из извора струје који је спојен на мрежу. Струја заваривања се из извора спроводи проводницима, од којих је један спојен на основни материјал, а други на контактну вођицу пиштоља за заваривање. Пиштољ (горионик) може истовремено избацивати димне гасове који настају при заваривања. Пиштољи за заваривање могу бити са воденим и ваздушним хлађењем. Пре почетка заваривања укључује се извор струје, подешава се проток гаса и параметри заваривања (пре свега напон и брзина додавања електродне жице). Заваривач приликом полуаутоматског заваривања приноси пиштољ радном комаду и притиском на прекидач на пиштољу успоставља електрични лук и започиње процес заваривања. Магнетни вентил се отвара за проток заштитног гаса, а потом додавач додаје електродну жицу. Прво потекне заштитни гас, а затим излази електродна жица. Чим жица додирне радни комад, затвара се струјно коло и успоставља се електрични лук. Заваривач помера пиштољ одређеном брзином у смеру заваривања и заварује дређеном техником заваривања. Под утицајем електричног лука, жица и основни материјал се топе, спајајући се у једну целину формирајући метал завара (шава). Схематски приказ процеса заваривања MIG методом приказан је на слици 5.5.

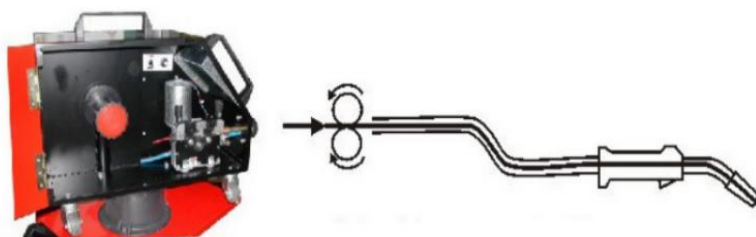


Слика 5.5 Схематски приказ процеса заваривања МИГ начином [18]

Да би се добио квалитетан заварени спој МИГ поступком, електродна жица мора да испуњава одређене услове у погледу хемијског састава, квалитета површине, начина одмотавања са колута током заваривања и тсл. Површина жице мора бити чиста и глатка, тачних димензија (пречник) и мора бити уредно намотана на котур који се поставља у уређај за додавање (тзв. додавач жице).

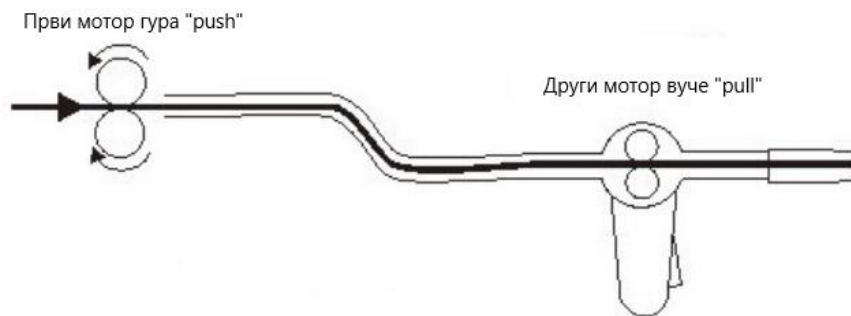
За додавање жице најчешће се користе три начина:

- Жица се одређеном брзином гура помоћу погонских точкова кроз водилу (намотану спиралну челичну жицу звану "бужир") у пиштољу до самог места заваривања. Овај систем је познат под именом "push" (сл. 5.6). Контролисана брзина довођења жице омогућена је електронски регулисаним једносмерним мотором, а сигуран рад омогућују два или четири погонска точкића, који воде жицу и гурају кроз калибрисане прорезе.



Слика 5.6 Схематски приказ "push" механизма за додавање жице

- Жица се контролисаном брзином гура помоћу погонских точкова кроз водилу жице до погонских точкова у пиштољу, који их вуче до места завара. У овом случају други погонски мотор се налази у рукохвату пиштоља. Систем је познат под називом "Pull-push" (сл. 5.7).



