

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије (ТЗ)

Број индекса: 72/2014

Војислав Б. Велић

**Заваривање алуминијума, титана, бакра и
њихових легура**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазич-ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

1. Опише најважнија својства алумунијума, бакра и титана (хемијска, физичка, механичка и технолошка),
2. Укаже на њихову отежану заварљивост и објасни комплексно својство заварљивости,
3. Наведете и укратко опишите најважније методе заваривања топљењем и
4. Наведете највећу примену заварених конструкција од ових материјала и њихових легура.

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
2. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
3. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: *Технологија заваривања – приручник*, друго издање, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.

У Крагујевцу, 2017. године

Ментор:
Проф. др Вукић Лазић

Резиме

У овом раду се нешто опширније разматрају најважнији обојени метали и њихове легуре, пре свега алуминијум, бакар, титан и њихове легуре. Осим тога, разматра се њихова заварљивост, односно погодност за заваривање. Такође, дат је преглед и опис најважнијих метода заваривања, као и најважнији технолошки параметри заваривања наведених метала. Наведене су и најважније области примене ових метала.

Кључне речи: обојени метали, легуре обојених метала, алуминијум, бакар, титан, заваривање, начини заваривања.

Summary

In this work, non-ferrous metals, aluminium, copper, titanium and its alloys are considered. Besides, it is presented its weldability i.e. possibilities for welding. Also, the work contains review and description welding of the most important welding methods and welding parameters of mentioned metals. In the end, the most important area of application of these metals it is given.

Key words: non-ferrous metals, alloys coloured metals, aluminium, copper, titanium, welding, arc welding processes.

Садржај

1. УВОД	1
2. ОБОЈЕНИ МЕТАЛИ И ЊИХОВЕ ЛЕГУРЕ.....	7
2.1 Алуминијум и његове легуре.....	7
2.1.1 Технички чист алуминијум.....	9
2.1.2 Легуре алуминијума.....	10
2.2 Титан и његове легуре	17
2.2.1 Легуре титана	19
2.3 Бакар и његове легуре	21
2.3.1 Легуре бакра	22
2.3.2 Месинг.....	22
2.3.3 Бронза.....	25
3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ АЛУМИНИЈУМА, ТИТАНА И БАКРА	27
3.1 Заварљивост алуминијума и његових легура	28
3.2 Заварљивост титана, бакра и њихових легура.....	31
4 МЕТОДЕ ЗАВАРИВАЊА (MIG, TIG, REL, GPZ).....	33
4.1 MIG поступак заваривања.....	33
4.1.1 MIG заваривање алуминијума	37
4.1.2 MIG заваривање бакра.....	39
4.1.3 MIG заваривање титана	39
4.2 TIG заваривање	40
4.2.1 TIG заваривање алуминијума	43
4.2.2 TIG заваривање бакра.....	46
4.3 REL заваривање.....	47
4.3.1 REL заваривање алуминијума.....	48
4.3.1 REL заваривање бакра	50
4.4 GPZ заваривање.....	50
4.4.1 GPZ заваривање алуминијума и бакра.....	51
5. ЗАКЉУЧАК	52
6. ЛИТЕРАТУРА.....	53

1. УВОД

Заваривање је процес израде нераздвојивог споја успостављањем међуатомских веза између делова који се заварују, при коме се појединачно или комбиновано користи топлотна и механичка енергија, а по потреби и додатни материјал. Заваривањем се успешно спајају: метал и метал, неметал и неметал, као и неметал и метал. Ипак, најширу примену има спајање метала.

Заваривање има широку и веома разнородну примену у машинству и другим индустријским гранама. Омогућује израду машинских делова и целе конструкције спајањем делова једноставног облика. Ови су делови претежно израђени од масивних железарских полупроизвода, као што су лимови, профили или у комбинацији са одливцима и отковцима. Даља је примена при репаратури или регенерацији похабаних делова и целе опреме [3]. На слици 1.1 приказан је метод REL заваривања.

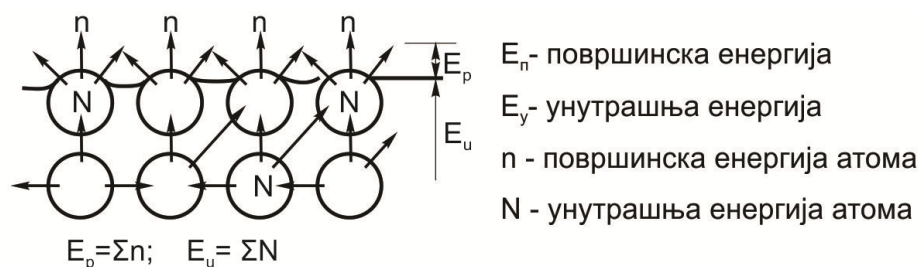


Слика 1.1 Приказ заваривања [4]

Суштина заваривања метала је образовање металуршког споја, тј. споја створеног дејством међуатомских привлачних сила, које су узрок повезивања површине метала, то значи сила које одржавају веома ефикасно узајамне положаје и растојања атома који образују кристалне решетке унутар дела. Истовремено такође обезбеђују стални облик металних предмета (супротно од других метода спајања – закивање, везе остварене помоћу завртњева, клинова и др.).

Да би између атома граничних површина два метала почеле деловати привлачне силе потребно је приближити атоме на размак мањи од параметра кристалне решетке. Ако се то оствари по целој додирној површини два метала нестане граница између њих и добиће се мање или више савршен спој (шав, завар). Површински и потповршински слојеви знатно се разликују по својим особинама од унутрашњости материјала.

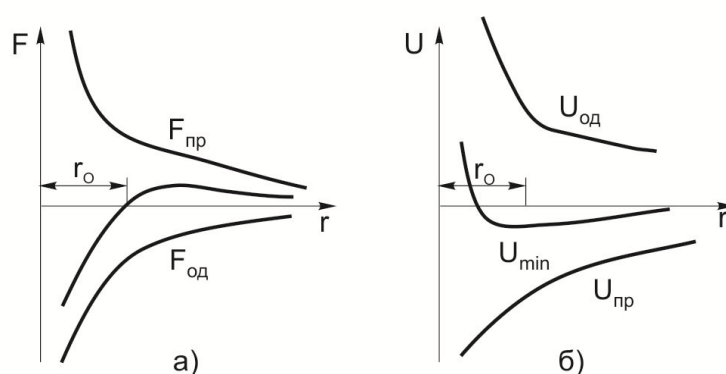
Слојеви који раздвајају делове (објекте) који се додирују имају по правилу друкчију атомно-молекуларну грађу него ти предмети. Вишак енергије на површини материјала над одговарајућом енергијом у његовој унутрашњости носи назив *слободна површинска енергија*. Појам површинске појаве обухвата скуп појава везаних посебно за особине површинских слојева. Оне су последица специфичних физичких услова у којима се налазе атоми и молекули у близини граничних површина. Површински слојеви поседују одређену слободну енергију, повећану активност, одређену оријентацију молекула и одређени хемијски састав који се знатно разликује од хемијског састава целог дела. Код свих површинских појава велику улогу игра промена површинске енергије. Проучавањем метала утврђено је да се сваки од њих одликује посебном поликристалитном грађом тј. структуром. Унутрашња грађа метала (легури) условљена је врстом кристалне решетке, распоредом атома, као и присуством и размештајем структурних фаза. Врсте међуатомских веза у чврстим металима одређују њихове физичке, хемијске и механичке особине. Величина енергије међуатомских веза зависи од хемијског састава легуре, као и од врсте кристалне решетке. Унутрашњи атоми у чврстом телу уравнотежени су деловањем околних атома, док спољни поседују површинску енергију јер су неуравнотежени, пошто се граниче са ваздухом или другим срединама (сл. 1.2). Довођењем спољне енергије мења се стање посматраног система, а промена се испољава у већим амплитудама осциловања атома, посебно на граничним површинама. У случају када су спољне енергетске побуде довољно велике може доћи до савлађивања тзв. *енергетске баријере* између два радна метална предмета и образовања заједничке *металне везе*, услед активације валентних електрона и формирања заједничког електронског облака [1].



Слика 1.2 Приказ енергетског стања атома [2]

Ниједним поступком механичке обраде, чак ни полирањем дијамантским прахом, не може се остварити да средња висина неравнина буде мања од параметра кристалне решетке, већ се довођењем спољне енергије (топлоте) или механичког притиска атоми могу довољно примаћи да настане јака атомска (метална) веза. У случају заваривања

притиском за време приближавања два тела настају електростатичке силе привлачења и одбијања услед дејства јона и електрона распоређених на граничним површинама и гравитациона сила. На неком растојању r_0 укупне силе привлачења и одбијања, $F_{пр}$ и $F_{од}$, су у равнотежи (сл. 1.3а), при чему настаје највећа разлика одговарајућих потенцијалних енергија, $U_{пр}$ и $U_{од}$ (сл. 1.3б), што се назива енергетском баријером. Равнотежно међуатомско растојање r_0 приближно одговара параметру кристалне решетке, а даљим приближавањем граничних површина настаје *метална веза*.



Слика 1.3 Зависност сила (а) и енергија (б) од међуатомског растојања [2]

Стога произлази да се спајање заваривањем може остварити само истовременим деловањем следећих фактора:

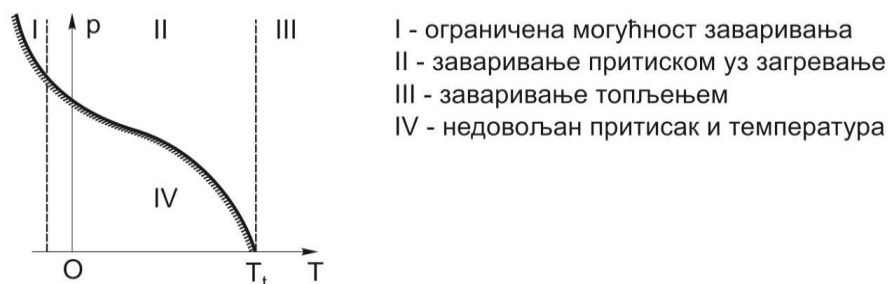
1. Међусобним приближавањем делова (сл. 1.4а),
2. Довођењем потребне количине енергије, нпр. притиска (сл. 1.4б) и
3. Дифузијом и прекристализацијом (сл. 1.4в).



Слика 1.4 Фазе образовања споја притиском [2]

Уколико се допунски доведе топлотна енергија делови се загревају и омекшавају, а повећава се њихова пластичност, побољшавају дифузиони процеси па тиме расте и могућност да површински атоми лакше савладају енергетску баријеру. Из овога произлази да се са физичке тачке гледишта спајање заваривањем може остварити деловањем притиска, довођењем топлоте и комбиновано. Услови за образовање завареног споја могу се приказати и помоћу дијаграма притисак-температура (сл. 1.5).

За сваки метал се могу конструисати овакви дијаграми и одредити граничне вредности и подручја притисака и температуре потребних за остварење споја.

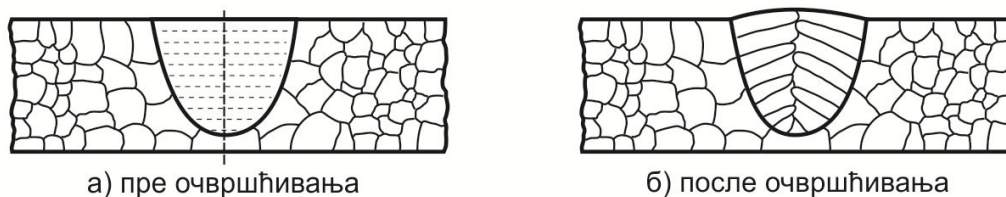


Слика 1.5 Приказ граничних параметара заваривања (T_t - температура топљења) [2]

Према појавама које условљавају образовање завареног споја разликују се:

1. Заваривање топљењем,
2. Заваривање притиском и
3. Комбиновано (термомеханичко) заваривање.

Заваривање топљењем је процес нераздвојивог спајања завариваних делова при температурама на месту спајања вишим од температуре топљења, уз примену додатног материјала или без њега (сл. 1.6). За заваривање топљењем неопходни су снажни извори топлоте за локално топљење метала. Тако се образује метални растоп-заваривачко купатило, чијом кристализацијом настаје шав. Практично се користе покретни извори топлоте који се крећу дуж линије споја. У овом случају енергетска баријера је савладана, јер се атомске везе успостављају хлађењем и очвршћивањем металне купке (металног купатила). Заваривање притиском је процес спајања применом механичког дејства силе, статичког или динамичког карактера (сл. 1.4). У пракси ови процеси спајања нису увек јасно разграничени. Ако се код појединих метода допуњују топлота и притисак, спајање спада у поступке термомеханичког заваривања. Исто тако, у процесе сродне заваривању убрајају се: термичко резање, жлебљење, наваривање, метализација, а такође и лемљење и лепљење.



Слика 1.6 Заваривање топљењем [2]

Без обзира на врсту енергије која се користи (електрична, хемијска, механичка, топлотна), увек је потребно да количина доведене енергије буде већа од енергије потребне за активацију атома, то јест њихово побуђивање, као услов за међусобно спајање. Због бројних начина и поступака заваривања постоји већи број могућих класификација, према:

- Намени (заваривање, наваривање, метализација);
- Агрегатном стању (топљењем, притиском);
- Врсти електрода (топливом, нетопливом, обложеном електродом, голом жицом, пуњеном жицом и тсл.);
- Заштити растопа (без заштитне атмосфере или у заштитној атмосфери – инертног или активног гаса);
- Стању електричног лука (са отвореним, покривеним луком, итд.);
- Врсти енергије.

У **поступке заваривања притиском** спадају: хладно заваривање, заваривање трењем, заваривање ултразвуком, заваривање експлозијом и др.

У **поступке заваривање топљењем** спадају: гасно заваривање (заваривање пламеном или окси-ацетиленско заваривање), електричним луком обложеном електродом (или ручно-електролучно заваривање – REL, понекад се у литератури означава и као Е- заваривање), аутоматско заваривање под прахом (ЕРР), електричним луком у заштитном гасу (MIG, MAG, TIG), електролучно под троском (ЕРТ), термитно (алуминотермијско) заваривање, плазмено заваривање, заваривање електронским снопом, ласерско заваривање и др. Карактеристике споја топљењем углавном су: нехомогеност структуре, хемијског састава, физичких и механичких особина, чиме долази до промене механичких и технолошких особина у споју - зони утицаја топлоте (ЗУТ-а) и у шаву. Нарочито неповољно утичу:

- Ливена структура метала шави;
- Физичке и хемијске примесе у металу шави у току заваривања (оксидација, разугљеничење, образовање нитрида, апсорпција гасова, дифузија елемената између шави и основног материјала – ОМ и др.);
- Појава унутрашњих грешака у металу шави (грешке типа прслина: хладне, топле, ламеларне и прслине жарења, неметални укључци, гасни мехурови и др.);
- Структурне промене у ЗУТ-у (грубозрнаста структура, закаљивање, отпусна кртост, старење);
- Појава унутрашњих напона и деформација, због термичке дилатације при загревању и хлађењу.

Термомеханичко заваривање остварује се превођењем зоне спајања у стање пластичности и затим увођење силе притиска. Сила притиска може бити ударна (ковачко заваривање), или се уводи постепено: заваривање електричним отпором, плазмено заваривање притиском, термитно заваривање притиском, индукционо заваривање притиском и др.

При избору поступка заваривања потребно је више фактора узети у обзир:

- Квалитет и димензије завариваног материјала са свим његовим особинама које карактеришу његова физичко-технолошка својства (јачина, пластичност, заварљивост и др.);
- Количину и квалитет производа, као и економичност завареног производа;
- Карактеристике извора енергије, односно расположиву опрему за извођење радова, као и потребно време израде;
- Величину заварене конструкције, односно елемената, што је од утицаја на избор места заваривања – у радионици или на терену; крупногабаритни делови и конструкције заварују се помоћу ручних или полуаутоматизованих преносних уређаја. Елементи и конструкције малих димензија могу се заваривати, зависно од броја комада, било механизованим процесима или ручно;
- Цену уређаја.

Врста контроле заварених спојева мо бити:

- Визуелна (очна),
- Рендгенска (радиографска: помоћу x и γ -зрака),
- Ултразвучна,
- Магнетна,
- Пенетрантна,
- Металографска и др.

2. ОБОЈЕНИ МЕТАЛИ И ЊИХОВЕ ЛЕГУРЕ

2.1 Алуминијум и његове легуре

Припада групи лаких обојених метала, јер је густина алуминијума 2.7 g/cm^3 , што значи да је око три пута лакши од гвожђа. Добија се из руде боксита електрометалуршким методама. Одликује се добром електричном ($38 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$) и топлотном ($200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) проводношћу. Алуминијум је неалотропски метал са површински центрираном кубном кристалном решетком. Такође се одликује добром обрадивошћу деформисањем на топло и хладно, отпорношћу на атмосферску корозију, али има малу јачину. Температура топљења алуминијума је 660°C . Механичке и технолошке особине хемијски чистог Al (99.99%), и технички чистог Al (99.5%) (металуршког) дате су у табели 2.1, одакле се уочава утицај чистоће Al на његове механичке особине. У циљу добијања веома чистог алуминијума, обичан Al се пречишћава (рафинише) такође електрометалуршким методама. У пракси се не примењује хемијски чист већ металуршки алуминијум. Најчешће примесе у Al су Fe и Si које потичу из полазних сировина и тешко се одстрањују. Већ при садржају изнад 0.05% Fe (граница чврстог раствора α) појављује се еутектикум ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$) који негативно утиче на обрадивост деформисањем и отпорност на корозију. Растворљивост Cu у Al (чврст раствор α) је у поређењу са растворљивошћу Fe вишег реда, али груби игличасти кристали силицијума излучени као β -фаза утичу на особине Al слично као и еутектикум ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$). При истовременом присуству примеса Fe и Si снижава се чистоћа алуминијума на 99.5% и мање, па се образује комплексна фаза $\text{Al}_m\text{Fe}_n\text{Si}$ уместо фазе β , тј. чистих кристала Si.

Табела 2.1 Особине чистог Al у жареном стању при температури 20°C [1]

Механичке особине		Al 99.99	Al 99.5
Техничка граница течења	$R_{p0.2}$, МПа	15	50
Јачина на кидање	R_m , МПа	50	80
Издужење	$A_{5.65}$, %	45	30
Контракција	Z , %	90	70
Модул еластичности	E , МПа	71000	71000
Тврдоћа	НВ	15	20
Технолошке особине			
Обрадивост на хладно		Веома добра	
Обрадивост на топло		Веома добра	
Обрадивост резањем		Добра	
Ливкост		Отежана	
Заварљивост		Веома добра, условна	
Лемљивост		Добра	
Електрична и топлотна проводљивост		Добра	
Корозиона отпорност		Добра	
Декоративна способност		Добра	

Алуминијумски одливци (сл. 2.1) склони су ка порозности због растварања водоника у растопу, јер се одливци од Al-легура лију у влажним пешчаним калупима; тог проблема нема при ливењу у кокилама или под притиском. Сличан проблем настаје и при заваривању алуминијумских легура, па се морају применити технологије које дају веома низак садржај водоника у металу шави (углавном у заштити аргона).



Слика 2.1 Калуп за ливење једног од различитих облика од алуминијума [5]

2.1.1 Технички чист алуминијум

Технички чист алуминијум (Al 99.5) добро проводи електричну струју па алуминијумске жице служе за пренос електричне струје на далеководима или нисконапонској мрежи. С обзиром на малу јачину жица од чистог алуминијума, за далекове се користе комбинована челично-алуминијумска ужад. Јачина челичне жице достиже 1200 МПа, а око ње су уплетене алуминијумске жице. Слични проводници употребљавају се и за тролејбуске мреже. Такође се од алуминијумских жица израђују намотаји генератора и електромотора. Добра топлотна проводљивост, као и велика отпорност алуминијума на деловање знатног броја хемикалија и животних намирница, довела је до његове широке примене у хемијској и прехранбеној индустрији, као и у домаћинству. Исто тако се алуминијум употребљава за метализацију у бродоградњи, вагоноградњи и архитектури. Сем тога, алуминијум се користи као дезоксидатор у металургији челика и као састојак мешавине за термитно заваривање. Добра корозивна отпорност алуминијума често се вештачки поправља поступком елоксирања, тј. повећањем дебљине оксидног слоја Al_2O_3 који у ствари штити од корозије. Тако, та дебљина достиже 10 μm , што је углавном довољно у хемијској и прехранбеној индустрији. Од укупне количине произведеног технички чистог Al прерађује се око 35% у полупроизводе, а око 65% служи за производњу алуминијумских легура (силумина, дурала и др.).

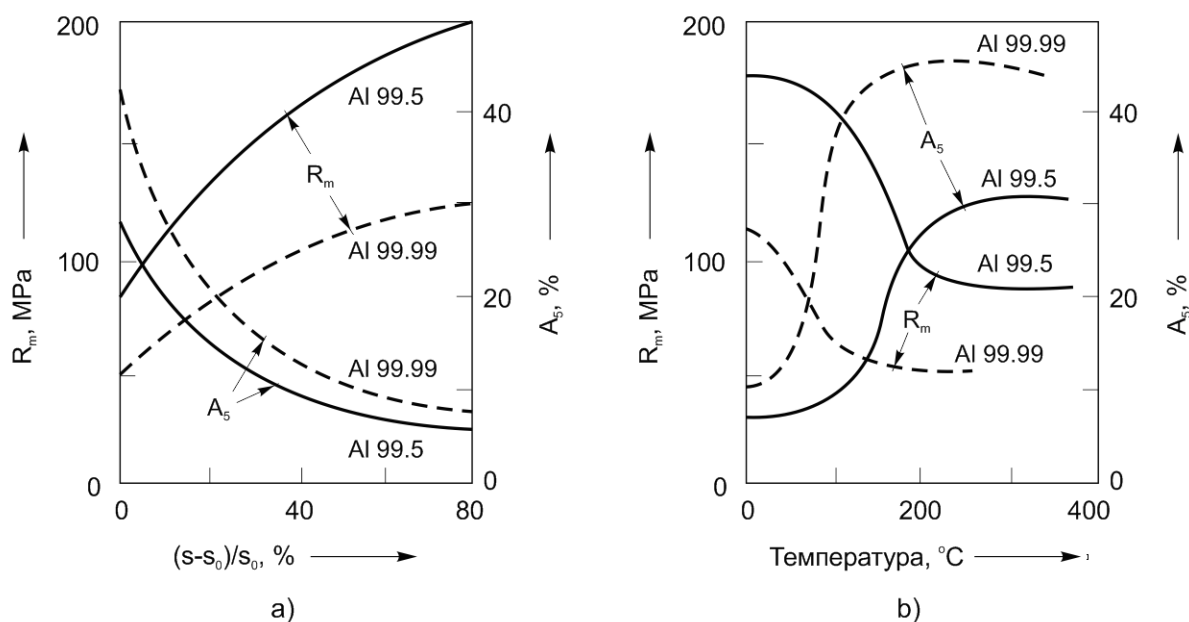
Отпорност алуминијума према корозији

Као што је горенаведено, отпорност према корозији код Al се постиже стварањем заштитног оксидног слоја Al_2O_3 на температури околине. Тај слој досеже до дубине око 0.1 μm . Овај оксид чини Al стабилним на ваздуху и у морској води. Корозији у активним срединама алуминијум одолева тим боље што је чистији. Међутим не одолева хидроксидима (NaOH, KOH), нити киселинама халогених елемената (HCl, HF).