Слика 5.7 Схематски приказ "pull-push" система за додавање жице [4]

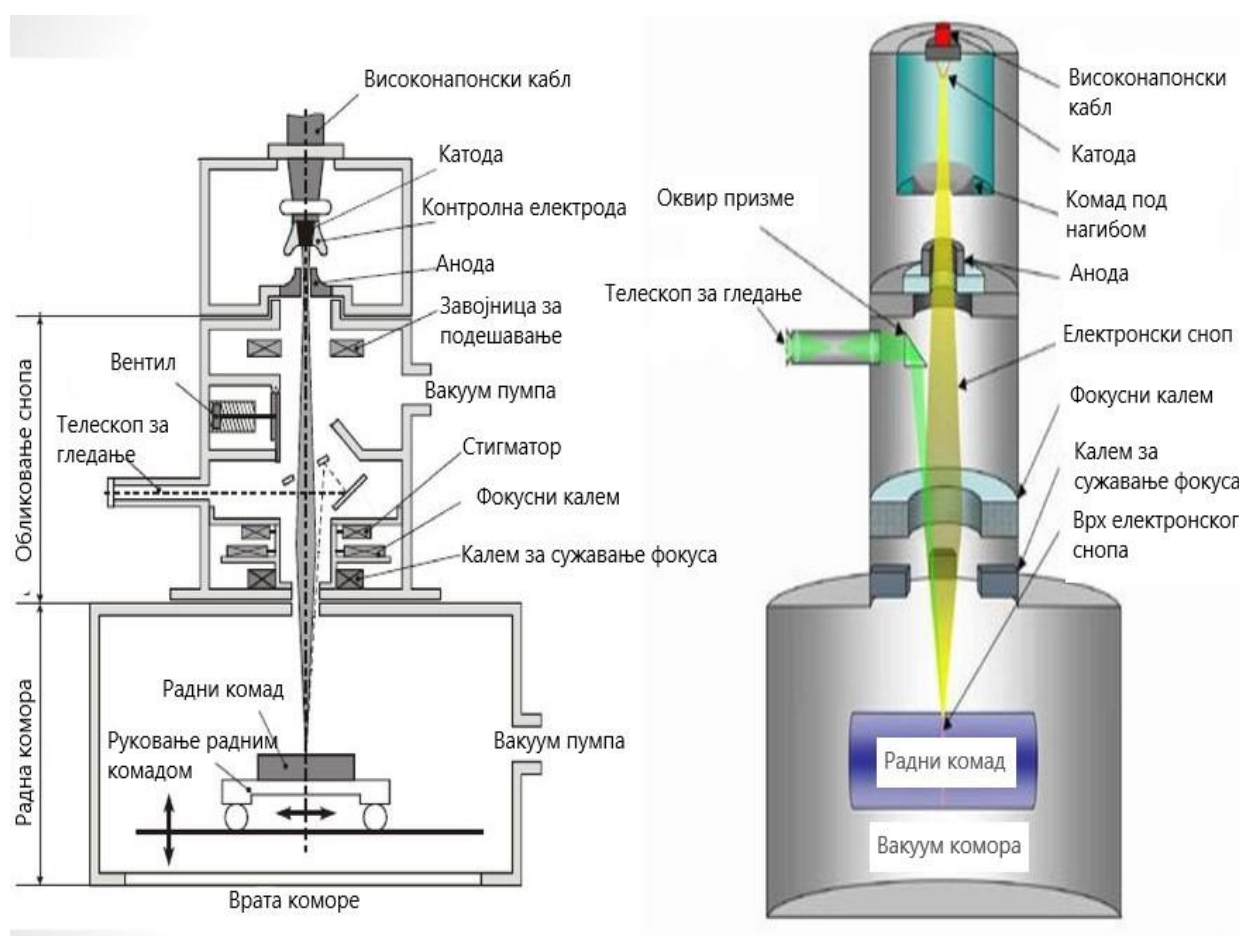
- Последњи поступак додавања жице је "Spool gun" код кога се погон и жица на мањем котуру смештена на руковату пиштоља (сл. 5.8). Котур са жицом је пречника 100 *mm* и може садржати највише до 0.5 *kg* жице. Овим начином се постижу веће удаљености од извора, чак до 15 *m* без већих потешкоћа.