Механичке особине чистог алуминијума

Технички чист алуминијум има ниску јачину, али се она може повећати прерадом на хладно. Величина деформационог ојачања, при истом степену прераде, обрнуто је сразмерна чистоћи алуминијума (сл. 2.2а); ток опорављања, тј. пораста истегљивости (издужења $A_{5.65}$, %) и пада јачине (R_m) при рекристализационом жарењу, дат је на слици 2.2б. Степен прераде на хладно дефинише се односом $(s-s_0)/s_0$, где је: s_0 - почетна, а s - крајња дебљина траке од лима. У току етапе опорављања код алуминијума је

карактеристична полигонизација (издужена зрна постају равноосна), што успорава ток стварања и раста нових зрна. Код веома чистог алуминијума и већих степена прераде те промене започињу већ и на собној температури. Рекристализациона температура Al 99.5 при средњем степену прераде, износи око 150°C (сл. 2.2б). У пракси се рекристализационо жарење обавља на температури 300-400°C. Прерада алуминијума на топло, као уосталом и других метала, одвија се на температури вишој од температуре рекристализације, углавном у опсегу 350-500°C. Полазни материјал за израду алуминијумских полупроизвода: шипки, профила, цеви, лимова, трака и жица поступком деформисања јесу гредице или слабови произведени континуалним ливењем. Жице већег пречника праве се у две фазе: најпре континуалним ливењем и потом ваљањем. Алуминијумске жице мањих пречника производе се вучењем на хладно кроз отворе у плочи (калибре) одговарајућег пречника.



Слика 2.2 Промена јачине R_m и истегљивости $A_{5,65}$ технички чистог алуминијума:

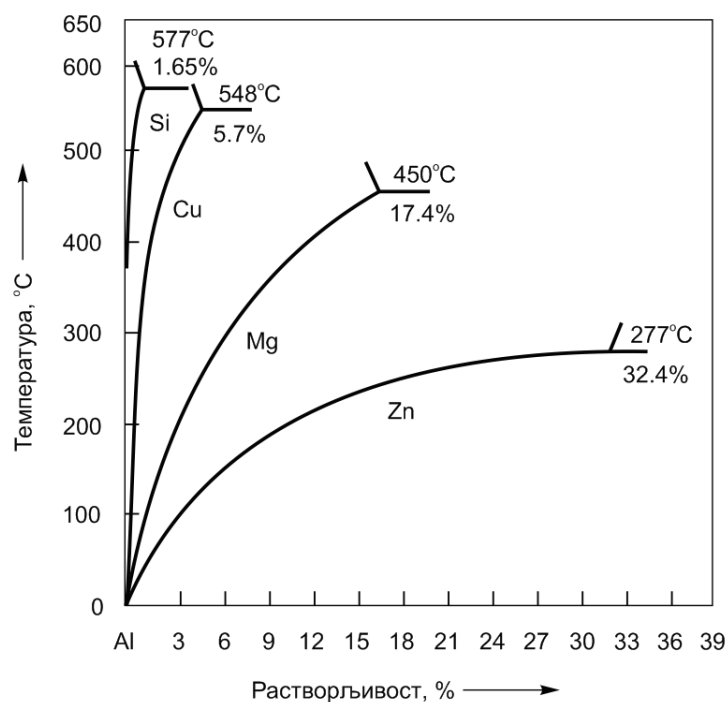
а) у зависности од степена прераде на хладно $\frac{(s - s_0)}{s_0}$, б) у зависности од температуре

рекрстализационог жарења ($\frac{s - s_0}{s_0} \cdot 100 = 50\%$, време жарења 1 h) [1]

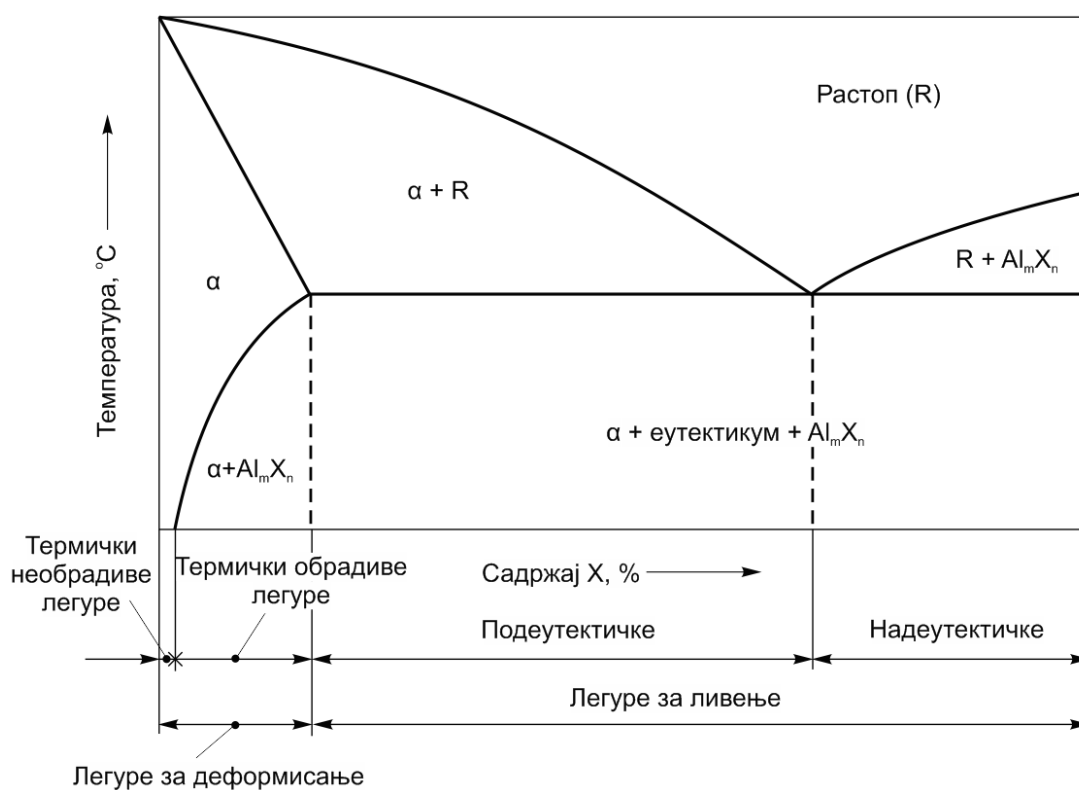
2.1.2 Легуре алуминијума

Да би се алуминијуму поправиле механичке и технолошке особине (пластичност и ливкост), он се легира различитим елементима (Si, Cu, Mg, Mn, Zn,...) чија је растворљивост у Al дата на слици 2.3. Већина ових елемената гради ограничене чврсте растворе у површински центрираној кубној решетци Al, а њихов вишак образује са

алуминијумом хемијска једињења и при већем садржају еутектичке мешавине. О погодности легура алуминијума за пластичну прераду може се закључити разматрањем равнотежног дијаграма стања датог система. Ради упрошћења узећемо само бинарни систем Al - X (сл. 2.4), премда су алуминијумске легуре претежно вишекомпонентне.



Слика 2.3 Растворљивост Si, Cu, Mg и Zn у алуминијуму [1]



Слика 2.4 Шема бинарног равнотежног дијаграма Al - X (X - легирајући елемент) [1]

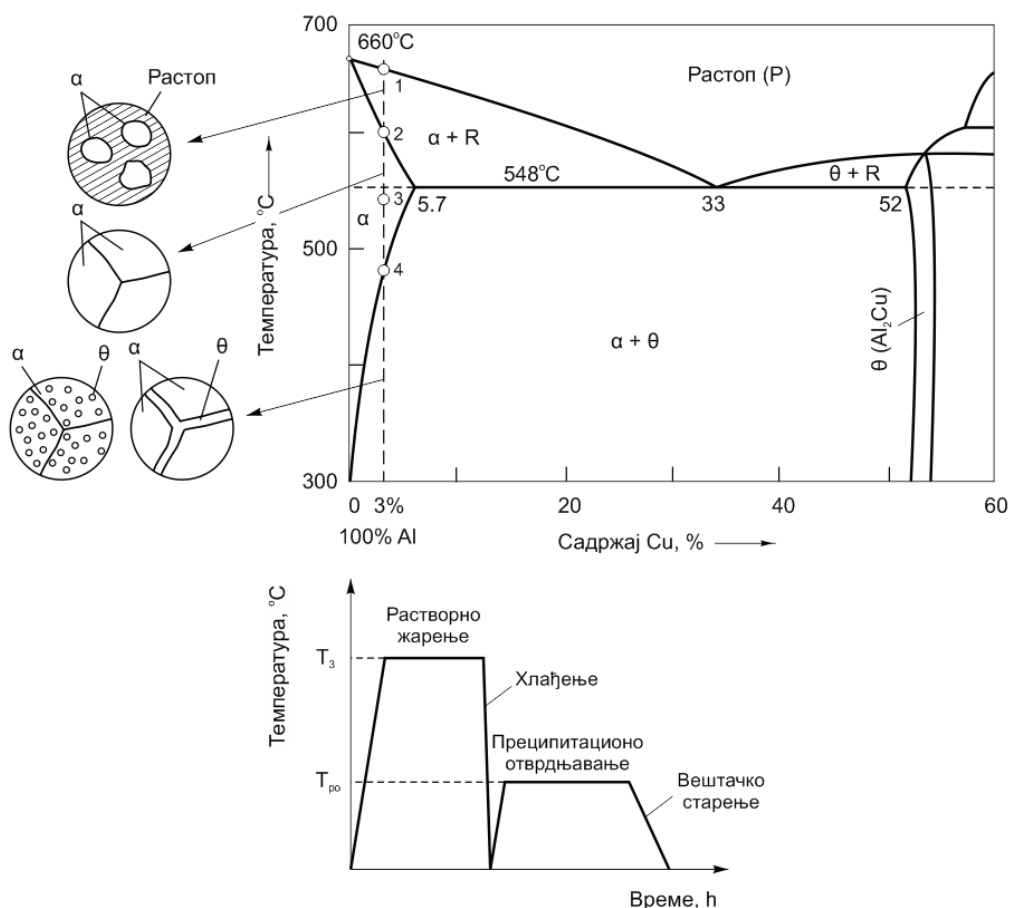
Хомогене легуре, или легуре које се загревањем могу превести у хомогено стање (α -фаза, сл. 2.4), истегљиве су, тј. погодне за пластичну обраду (ваљање, ковање, пресовање). Легуре које у структури садрже еутектикум погодне су за ливење. Легуре које на собној температури садрже у структури продукте сегрегације (сегрегате) могу се таложно ојачавати. Код неких легура, иако се могу ојачавати, то се избегава јер се тиме не може постићи повољна комбинација механичких особина и отпорности на корозију.

Према начину прераде полуфабриката у готове производе разликују се:

- легуре за пластичну прераду (ковне легуре) и
- легуре за ливење (ливачке легуре).

Структура и термичка обрада легура алуминијума

Одливци алуминијумских легура, па чак и неке легуре после прераде деформисањем имају углавном малу јачину, уз истовремено високу издужење (истегљивост). Корисно повећање јачине може се постићи одговарајућом термичком обрадом која се заснива на загревању дела до одређене температуре, држању (прогревању) при тој температури и затим брзом хлађењу у води. Брзим хлађењем чврстог раствора образованог при високој температури, тај се раствор задржава и на собној температури. Описани термички поступак који обухвата загревање, прогревање и хлађење зове се *пресићење*. После тога одвијају се веома сложени процеси таложног (преципитационог) ојачавања, уско повезани са појавом тзв. *старења*. Ова појава се донедавно објашњавала дисперзионим излучивањем нове фазе из претходно пресићеног чврстог раствора. Типична термичка обрада већине Al-легура управо је *таложно ојачавање* или *отврдњавање*. При овоме, таложе се fine и равномерно распоређене (дисперговане) честице које делују као препрека кретању дислокација и тиме доводе до ојачања легуре. Суштина микроструктурних процеса који се дешавају при таложном ојачању може се објаснити на примеру бинарног система Al-Cu (сл. 2.5).