Слика 5.8 "Spool gun" пиштољ за заваривање [20]

5.3 Заваривање електронским снопом

Заваривање електронским снопом прикладно је за титан и његове легуре, јер се изводи у вакуумским коморама (сл. 5.9). Овим методом се заваривање изводи веома прецизно, па се често користи за заваривање у индистијама које захтевају највиши квалитет, посебно у авио-индустији. У том погледу, бољи су од ТИГ и МИГ метода заваривања, али је он доста скупљи због извођења у вакуумским коморама. Још један недостатак је што је величина делова који се могу заваривати овим начином ограничена величином вакуумских комора. Брзине заваривања су веома велике. Поступак приказан на слици 30 користи снап високоенергетских електрона који омогућавају велике дубине продора и заваривање дебелих делова (до 76 mm). Друге предности су врло уска зона утицаја топлоте, мале деформације и чисто заваривање. Ипак највећи недостатак овог начина јесте висока цена опреме.



Слика 5.9 Схеми заваривања електронским снопом (млазом електрона) [21]

5.4 Грешке при заваривању титана

5.4.1 Прслине (пукотине)

Ако је загрејани метал изложен гасовима из ваздуха у току заваривања, лако ће реаговати са кисеоником, азотом, угљеником и водоником. Интерстицијски елементи (N, C, H) улазе у кристалну решетку и спречавају пластичну деформацију и тиме повећавају јачину. Када контаминација наведеним елементима надмаши одређени ниво настају заостали напони чије су вредности веће од напона течења па долази до појаве прслина.

Прслине (пукотине) се могу избећи:

- Уклањањем површинских нечистоћа са радног комада четком од нерђајућег челика или брушењем (коришћењем брусне плоче од алуминијумског оксида или силицијумског карбида, при чему се препоручује нова брусна плоча),
- Темелјним одмашћивањем радног комада ацетоном,
- Добром заштитом инертним гасовима и одржавањем заштите при заваривању док се радни комад не охлади до температуре мање од 260°C,
- Коришћењем заштитног гаса са малим уделом кисеоника и
- Адекватном заштитом врућег краја додатног материјала како не би ступио у реакцију са спољашњом атмосфером.



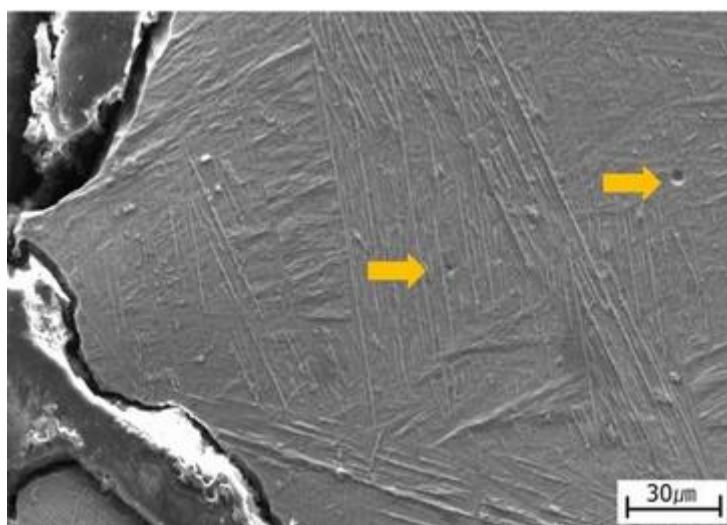
Слика 5.10 Пукотина која је настала при заваривању титана [22]

5.4.2 Повећање кртости услед интерстицијског растварања водоника

Уз претходно споменуте појаве настанка грешака типа прслина (пукотина) због "загађења" елементима из атмосфере, водоник може да буде узрок повећања кртости. Ако је у завару присутна микропрслина, водоникови атоми ће дифундовати у врх прслине. Потом се јављају интерстицијска подручја унутар којих се смештају атоми водоника. При порасту критичне концентрације водоника, титанови хидриди (негативни јони водоника) почињу да се талоче испред врха прслине, док истовремена дифузија водоника унутар прслине може да формира двоатомни гас (молекули водоника), услед чега расте концентрација напона на врху прслине. После неког времена хидриди разарају део испод прслине и последично је шире. После разарања хидриди се поново деле и талоче у новонастали врх прслине (пукотине) чиме започиње нови процес разарања. С обзиром на то да процес зависи од времена и температуре, могу проћи сати, дани, чак и месеци после заваривања, пре него што прслина (пукотина) постане видљива. Процес се спречава смањивањем количине водоника у зони метала који се заварује.

5.4.2 Поре

Поре при заваривању титанових легура су обично величине од око $1\text{ }\mu\text{m}$. Формирају се када концентрација молекуларног кисеоника или водоника достигну критичну концентрацију. При кристализацији заварених спојева молекули наведених гасова могу бити заробљени или се могу спајати са другим молекулима и микропорама стварајући тако макропоре. Макропоре могу остати заробљене у материјалу или могу изаћи на површину метала шавом и нестати. Њихов настанак се избегава адекватном заштитом метала који се заварује, тако да нема присуства кисеоника и водоника за време заваривања. Под заштитом се подразумева и темељно чишћење површина зона завариваних делова, као и заштита инертним гасовима приликом заваривања. Изглед насталих пора при заваривању приказан је на слици 5.11.



Слика 5.11 Поре настале при заваривању цеви Ti-3Al-2.5V-жутије стрелице приказују поре [16]

6. ПРИМЕНА ТИТАНА

Од открића титана 1791. године, титан је био изузетно тражен елемент/метал у производњи. Тек на почетку хладног рата почео је да се употребљава у војној и комерцијалној авио-индустрији. Данас авио-индустрија откупљује највећи део полупроизвода од легура титана. Постоји неколико својстава титана који га чине погодним за ваздухопловну индустрију: висок однос јачине и густине (запреминске масе), његова висока отпорност на корозију и добре особине термостойкости на повишеним температурама. Потражњом за новијим и бољим авионима, порасла је и потражња за титаном и његовим легурама. Земље које имају знатно велики војни буџет, као што су САД, имају велику потражњу за титаном и сматрају да је расположивост титаном питање националне безбедности. Данас комерцијални путнички авиони, попут "AirBusA380" и "BoeingB787", користе много више титана од авиона који су конструисани и произведени раније. Међутим, највећу количину титана ипак троши војна ваздухопловна индустрија. Војни авиони, као што су Ф-22, Ф/А-18, Ц-17, Ф-35 и хеликоптер "UH-60 Black Hawk" (сл. 6.1), су неки од војних ресурса који користе највеће количине титана при производњи.



Слика 6.1 "UH-60 Black Hawk" [23]

Порастом трошкова горива и из економских разлога, потреба за авионима који штеде гориво постала је приоритет. Користећи однос густине и затезне јачине титана, челични делови авиона који су замењени титаном и његовим легурама знатно су лакши, чиме су остварени бројни бенифити (мања потрошња горива, могућност превоза већег броја путника и робе и тсл.). Титан замењује алуминијумске делове у производњи појединих делова летелица због ниске отпорности према топлоти и корозији. Нису само делови и оквири авиона направљени од титана. Произвођачи мотора за авионе такође почињу да користе титан. Велика јачина и ниска густина титана дају произвођачима аеро-мотора широке конструкционе могућности. Делови млазног мотора и ваздушни оквир морају да издрже температуру и до 600°C.