Слика 2.5 Бинарни равнотежни дијаграм Al - Cu (горе) и шематски приказ температура растворног жарења и отврдњавања (доле) [1]

Растворљивост Cu у чврстом раствору α опада са 5.7% при температури од 548°C на свега 0.10% на собној температури, чиме је испуњена основна претпоставка за образовање пресићеног чврстог раствора при брзом хлађењу из α -зоне. Ако изаберемо, нпр. легуру са садржајем 3% Cu, видимо да она на собној температури има хетерогену структуру коју чине чврст раствор α и сегрегата фазе $\theta (Al_2Cu)$, излучен на границама зрна (сл. 2.5). Релативни удео сегрегата расте кад се састав легуре приближава максималној растворљивости бакра (5.7%) у фази α .

Легуре алуминијума за прераду деформисањем

Најчешћи легирајући елементи код ових легура јесу Mn, Mg, Cu, Zn и Ni.

- Mn повећава јачину, обрадивост деформацијом, рекристализациону температуру, отпорност на корозију и ограничава раст зрна при растворном жарењу;
- Mg повећава јачину и отпорност на корозију;
- Cu, Zn ојачавају легуру, али погоршавају обрадивост деформисањем и отпорност на корозију;
- Ni позитивно утиче на механичке особине нарочито на вишим температурама, као и на отпорност према корозији.

Легуре за деформисање које таложно не ојачавају

У ове легуре спадају двокомпонентне легуре Al-Mn и Al-Mn (таб. 2.2). Испоручују се у облику лимова, штапова, цеви, жица, профила. Растворљивост Mn у фази α је мала. Користе се легуре до 1.5% Mn, јер већ при 2% Mn настају у току кристализације примарни кристали фазе Al_6Mn , који погоршавају механичке особине. Легуре Al-Mn склоне су крупнозрнастој и стубичастој кристализацији, што се спречава микролегирањем (Ti, B, Zr). Ове легуре имају добру отпорност против корозије, добру заварљивост и могу се ојачати прерадом на хладно до $R_m = 200$ МПа (деформационо ојачање). Растворљивост Mg у фази α је знатна, али се избегава таложно ојачавање легуре Al-Mg, јер би незнатно повећање јачине довело до великог смањења истегљивости. Зато се користе легуре које садрже до 5% Mg, јер са порастом Mg расте и удео фазе β (Al_3Mg_2) која погоршава обрадивост деформацијом и отпорност на корозију. Зависност механичких особина пластично прерађених легура Al-Mg од њиховог хемијског састава и стања дата је на слици 2.5. Јако ојачане легуре Al-Mg лако се опорављају (често и на температури околине), али задржавају добре механичке особине и при ниским температурама.

Легуре за деформисање које таложно ојачавају

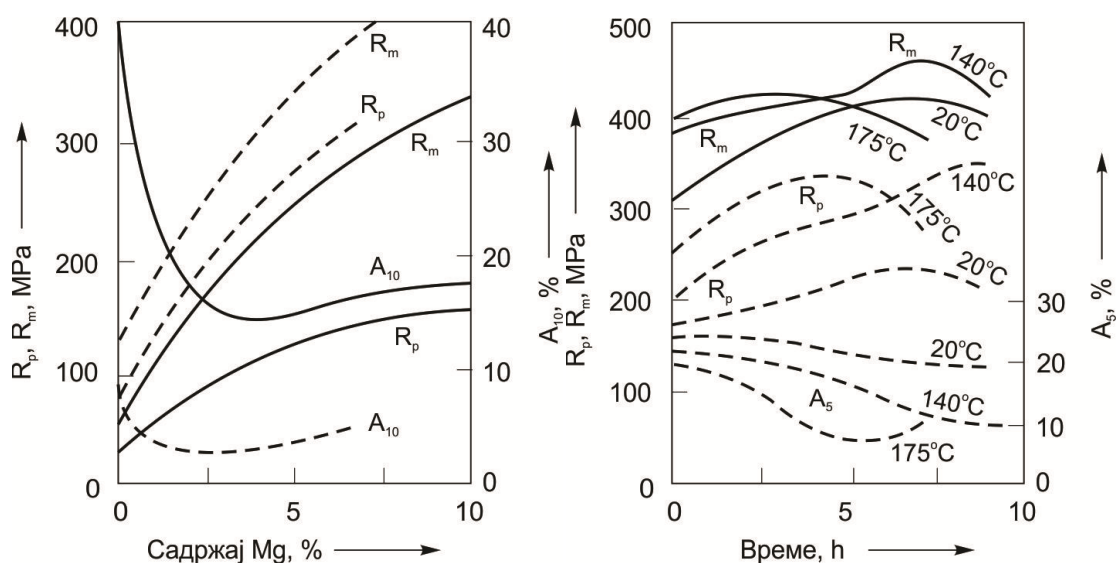
Ове се легуре деле на три групе:

- Al-Cu-Mg-(Ni),
- Al-Mg-Si и
- Al-Zn-Mg-(Cu).

Табела 2.2 Легуре Al за пластичну прераду (бројеви иза легирајућег елемента означавају процентуални садржај тог елемента) [1]

Хемијски састав легура	Примена
AlMn1	Мање оптерећени делови у хемијској и прехранбеној индустрији, заварени резервоари за течност и гасове; служи и за платирање.
AlMg1, AlMg2 AlMg3, AlMg5	Компоненте транспортних средстава, хемијска и прехранбена индустрија, грађевинарство. Легуре AlMg5 познате су под називом хидроналиум.
AlCu4Mg AlCu4Mg1	Авиони, друмска возила, аутомобили (дурал и супердурал); по потреби се елоксирају.
AlCu2Mg	Закивци.
AlCu2Mg2Ni AlMg1Si	Компоненте турбокомпресора, авио и ауто индустрија, прехранбена индустрија, прецизна механика.
AlMgSiFe	Електропроводљива легура.
AlZn4Mg1	Компоненте за средства ваздушног и железничког транспорта, судови под притиском.
AlZn6Mg2Cu	Високооптерећене компоненте.

Највише се употребљавају легуре типа Al-Cu, те ће стога само о њима бити више речи. Легуре састава Al-Cu4-Mg називају се *дурали*, а легуре са повећаним садржајем магнезијума *супердурали* (Al-Cu4-Mg1). Ојачавање ових легура постиже се растворним жарењем и таложним отврдњавањем које траје неколико дана. За то време излучује се тврда фаза Al_2CuMg која доводи до пораста напона течења и јачине, али пада издужења A_5 (сл. 2.6). Са слике се такође уочава да се максимално ојачање постиже вештачким старењем при $140^\circ C$, али је то праћено великим падом релативног издужења. Зато је боље природно старење при $20^\circ C$ којим се постиже јачина од 400 МПа код дурала и 450 МПа код супердурала.



Слика 2.6 Утицај Mg на механичке особине ковних легура Al-Mg у жареном стању (пуна линија) и у ојачаном стању (испрекидана линија) и зависност механичких особина легура Al-Cu4-Mg1 од времена и температуре старења (испрекидана линија) [1]

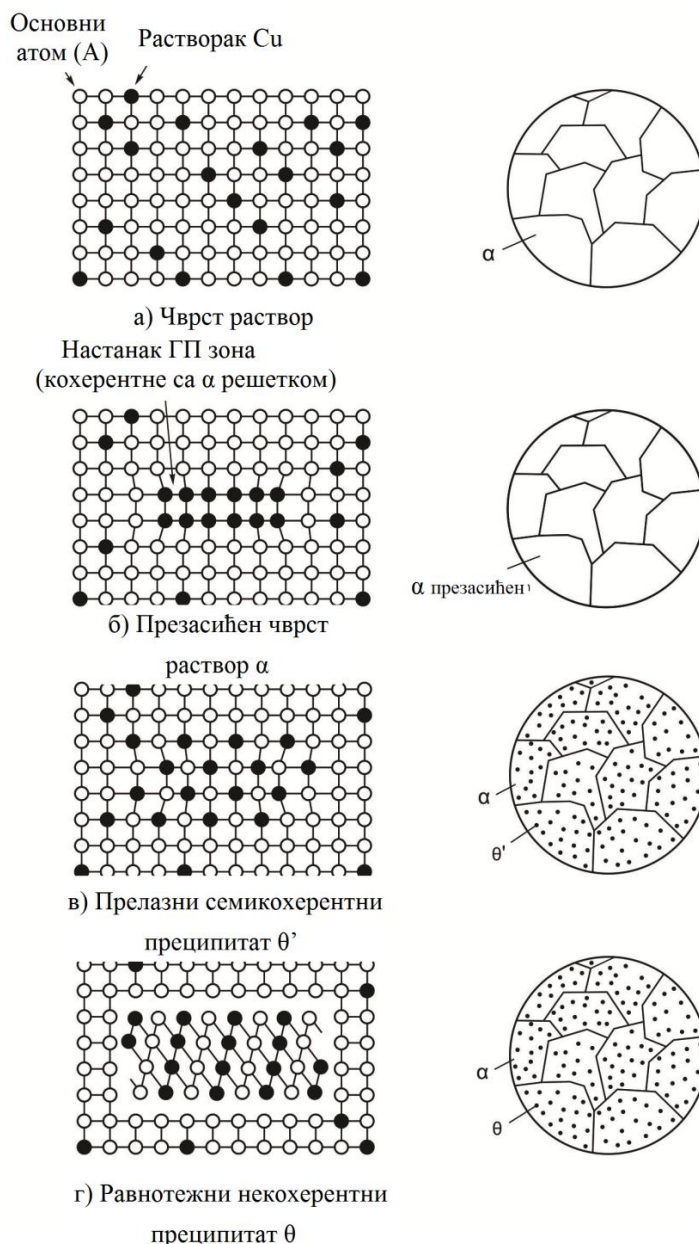
Ако се после природног старења не може постићи довољна отпорност на корозију, изводи се платирање ових легура алуминијумом Al 99.5 или легуром AlMn1. Дурали и супердурали испоручују се у облику: лимова, алуминијумом платираних лимова, отковака, штапова, цеви, профила, намењени пре свега за авионску индустрију.

Таложно ојачање објашњава се на следећи начин. После растворног жарења и брзог хлађења кристална мрежа алуминијума у којој су по закону случајне расподеле смештени атоми бакра изгледа као на слици 2.7. На доњим мрежама (слика 2.7б,в,г) виде се Гиније-Престонове зоне (Guinier-Preston) - тзв. ГП-зоне, у којима се у току старења групишу атоми бакра. Формирање ових зона се одвија у три етапе [3]:

- *I етапа старења* (слика 2.7б): У једној области нагомилавају се атоми бакра који имају радијус атома мањи од радијуса атома алуминијума, па се решетка локално

скупља, док се задржава кохеренција мрежа, што доводи до великог пораста тврдоће и ојачања легуре. Ова етапа при вештачком старењу траје до 100°C (сл. 2.8);

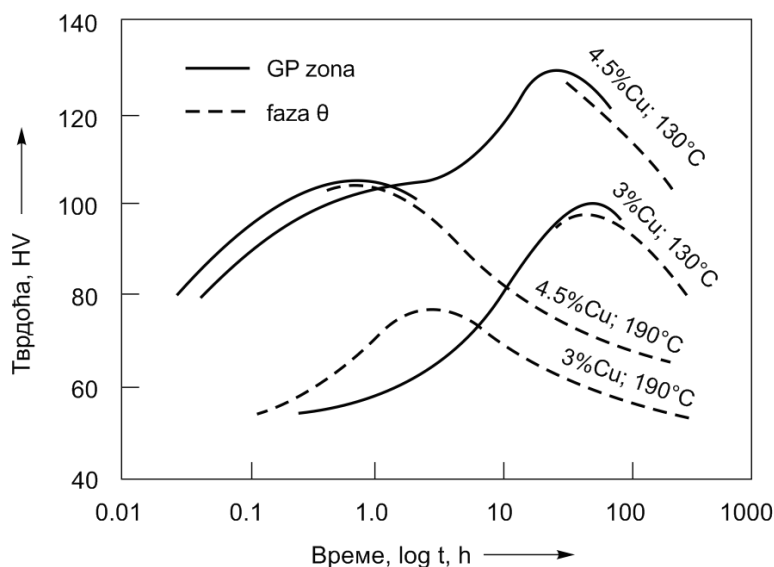
- *II етапа старења* (слика 2.7 - в): Бакар се концентрише на појединим местима па се образују једињења Al_2Cu која изазивају преплитање металних јона и појаву семикохерентних преципитата θ' ;
- *III етапа старења*: Преципитати фазе θ групишу се у равнотежне мреже (сл. 2.7г). Даљи пораст температуре и времена старења доводи до пада тврдоће и јачине, па се каже да је легура престарела.



Слика 2.7 Схематски приказ етапа старења и микроструктура легуре AlCu_3 [1]

Напонско поље које се јавља у кристалној решетки, поред преципитационог таложења, узрокује отврдњавање легуре Al-Cu . Ове структуре се могу уочити само електронским микроскопом.

На слици 2.8 су дате легуре са различитим процентом Си и ток отврдњавања са протоком времена



Слика 2.8 Пораст тврдоће HV у зависности од времена старења за две легуре (3% Си и 4.5% Си) и две температуре старења (130 и 190°C) [1]

2.2 Титан и његове легуре

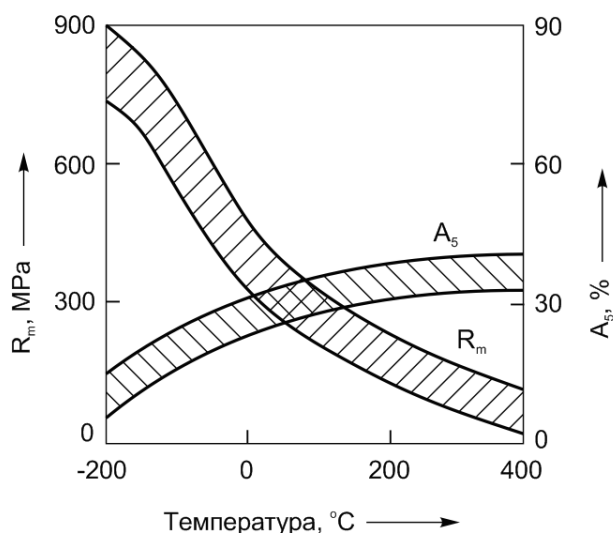
Титан има две алотропске модификације: α- титан постојан до 882°C (коме одговара густо пакована хексагонална решетка) и β- титан постојан од 882-1665 ± 5°C (коме одговара просторно центрирану кубну решетку). Титан је лак метал (4.505 g/cm³) са веома dobrим механичким особинама, веома добром отпорношћу према корозији и ниском електричном и термичком проводношћу. Физичке, механичке и технолошке особине титана дате су у таб. 2.3.

Таблица 2.3 Особине технички чистог Ti у жареном стању при температури 20°C [1]

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	

На механичке особине титана штетно утичу и мале примесе елемената који са титаном образују интерстицијални чврст раствор (H, C, N, O); после пресићења чврстог раствора образују се крте интермедијарне фазе (хидриди, карбиди, нитриди, оксиди). Ове примесе повећавају јачину Ti, али умањују његову жилавост, обрадивост деформацијом, заварљивост и корозивну отпорност. Зато се H, C, N сматрају нечистоћама, док се мала количина кисеоника уводи ради повећања јачине. Технички титан израђује се у облику плоча, лимова, цеви, шипки, жица и других полуфабриката. Отпорност титана према корозији у индустријским атмосферама и у морској води боља је него код корозивно отпорних челика. Захваљујући пасивизацији површине, титан има веома добре корозивне особине у оксидационим срединама (нпр. у 70% HNO₃ до 200°C) и чак у царској води (HCl+HNO₃ – 3:1). Органским киселинама, хлорисаним органским једињењима и алкалним растворима одолева и при повишеним температурама. Титан није отпоран на концентровану сону киселину, концентровану сумпорну киселину, фосфорну киселину и јаке алкалије средње и велике концентрације. На температури преко 500°C, титан и његове легуре лако апсорбују гасове O₂, N₂, H₂ што доводи до порозности и кртости (водонична кртост). Обрадом на хладно титан ојачава тако да се максимална јачина ($R_m \approx 800$ МПа, $A_5 \approx 7\%$) достиже, у зависности од садржаја примеса, већ при малим степенима деформације. Без загревања се добро прерађују само танки лимови, док је лимове дебљине око 2 mm потребно загревати 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 950 до 800°C, значи како у области стабилности α -Ti, тако и у области β -Ti. Добро се ваља (900 до 800°C) и кује (950 до 800°C), али при пресовању са екструзијом (око 900°C) има тенденцију заривавања за алат. На високим температурама титан се лако сједињује са кисеоником и азотом. И поред тога се при преради не користи заштитна атмосфера, већ је економичније да се после прераде на топло, танки дифузни слојеви кисеоника и азота одстране механички. Титан се жари у вакууму (1 h при 1 Pa) или у инертној атмосфери (Ar, He), чиме се побољшавају пластичне особине титана и снижава садржај водоника. У земљама са развијеном авио-индустријом производе се обично 3-4 врсте титана са различитим вредностима механичких особина. Врсте са средњом и високом јачином користе се у конструкцијске сврхе, а са меким титаном се праве одговарајуће легуре титана. Са порастом температуре титан губи јачину тако да је применљив до око 300°C (сл. 2.9). Област примене титана се проширује површинским третманом, углавном

нитрирањем, чиме се повећава отпорност према заривавању и оксидацији, а тиме и отпорност према корозији.



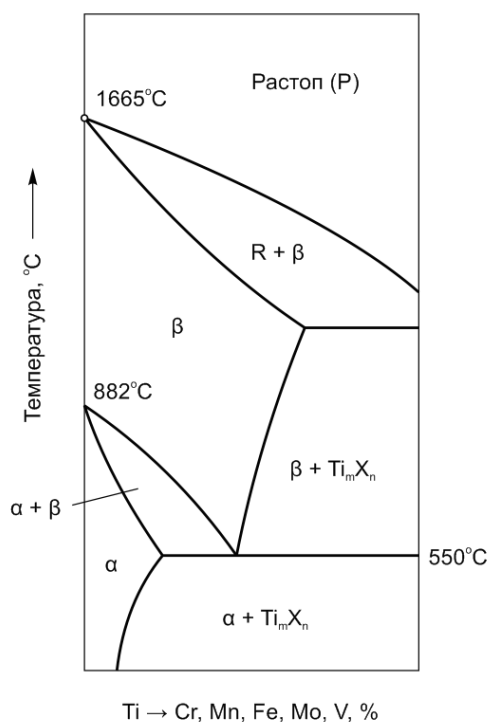
Слика 2.9 Зависност јачине R_m и издужења технички чистог титана од температуре [1]

Класичне области примене титана су скелети авиона (млазни и ракетни мотори), јер се титан одликује високим односом јачине према тежини. Ова особина титана заједно са његовом задовољавајућом отпорношћу против корозије у морској води чини га применљивим и за израду специјалних морских пловних средстава. Затим се титан примењује у хемијској индустрији (пумпе, цевоводи, размењивачи топлоте, резервоари за азотну киселину). Такође се користи као легирајући елемент специјалних челика, легура лаких метала и алатних челика.

2.2.1 Легуре титана

Легуре титана нарочито са алуминијумом, као и 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 нечистоће (C, O, N) стабилизују α -фазу тако што подижу температуру трансформације $\alpha \rightarrow \beta$. Супротно томе Fe, Cr, Mo и V као легирајући елементи снижавају температуре преображаја α у β (сл. 2.10) и доводе до тога да се β -фаза задржава и на температурама знатно нижим од 882°C, и чак на собној температури. Према структури која настаје при спором хлађењу, титан образује легуре:

- једнофазне типа α - (Ti-5 Al-2.5 Sn),
- једнофазне типа β - (Ti-10 V-2 Fe-3 Al) и
- двофазне типа ($\alpha + \beta$) - (Ti-6 Al-4 V).



Слика 2.10 Бинарни равнотежни дијаграм легура титана [1]

Легуре титана типа α и типа β не подлежу полиморфним преображајима, те нису каљиве, а могу се калити легуре типа $(\alpha + \beta)$. У посебну групу спадају β легуре са гвожђем познате као феро-титан. Производе се термитном реакцијом, а користе се за легирање специјалних челика и за дезоксидацију и денитрирање течног челика. Истим поступком производе се феро-манган и феро-хром. Титан и његове легуре примењују се углавном где су примарни захтеви – висок однос јачине према тежини, као и велика отпорност на корозију. То је авионска индустрија (делови авиона, облоге и лопатице компресора, носачи мотора), рударство (двоструке облоге мотора, боце за компримоване течне гасове, млазнице итд.), опрема за процесну хемијску индустрију (опрема за медијуме, као што су влажан хлор, водени и кисели раствори хлора, измењивачи топлоте који раде у азотној киселини), у бродоградњи (пропелери, оплате морских бродова, подморница и торпеда), у термоелектранама (за добоше и лопатице стационарних турбина). Титан је биокомпатибилан материјал, што значи да га људски организам не одбацује, те се употребљава за вештачке кукове. Титан и његове легуре се теже машински обрађују (термичка проводност $\lambda = 15 \text{ W/mK}$) него угљенични и нисколегирани челици ($\lambda = 30 \text{ W/mK}$), а приближно као нерђајући аустенитни (Cr-Ni) челици ($\lambda \approx 15 \text{ W/mK}$). Због мале термичке проводности титана, температура оштрице резног алата брзо расте, што доводи до приваривања и убрзаног тупљења ножа. Зато треба радити са синтерованим алатом, малом брзином резања и са доста средства за

хлађење и подмазивање. Све легуре титана могу се прерађивати пластичним деформисањем на топло (800- 1000°C), а на хладно само легуре типа α и β , за које се препоручује загревање до температуре изнад 200°C, а испод температуре рекристализације $T_r = (0.5-0.6) T_t$. Легуре титана могу се аргонски заваривати и лемити чистим сребром са топитељима од соли алкалних метала. Када се легуре титана заварују, кале, отпуштају или жаре, све се мора радити у заштитној атмосфери инертних гасова - аргона или хелијума. При извођењу ових радова у атмосфери ваздуха легуре постају знатно кртије (реактиван метал).

2.3 Бакар и његове легуре

Бакар се добија из сулфидних руда: куприт (Cu_2S), халкопирит (CuFeS_2), борнит (Cu_3FeS_3), лазурит ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$), малахит ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$). Овај елемент нема својство алотропских промена, тј. задржава у чврстом стању површински центрирану кубну решетку на свим температурама. Параметар решетке износи 0.36151 nm, а полупречник атома 0.128 nm. Технички бакар производи се у класама датим у таб. 2.4.

Таблица 2.4 Подела техничког Cu према чистоћи [1]

Група	Најмањи садржај Cu у %
1	99.00
2	99.25
3	99.50
4	99.75
Електротехнички	99.9-99.99

Припада групи тешких метала (специфична маса је 8.96 g/cm^3) и црвенкасте је боје, није магнетичан. Температура топљења му је $T_t \approx 1083^\circ\text{C}$. Механичка својства бакра веома зависе од стања испоруке, односно претходне механичке и термичке обраде. На пример, затезна јачина му је у ливеном, односно жареном стању око 200-250 МПа, тврдоћа 45-60 НВ; међутим у деформисаном стању јачина се повећава на 400-500 МПа, тврдоћа 90-110 НВ, а истегљивост опада са 50% на 2-6%.

У машинству бакар се употребљава у виду лимова, трака, цеви, шипки и тсл. Разликују се следећа стања бакра (у зависности од степена деформисања у хладном стању):

- меки бакар ($R_m = 200-250 \text{ МПа}$),
- полутврди бакар ($R_m = 250-300 \text{ МПа}$),

- тврди бакар ($R_m = 300-370 \text{ MPa}$) и
- опружно-тврди бакар ($R_m > 370 \text{ MPa}$).