Металургија праха је друга веома важна област примене титана како у војној индустрији тако и за потребе свемирске и ракетне конструкције. Многа возила која је НАСА изградила за путовање у свемир, произведена су од титана. Због велике јачине и мале густине титана у односу на остале метале, његова употреба је постала све

раширенија и у производњи ватреног оружја. Примарна употреба укључује и производњу оквира пиштоља и цилиндри револвера.

Од хемијских једињења највећу примену у индустрији има TiO_2 , који се користи као пигмент-титаново белило. Титаново белило је врло добро средство за заштиту од корозије, притом није отровно као друге оловне боје и има велику површину премаза. То је бели трајни пигмент који се користи у бојама, папиру, пасти за зубе и пластикама и као средство за јачање у палицама за голф. Боја направљена од титан-диоксида отпорна је и на високим температурама и морском окружењу. У козметици и производима за негу коже, TiO_2 се користи као пигмент, али и као средство за згрушавање. Такође се користи и као средство за прављење тетоважа. Овај пигмент се користи при производњи пластике због своје отпорности на ултраљубичасто зрачење. Он апсорбује ултравиолетно (УВ) зрачење, ефикасно га претварајући у топлоту. Због таквих особина користи се у производњи крема за сунчање.

Заварене цеви од титана и процесна опрема користе се у хемијској и петрохемијској индустрији пре свега због високе отпорности на корозију. Специфичне легуре користе се у нафтним и гасним бушотинама због њихове високе чврстоће и отпорности на корозију. Индустрија целулозе и папира користи титан у технолошкој опреми која је изложена корозивним условима. Титанове легуре се користе у оквирима наочара који су прилично скупи, али веома издржљиви, дуготрајни и мале тежине. Због његове отпорности на корозију, контејнери од титана ће се у будућности користити за дуготрајно складиштење и одлагање нуклеарног отпада.

Титан се користи у многим спортским производима: тениским рекетима, штаповима за голф, крикет и хокеј, кацигама, као и у оквирима за бицикле (сл. 6.2).



Слика 6.2 Конструкција бицикла на бази титана и његових легура [24]

Титан се повремено користи и у архитектури. Музеј Гугенхајм (сл. 6.3) у Билбау и библиотека "Cerritos Millennium" биле су прве зграде у Европи и Северној Америци, обложене титанским плочама.



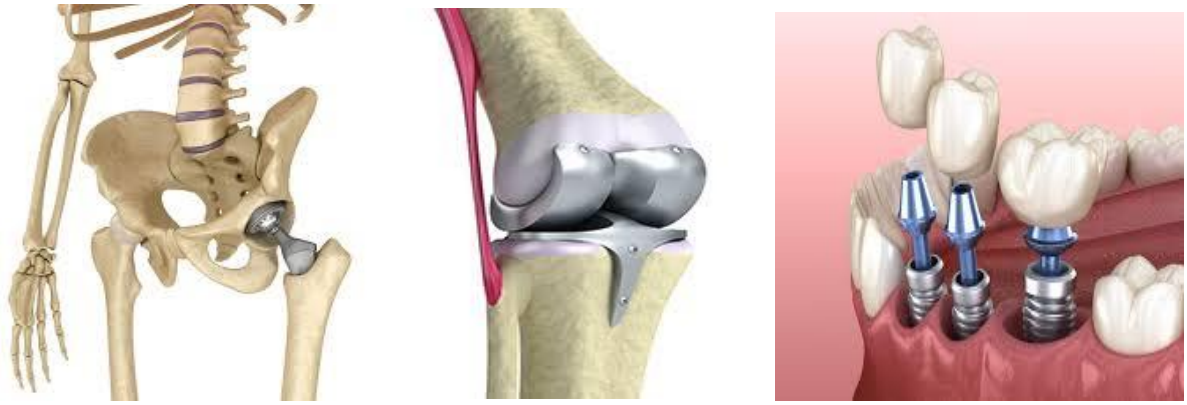
Слика 6.3 Музеј Гугенхајм у Билбау обложен плочама од титана и његових легура [25]