Бакар је веома пластичан материјал који се успешно обрађује деформисањем, како у хладном тако и у топлотном стању. Оптимална област обраде деформисањем у топлотном стању је ограничена температурама 680 до 780°C. Чист бакар није погодан за обраду ливењем и заваривањем због великог скупљања. Према атмосферској корозији и воденој пари бакар је отпоран, јер се изложен овим медијима превлачи танком зеленкастом заштитном скрамом – патином ($\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$) која га штити од даље корозије. Кад се загреје до изнад 400°C бакар по површини формира крти, танки оксидни слој (CuO). Користи се у облику лимова, шипки, цеви и жица. Због своје мале јачине, ретко се прерађује ливењем. Пошто има одличну електропроводљивост, бакар је главни материјал у електротехници, електроници и електро-вакуумској техници. Добра топлотна проводљивост бакра довела је до његове примене за парне котлове, расхладне плоче и тсл.

2.3.1 Легуре бакра

У машинству легуре бакра имају знатно већу примену од чистог бакра. Бакар се успешно легира многим елементима: Zn; Sn; Al; Ni; Pb; Mn; Si; Be,.... (таб. 2.5). При томе се добијају легуре познате као *месинг* и *бронза*. Месинг је легура бакра и цинка, а бронза бакра и калаја, а понекад и других елемената.

Таблица 2.5 Преглед легура бакра и њихови уобичајени називи [1]

Основа система	Евентуални даљи додаци	Назив
Cu-Zn	Pb	Месинг и "томбак"
Cu-Zn	Ni, Sn, Al, Pb, Mn, Fe, Si	Специјални месинзи
Cu-Sn	Zn, P	Бронза (калајна)
Cu-Al	Ni, Fe, Mn	Алуминијумска бронза
Cu+→	Mn, Si, Ni, Cd, Be	Специјална бронза
Cu-Ni-Zn	Pb, Mn, Fe, Al	"Ново сребро"
Cu+→	Zn, Ni, Mn, Si, Ag, P	-

2.3.2 Месинг

Сдаржај цинка у месингу као конструкционом материјалу је најчешће 30-44%. Међутим постоји једна група легура бакра и цинка у којој је проценат цинка знатно нижи (5 до 20%) и оне се називају *томбак*. Томбак се употребљава у декоративне сврхе, јер су му сјај и боја слични злату, а поседује и добру отпорност на корозију (за

2.11.



2.11.

2.11.

комбинација механичких својстава месинга постиже се при садржају Zn око 40%. Све до око 44-45% затезна јачина расте, али дуктилност већ при садржају Zn преко 30% опада.

Према технолошкој намени месинг се дели на:

- месинг за гњечење (деформисање) и
- месинг за ливење.

Месинг који је ојачао услед извршене хладне деформације може се поново довести у пластично стање ако се изврши рекристализационо жарење на температури 500-700°C и хлађење у води. У табели 2.6 наведене су врсте месинга за гњечење, а у таб. 2.7 ливачке легуре (Р- ливење у песку, К- у кокили, Т- под притиском).

Таблица 2.6 Врсте месинга за гњечење [1]

Ознака	Примена
CuZn10 CuZn15 CuZn20 CuZn28	За делове у електротехници, за бижутерију и тсл.
CuZn30	За израду чаура свих врста, цеви за кондензаторе, измењиваче топлоте.
CuZn33	За мреже, траке за хладњаке, шупље закивке.
CuZn37 CuZn40	За машинске и завртњеве за дрво, ваљке за штампање текстила, траке за хладњаке, лиснате опруге,

Таблица 2.7 Ливачке легуре месинга [1]

Ознака	Механичке карактеристике				Примена
	R _{p0.2} , МПа	R _m , МПа	A ₅ , %	НВ	
P.CuZn33Pb2	60	150	10	45	Одливци ливени у песку, склопови и везни конструкциони елементи. Делови за општу употребу у електротехници.
K.CuZn40	80	250	25	75	Одливци ливени у кокили, арматуре метално-светлих површина, окови, делови у електротехници, ...
T.CuZn40	100	250	2	75	Одливци ливени под притиском, арматуре, делови у електротехници, ...

2.3.3 Бронза

Под бронзом се подразумева легура бакра и калаја. Међутим, у ширем смислу, то не мора бити двојна легура, нити само калај легирајући елемент; тако постоје:

- алуминијумске,
- оловне и
- манганске и друге бронзе.

Калајне бронзе

Садржај калаја у овим бронзама иде до 14%. Присуство калаја у легури утиче на повећање њене јачине и истовремено опадање пластичности. Отуда је код бронзи за ливење садржај Sn већи него код бронзи за обраду деформисањем (гњечењем). Боја бронзе зависи од њеног састава; што је мање калаја, боја бронзе ближа је бакру. Под утицајем атмосферских чинилаца бронза се превлачи зеленкастом покорицом, тзв. патином. Око 14% Sn се може растворити у решетки бакра, при чему се формира једнофазна структура чврстог раствора, α -бронза. При већим садржајима калаја појављује се у структури и β -фаза (кристали једињења Cu_3Sn) која негативно утиче на својства бронзе, тако да то представља границу максималног садржаја калаја код легура за гњечење. Бронзе које се употребљавају у машинству ретко садрже преко 10% Sn.

Према технолошкој намени разликују се:

- бронзе за обраду деформисањем ($\approx 2\text{-}8\%$ Sn) и
- бронзе за ливење ($\approx 6\text{-}14\%$ Sn).

С обзиром на добра клизна својства, бронзе се углавном употребљавају за машинске делове који су изложени:

- јаком трењу (клизна лежишта, пужни преносници, ...),
- притиску (делови пумпи, ...) и
- динамичким оптерећењима (опруге, ...).

Алуминијумске бронзе садрже до 8-11% Al (без калаја); имају велику отпорност према хабању и корозији како на собној тако и на повишеним температурама. Користе се за јако оптерећене делове изложене корозији и коване делове који раде на топло под притиском. Оловне бронзе садрже 8-10% Sn и 4-12% Pb, имају добра лежишна својства, па се користе као антифрикциони материјали за клизна лежишта. Такозвана трговачка бронза је легура Cu-Sn-Zn-Pb, где Pb у износу 2-3% углавном повећава ливкост, обрадивост и лежишна својства. Силицијумске бронзе (до 4.5% Si, и са

додацима Zn, Mn и Fe) одликују се добром топлотном и електричном проводношћу, отпорношћу на трење и на деловање високих температура. Ове се бронзе пре свега примењују у електро и радио-техници.

Силицијумско-манганска бронза (CuSi3Mn1) користи се за израду лежишних чаура покретних зупчаника у мењачу. Манганске бронзе су отпорне на високе температуре, јер задржавају како тврдоћу тако и истегљивост. Налазе примену за израду парних машина. Берилијумова бронза одликује се највећом тврдоћом од свих легура бакра и знатном отпорношћу на корозију. Термички обрађене (каљене у води) и отпуштене достижу тврдоћу 370 НВ и $R_m = 1350 \text{ МПа}$. Оне су скупе, али се ипак употребљавају за опруге отпорне на корозију, делове пумпи, лопатице парних турбина, мерне приборе. Бакарне легуре за ливење топе се у гасним јамским и индукционим пећима (средње или високофреквентним). Као шаржа (уложак) употребљавају се гредице добијене из топионице бакра, те производни отпад и стари бакар. Тежи се да се избегне прегревање и дуго држање на температури ливења. Пре самог ливења изводи се дезоксидација помоћу фосфора (фосфорни бакар), а код алуминијумских и оловних бронзи помоћу мангана (мангански бакар).

3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ АЛУМИНИЈУМА, ТИТАНА И БАКРА

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. Посебно се разматрају следеће врсте заварљивости: *металуршка, конструкциона и технолошка* заварљивост.

Металуршка заварљивост

Она зависи од низа фактора: хемијског састава, почетне структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. На овај вид заварљивости утичу све металуршке промене у материјалу које настају под дејством топлоте унете при заваривању. 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. Насупрот томе, металуршки су заварљиви 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, пре свега, 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 заваривања, погонску енергију (унос топлоте), брзину хлађења и др. Проверава се да ли се морају применити посебне мере (предгревање, догревање у току и отпуштање после заваривања, рад у специјалним условима), а оцена се доноси према предузетим мерама и добијеним резултатима. 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 топе без тешкоћа, без великог прштања (разбригавања) и појаве прслина, гасних мехурова и других грешака. Нечистоће на страницама жлеба и околини: прљавштине, масти и уља, коварина и тсл. погоршавају оперативну заварљивост, па је неопходно да се све споменуто одстрани из зоне топљења и њене околине 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 [2, 3].

Коначне особине завареног споја, за дати материјал и одабрану технологију, зависе од процеса и појава који се одвијају и настају у основним зонама завареног споја [2, 3]:

- у шаву, где се основни 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 различито понаша због неједнаких максималних температура и брзина хлађења у појединим тачкама ЗУТ-а.

Дефиниција заварљивости Међународног института за заваривање (МИЗ/IIW) гласи [2]:

"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". 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).

3.1 Заварљивост алуминијума и његових легура

Када је реч о заварљивости алуминијума и његових легура, треба истаћи да постоје велике разлике између физичких и металуршких особина легура Fe-C с једне стране и обојених метала, посебно алуминијума с друге стране. При заваривању треба

имати у виду да је термичка проводност алуминијума и свих лаких и обојених метала и легура знатно већа него техничких легура гвожђа, а температура топљења знатно нижа. Повећана термичка проводност условљава употребу снажнијих топлотних извора да би настало локално топљење метала по линији спајања. Дејство извора топлоте мора да буде што краће да не би дошло до прекомерног одвођења топлоте у основни материјал. Поред свега наведеног, још треба истаћи да легуре обојених метала имају знатно мањи температурски интервал очвршћивања (кристализације) тј. разлику температуре почетка и завршетка кристализације ($\Delta T = T_l - T_s$). Купка има повећану склоност ка оксидацији, јер Mg, Al и Cu више апсорбују гасове из ваздуха него гвожђе. За успешно заваривање легура обојених метала неопходно је познавати особености појединих метала и легура из ове групе.

Алуминијум је један од највише коришћених метала за израду заварених конструкција. Он се примењује у многим стандардним облицима, а може се примарно прерађивати свим познатим методима механичке технологије. Полупроизводи од алуминијума могу се спајати свим познатим методима спајања метала и легура.

Алуминијум се одликује малом тежином, задовољавајућом јачином и добром корозивном отпорношћу. Веома је погодан за нискотемпературске примене; користи се у комерцијално чистом стању или легиран са металима (Mn, Mg, Cu, Zn, Ni) и неметалом - силицијумом (Si). На тржишту се могу набавити полупроизводи од легура алуминијума у различитим облицима: ваљаном и пресованом, вученом, екструдираним, кованом или ливеном. Сви поменути полупроизводи, изузев ливеног, припадају ковном алуминијуму. Најчешћи полупроизводи добијени пластичном прерадом су: плоче, ваљани профили, екструдирани профили и алуминијумске цеви.