Због своје издржљивости, титан је постао популаран материјал за израду дизајнерског накита. Он је погодан за особе које имају алергију. Такав накит не бледи и отпоран је на корозију. Ако је титан легиран златом, ствара се легура која се може продати као 24-каратно злато (сл. 6.4).



Слика 6.4 Легура 24-каратног злата и титана [26]

Пошто је титан биокompatибилан материјал/метал (нетоксичан и не одбацује га људско тело), он има велику примену у медицини, укључујући хируршке апарате и имплантате, као што су зубни имплантати који могу да остану на месту и до 20 година. Титан се користи за хируршке инструменте који се користе у хирургији, као и за израду инвалидских колица, штака и било којих других производа где је пожељна велика јачина и мала густина (маса, тежина). Комерцијално чист титан се најчешће користи у стоматологији за израду денталних имплантата, мада се користи и у ортопедији у виду жичаних мрежица, које служе као порозне превлаке на површини вештачких зглобова израђених од легура титана.



Слика 6.5 Примена титанових легура у ортопедији и стоматологији [27]

Легуре титана спадају у основне групе металних материјала које се примењују у ортопедији. Легуре титана нису посебно развијене као имплантни материјал у биомедицинском инжењерству, већ су уведене због изузетне специфичне јачине и отпорности према корозији. У поређењу са нерђајућим челицима и кобалт-хром легурама, титан се одликује знатно бољом специфичком чврстоћом, али и лошијим триболошким карактеристикама. Вредност модула еластичности титана је готово упола мања него што је то случај код нерђајућих челика и кобалт-хром легура, док се на собној температури, захваљујући брзој реакцији титана са кисеоником, на површини титана образује веома стабилан пасивизирајући заштитни оксидни филм. Релативно ниске вредности модула еластичности, карактеристичне за легуре титана утичу на смањење крутости конструисаних имплантата без потребе за мењањем њиховог облика. Добар пример за то су вредности аксијалне, савојне, торзионе крутости плочице за фиксацију кости израђене од легуре титана, које су упола ниже него код плочица за фиксацију кости истих димензија и облика, али израђених од нерђајућег челика или легура на бази кобалта. Из тог разлога би у случају примене плочица за фиксацију, које су круто причвршћене за људску кост, напрезање присутно у кости било знатно мање при примени легура титана. Ова разматрања механичких карактеристика легура титана су потврдила да су ове легуре идеалне за производњу уређаја за фиксацију кичмених пршљенова и сломљених костију, укључујући израду плочица, завртњева, вијака, али као и основа за израду вештачких зглобова и зглобних имплантата.