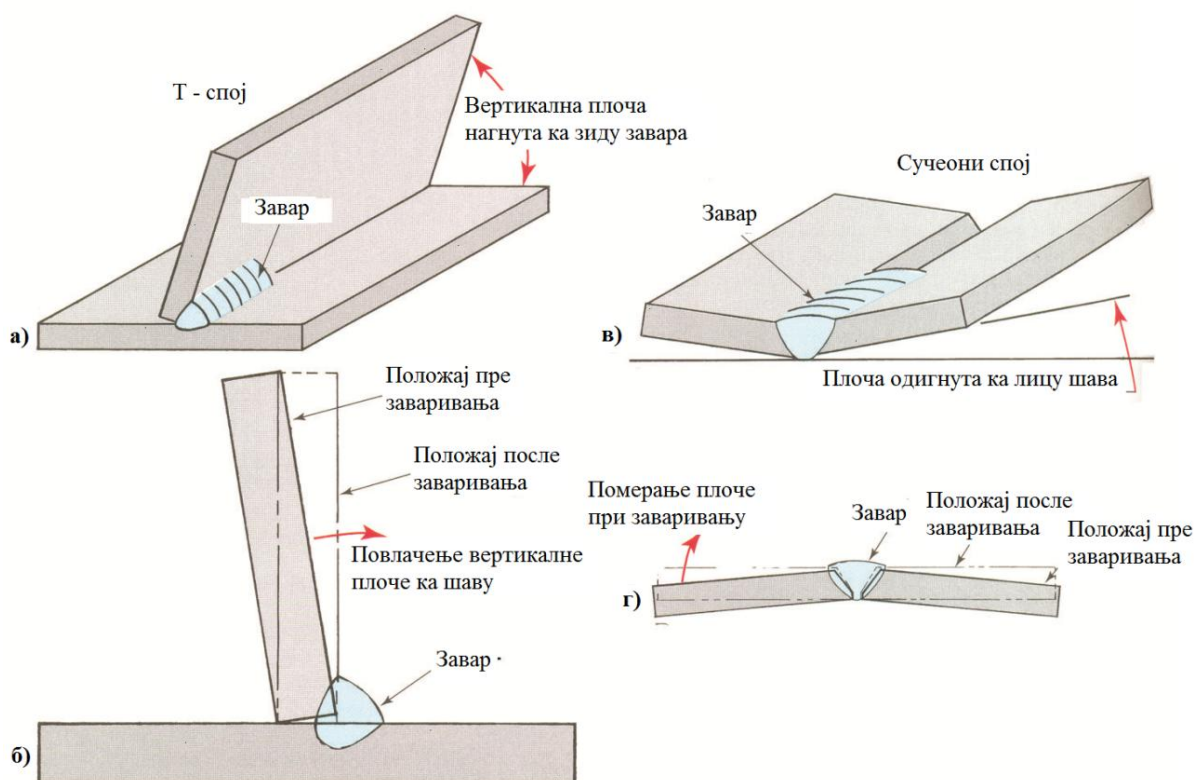
Припрема алуминијумских предмета за заваривање

Комерцијално се алуминијум примењује било у кованом или ливеном стању. Методи заваривања су за оба стања слични, али у поступцима постоје извесне разлике. Неке карактеристике алуминијума чине га веома тешким за заваривање. То су пре свега:

- склоност ка оксидацији на повишеним и високим температурама;
- топљење алуминијума се одвија без промене боје;
- температура топљења оксида алуминијума (2058°C) је много виша, него чистог алуминијума;

- знатно већа специфична тежина оксида алуминијума ($3.8-4.2 \text{ g/cm}^3$) него чистог алуминијума.

Понекад и припојни шавови не могу да спрече претерано кривљење, па је потребно спојне елементе тако поставити да се после заваривања добије правилан облик. Пример погодног размештаја Al-плоча које се заварују дат је на слици 3.1. Слично се може поступити и код других метала и легура, али водећи рачуна о томе да се они мање деформишу од Al.



Слика 3.1 Примери погодног постављања Al-плоча при извођењу различитих спојева [2]

Топли пролом

Често је потребно да се заваривани алуминијумски делови чврсто стегну и да тако остану пре, у току и после заваривања. Ако се полажу широки завари на танком лиму може се догодити *топли пролом* јер алуминијум нагло губи чврстину непосредно пре топљења. То се манифестује тиме што се купка и околни метал одвајају и испадају те остаје рупа у основном металу. Ова појава се спречава помоћу подложне траке или плоче постављене испод жлеба. Препоручује се да трака, односно плоча буду од нерђајућег челика (18Cr10Ni). Кад је коренска страна неприступачна, проламање се може спречити технолошким мерама тј. избором параметара заваривања који стварају најмању запремину купке.

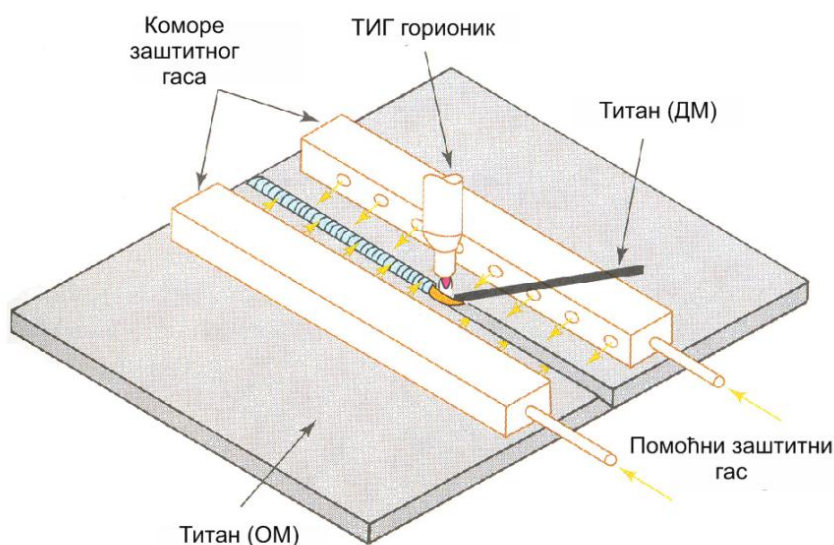
3.2 Заварљивост титана, бакра и њихових легура

Будући да је алуминијум један од најчешће коришћених обојених метала за заваривање, остали обојени метали немају толику примену али неки од њих имају сличне карактеристике као алуминијум и узражене тешкоће при заваривању.

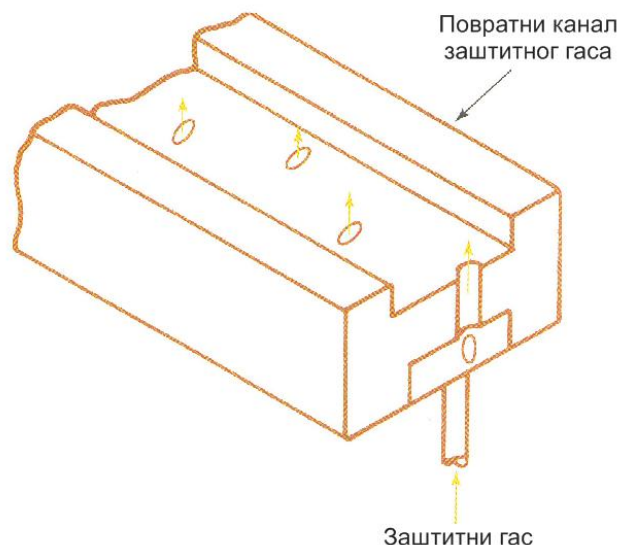
Заварљивост титана

Титан као метал има најчешће тешкоће при заваривању зато што је титан реактиван метал који на повишеним температурама раствара кисеоник, азот и водоник. Међутим, мале количине растворених гасова 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 утицаја топлоте морају да буду инертним гасом све док се не охладе до 260°C.

Један од начина обостране заштите приказан је на слици 3.2. Поред лица шава заштићеног аргонским гориоником, корен шава се штити тзв. помоћним гасом. Канал за довођење гаса са коренске стране шава приказан је на слици 3.3. Заваривачки горионик нормално доводи примарни заштитни гас око заваривачке купке. Гас који се посебно доводи да изолује растоп и ЗУТ при заваривању зове се и секундарни заштитни гас.



Слика 3.2 Секундарни заштитни гас доводи се са доње стране титанског споја [2]



Слика 3.3 Канал за довођење заштитног гаса са коренске стране шави при заваривању титана [2]

Заварљивост бакра

Бакар има сличне тешкоће при заваривању као и алуминијум. При загревању на температури изнад 400°C на површини бакарних предмета формира се крти танки оксидни слој CuO ; у течном стању, бакар лако апсорбује кисеоник из ваздуха и образује унутрашњи оксид Cu_2O , који отежава како ливење тако и заваривање.

Заваривање **месинга** слично је заваривању бакра, главна разлика проистиче због повећаног садржаја цинка који због загревања месинга прелази у гасовито стање. Стога се око завара образују отровне цинкане паре које излазе из купке и остаљају порозна места у шаву. Морају се предузети мере да се спречи излажење ових пара из купке.

Иако се назив **бронза** углавно односи на легуре C-Sn , бакар се може легирати не само калајем већ и другим елементима (Pb , Al , Si , Be , Mn) који дају разне врсте бронзи. Свака бронза друкчије се заварује; зато је најпре потребно да се утврди врста бронзе, јер се само тако могу правилно изабрати додатни материјали. Такође су и предгревање и накнадна термичка обрада различите за поједине врсте бронзи.

4. МЕТОДЕ ЗАВАРИВАЊА (MIG, TIG, REL, GPZ)

4.1 MIG поступак заваривања

MIG поступак се заснива на континуалном довођењу и топљењу додатног материјала у виду електродне жице у заштити инертних гасова, аргона и/или хелијума (сл. 4.1). Овом методом је техно-економски оправдано заваривати лимове, плоче и конструкционе профиле. Предност MIG-а у односу на друге поступке је лакша механизација и аутоматизација чиме се добија знатно већа брзина заваривања, а самим тим и продуктивнији рад пошто се процес одвија без прекида. Механизација се може извести тако што се помоћу малог електромотора и одговарајућег механизма жица континуално доводи у жлеб. На тај начин заваривач само помера заваривачки пиштољ дуж линије споја. Развојем MIG/MAG, EPP и електроотпорске технологије заваривања развијени су и заваривачки аутомати, роботи који замењују људе на напорним, монотоним и по здравље опасним радним местима.



Слика 4.1 Приказ савременог пулног апарата за MIG заваривање

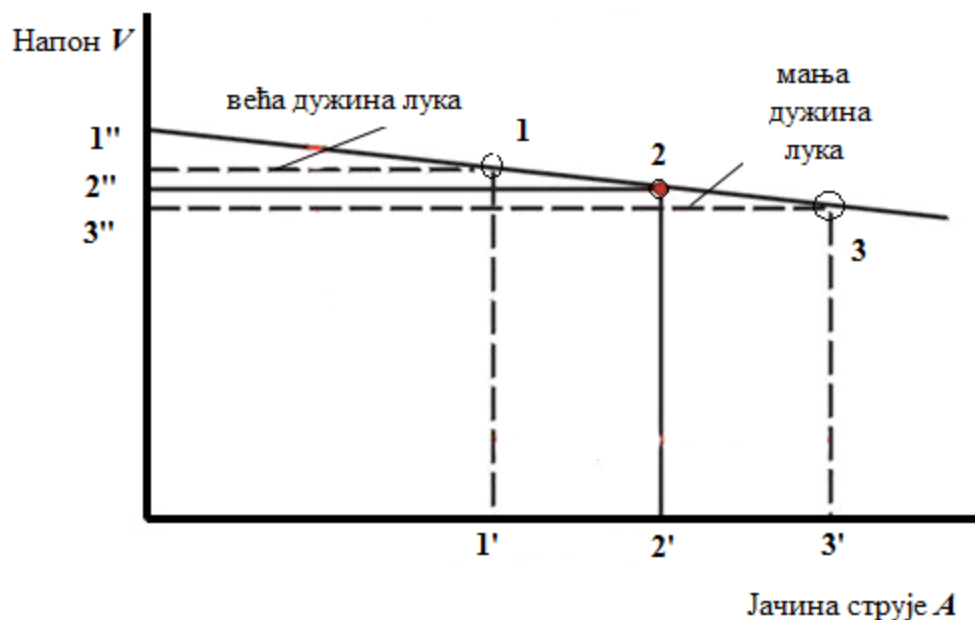
Могу се применити пуне жице (на бази челика, Al, Cu, све зависно од врсте основног материјала) и пуњене жице (челичне фолије се пуне спрашеним металима и топителјима: рутилом TiO_2 и кречњаком $CaCO_3$ и тсл.). Заштитни гасови (Ar, He) штите заварени спој од штетног утицаја атмосферилија. МИГ поступком се највише

заварују легирани челици и нежелезни метали дебљине до (и преко) 20 mm, помоћу жице пречника 1÷2,5 mm.