7. ЗАКЉУЧАК

Титан се најчешће добија из руде рутила. Титан је условно лак метал, који има изузетне механичке особине, високу температуру топљења и изванредну отпорност према корозији - не кородира у хладној и врелој, нити у сланој води, као и у већини агресивних раствора. Технички чист титан се испоручује у облику плоча, лимова, цеви, шипки и жица. Својства отпорности чистог титана се поправљају пластичном прерадом на хладно, легирањем и термичком обрадом. Жарење титана изводи се у вакууму или инертној атмосфери и на тај начин се повећавају својства пластичности титана. Титан се углавном примењује за скелете авиона, као у хемијској индустрији, јер га одликује велики однос јачине према запреминској маси. Титан и његове легуре примењују се углавном тамо где је потребно смањити тежину, а повећати отпорност на корозију, као што су: авионска индустрија, рударство, бродоградња, хемијска индустрија и тсл. Титан је бикомпатибилни материјал, што значи да га људски организам не одбацује. Одлична механичка својства и биолошка инертност титана, уз високу корозивну постојаност, омогућила су му да се примењује као биоматеријал за импланте у медицини. Титан се добро кује, ваља (прерађује се на топло у интервалу 800-950°C). Титан и његове легуре се сматрају условно заварљивим металима, захваљујући пре свега термофизичким својствима: високом специфичном електричном отпору, ниском коефицијенту термичког ширења, ниској термичкој проводности. Будући да је склон упијању гасова из ваздуха заварује се методима у заштити инертних гасова и специјалним коморама. Такође, титан и његове легуре имају погоршану ливкост и слично заваривању лију се под посебним условима заштите лива.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Јовановић Милорад, Лазић Вукић, Арсић Душан, *Наука о материјалима*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [2] Јовановић Милорад, Адамовић Драган, Лазић Вукић, Ратковић Нада, *Машински материјали*, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [3] Јовановић Милорад, Лазић Вукић, *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [4] Несторовић Благоје, *Титан и његове легуре*, Дипломски рад, Машински факултет, Универзитет "Светозар Марковић", Крагујевац, 1984.
- [5] <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/magnesium-chloride> - приступљено: 17.6.2020
- [6] <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/58/03/319.pdf> - приступљено: 17.6.2020.
- [7] http://www.teamupair.com/index.php?route=product/product&product_id=122 - приатупљено: 20.6.2020.
- [8] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128172001000119> - приступљено: 21.6.2020.
- [9] <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-017-2664-4> - приступљено: 1.7.2020.
- [10] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/alpha-titanium-alloys> - приступљено: 5.7.2020.
- [11] <https://www.popularmechanics.com/military/aviation/a27962424/sr-71-blackbird/> - - приступљено: 17.7.2020
- [12] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/beta-titanium-alloys> - приступљено: 21.7.2020
- [13] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/alpha-beta-titanium-alloys> - приступљено: 29.7.2020
- [14] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/titanium-101-best-tig-gta-welding-practices> - приступљено: 29.7.2020
- [15] <https://tigweldingproject.wordpress.com/2016/03/31/basic-mechanism-of-tig-welding/> - приступљено: 2.8.2020
- [16] <http://brif.rs/Spool-Mig-Welding-Wire-70S6-Weldcote-023/206674.pdf> - приступљено: 11.8.2020
- [17] <https://www.ck-worldwide.com/purge-chamber-121.html> - приступљено: 11.8.2020.
- [18] <http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Lettvektdesign/joining%20methods/joining-welding-MIG.htm> - приступљено: 11.8.2020.
- [19] <https://www.weldlogic.co.uk/inert-gas-chambers-welding-gloveboxes/> - приступљено: 11.8.2020.

- [20] <https://www.cigweld.com.au/product/tweco-sgt250-spool-gun/> - приступљено: 16.8.2020.
- [21] <https://www.mech4study.com/2017/04/electron-beam-welding-principle-working-equipment-application-advantages-and-disadvantages.html> - приступљено: 16.8.2020.
- [22] <https://www.mig-welding.co.uk/forum/threads/titanium-weld-cracking.62966/> - приступљено: 16.8.2020.
- [23] <https://newatlas.com/sikorsky-black-hawk-helicopter-firefighting-australia/50668/> - приступљено: 16.8.2020.
- [24] <https://bossibicycles.com/products/grit-titanium-gravel-bike> - приступљено: 17.8.2020.
- [25] <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/3156/820/frenk-geri-gugenhajm-muzej-u-bilbaou> - приступљено: 17.8.2020.
- [26] <https://www.findurings.com/mens-titanium-wedding-bands-gold-and-silver-two-tone-rings.html> - приступљено: 17.8.2020.
- [27] <https://www.wimpoledentaloffice.com/zirconia-dental-implants-vs-titanium-implants-for-your-teeth-problem> - приступљено: 17.8.2020.