Основне карактеристике MIG поступка заваривања:

- Заваривање је могуће у свим положајима;
- Параметри заваривања: $I = 150 \div 500 \text{ A}$, $U = 20 \div 30 \text{ V}$, $v_z = 6 \div 90 \text{ m/h}$;
- Проток аргона: $q = 10 \div 20 \text{ l/min}$ (зависно од врсте споја и дебљине спајаних делова);
- Струјање: ламинарно;
- Спољна карактеристика извора: равна (пад 2 V на 100 A);
- Струја заваривања: једносмерна обрнутог поларитета.

Извор напајања је заваривачки трансформатор са исправљачем који на секундарном намотају има равну или благо растућу струјно-напонску карактеристику, односно напон је константан. Наизменична струја се из секундарног намотаја трансформатора доводи у исправљач да би се добила једносмерна струја неопходна за MIG поступак заваривања, при чему се напон мења у врло малом опсегу, односно напон је константан и близак напону празног хода. Струјно-напонска карактеристика је при томе непромењена.



Слика 4.2 Струјно-напонска карактеристика MIG поступка заваривања ($U \approx \text{const}$) [10]

Захваљујући томе што извор напајања на излазу даје константан напон, могућа је саморегулација дужине електричног лука. Механизам саморегулације може се објаснити ако се прати промена јачине струје при неизбежном одступању дужине електричног лука од номиналне вредности (сл. 4.2). На овој слици приказане су и

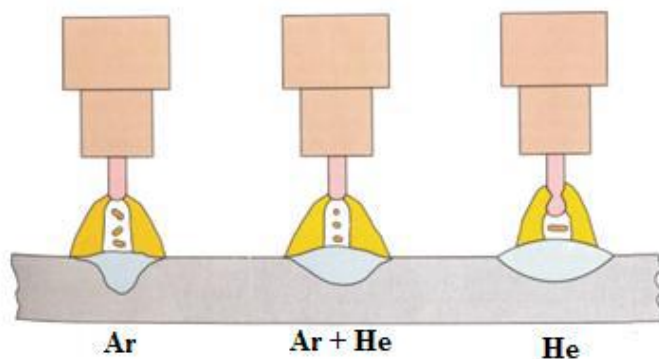
статичке карактеристике лука: дужег и краћег у односу на номинални. Ако се при заваривању случајно скрати лук, нпр. због наилажења врха жице на припојне шавове у жлебу, јачина струје ће знатно порасти (од 1' до 2' до 3', сл. 4.2) те ће се врх жице брже топити, па се дужина лука враћа на номиналну вредност. Супротно томе, ако се дужина лука повећа, јачина струје се смањује до 1', успорава се топљење жице, те се дужина лука опет враћа на номиналну вредност. Ово одржавање сталне дужине лука, без утицаја заваривача, носи назив *саморегулација*.

Одабрани напон и брзина довођења жице одређују јачину струје и напон лука а тиме и облик преноса металних капљица од жице у купку; разликују се *краткоспојени пренос* и *пренос кроз лук*: *крупнокапљичаст*, *млазни* и *пулсирајући*.

Заваривачки пиштољ код МИГ методе поседује расхладни систем који може бити у зависности од јачине једносмерне струје (I_z) индиректног поларитета:

- за $I_z < 350$ А – са ваздушним хлађењем;
- за $I_z > 350$ А – са воденим хлађењем;
- код тачкастог заваривања-комбиновано.

Тачкасто MIG/MAG заваривање разликује се од електроотпорског по томе што овде формирање тачкастог шава почиње од горњег лима а делимично се преноси на доњи лим. Код електроотпорског тачкастог заваривања формирање шава започиње на додиру два лима, а сочиво се симетрично распоређује у горњи и доњи лим. Тачкастим MAG/MIG-ом могу се спајати лимови неједнаких дебљина, чак и ако су претходно офарбани. Поступак се често користи за припајање делова било преклопних или угаоних спојева. Дубине уваривања и облици навара добијени у заштитним гасовима Ar, Ar+He и He дати су на слици 4.3.



Слика 4.3 Утицај заштитних гасова на облик шави и дубину уваривања при MIG заваривању [9]

Инертни гасови се углавном користе за заваривање нерђајућих челика и нежелезних метала и њихових легура (Al, Ti, Mg, Cu). Уместо аргона, препоручује се хелијум за заваривање дебелих предмета од метала високе топлотне проводљивости (Al, Cu). За спајање танких делова од метала мање термичке проводности боље је и јефтиније користити аргон; за Al, Mg и Cu може се употребити смеша Ar+He.

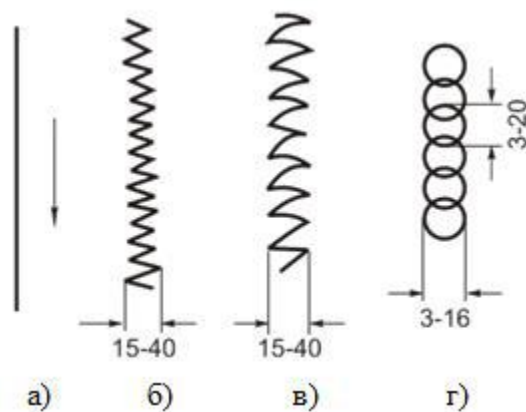
Табела 4.1 Преглед заштитних гасова за заваривање различитих основних материјала [3]

Гасови	Основни материјали за заваривање
Ar	Сви метали
He	Сви метали
Ar + 35-75% He	Al; Cu; Ni (PF положај)
Ar + 0.5% O ₂	Al и његове легуре
Ar + 1-2% O ₂	Високолегирани Cr-Ni челици
Ar + 3-5% O ₂	Нискоугљенични и нисколегирани челици
Ar + 5-10% H ₂	Аутоматско заваривање високолегираних Cr-Ni челика
Ar + 25-30% N ₂	Cu и његове легуре
Ar + 20-50% CO ₂	Нискоугљенични и нисколегирани челици
70% Ar + 20% CO ₂ + 2% O ₂	Нискоугљенични и нисколегирани челици
CO ₂	Нискоугљенични и нисколегирани челици

Заштита зоне заваривања аргоном спречава продор ваздуха до течног метала капљица и металне купке, а хемијска неутралност заштитног гаса омогућава хемијске реакције које мењају састав растопљеног метала. Ако је додатни метал исти као и основни, онда се при заваривању у заштити инертног гаса шав неће по хемијском саставу разликовати од основног. То не значи да се при заваривању у заштити инертног гаса не могу појавити одређене грешке. Наиме, хемијски активне примесе у заштитном гасу (кисеоник, азот, водена пара) могу довести до порозности шавова као и погоршања њихових корисних особина. Извор хемијски активних гасова може бити такође и основни метал. *Техника полагања завара* зависи од дебљине радних предмета, положаја заваривања, основног материјала, заштитног гаса и др.

Неправилна техника полагања завара и вођења пиштоља може проузроковати више грешака у завареним спојевима: гасне мехурове, непровар или испупчено лице шавова. Разликују се технике *улево* и *удесно*. Улево се заварују тањи радни предмети, полажу коренски завари и изводе радови у принудним положајима. Овом техником добија се шав лепшег изгледа него кад се заварује удесно.

У зависности од дебљине завариваних предмета, кретање пиштоља може бити чисто праволинијско за положаје РА (хоризонталан) и РС (зидни) (сл. 4.4.а) или праволинијско уз бочно њихање. (слика 4.4б,в,г).



Слика 4.4 Препоручене технике кретања жице при MIG/MAG заваривању [3]

Предности MIG поступка заваривања су:

- универзална примена са тачке гледишта ОМ,
- велика брзина топљења,
- велика брзина заваривања,
- релативно једноставна обука заваривача (за нелегиране и нисколегиране челике),
- једноставна механизација поступка,
- применљив у принудним положајима,
- мали инвестициони трошкови (за стандардну варијанту) и тсл.

Мане MIG поступка су:

- опасност од грешака у почетку заваривања,
- опасност од грешака при спором заваривању због истицања течног метала,
- испред електричног лука,
- релативно компликована обука заваривача (за високлегиране челике и обојене метале),
- тешкоће при заваривању на отвореном (струјање ваздуха).

4.1.1 MIG заваривање алуминијума

MIG поступком се успешно заварују алуминијум и његове легуре из следећих разлога:

- није потребна употреба топитеља,
- применом једносмерне струје обрнутог поларитета (Е+) долази до катодног чишћења (разарања) оксидног слоја на основном металу,
- омогућавају се веће брзине заваривања,
- ужа је зона утицаја топлоте, односно мање деформације и

- релативно кратка обука заваривача.

Заварују се успешно материјали углавном дебљи од 3 mm у свим положајима. Употребљава се најчешће електродна жица пречника 1.6 mm, а за условно заварљиве материјале дебље од 8 mm треба применити још и предгревање. У табlici 4.2 дају се оријентациони подаци за MIG заваривање алуминијума.

Како при заваривању алуминијума и његових легура постоје одређене тешкоће, као и при заваривању других лаких легура, па се треба придржавати следећег:

- Пре заваривања уклонити слојеве оксида са страница жлеба и осталих површина, на минималном растојању 30-40 mm.
- Пре наношења следећег слоја неопходно је очистити површину претходног слоја; чишћење изводити искључиво четком од нерђајућег челика или одговарајућим стругачем;
- На површинама радног комада не смеју се правити дубоки зарези јер они могу бити жариште корозије;
- Припоје изводити према прописаном редоследу и на одговарајућем растојању.

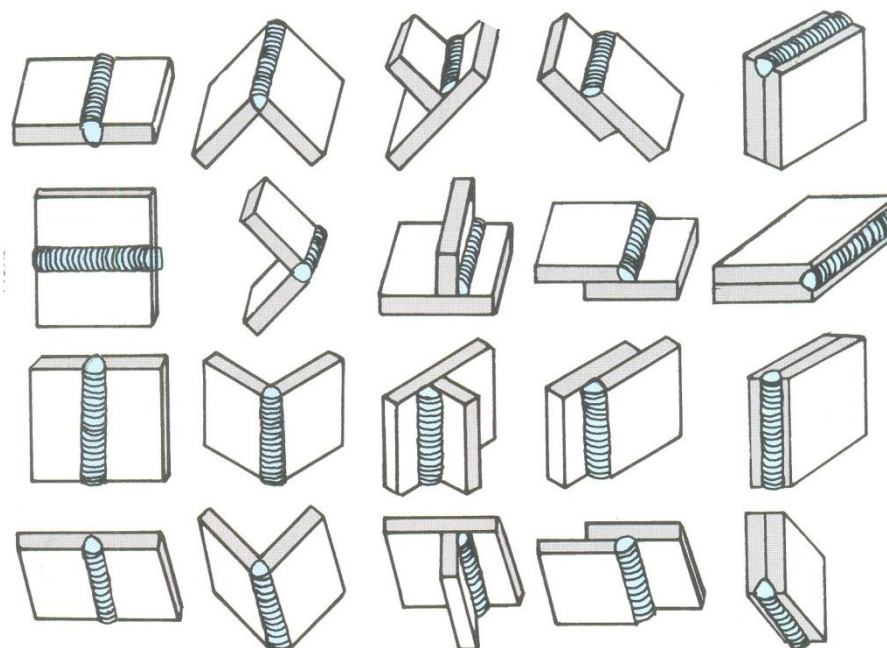
Таблица 4.2 Оријентациони подаци за MIG заваривање алуминијума [9]

Дебљина	Тип споја	Број пролаза	Струја заваривања			Пречник електроде	Брзина заваривања	Потрошња аргона			Напомена (Температура предгревања)
			H ¹⁾	V ¹⁾	O ¹⁾			H ¹⁾	V ¹⁾	O ¹⁾	
mm		-	A			mm	m/min	l/min			
3	сучеои	1	140	-	-	1.6	0.8÷1.0	13	-	-	-
	преклопни	1	140	-	-	1.6	-	13	-	-	
	угаони	1	140	-	-	1.6	-	13	-	-	
4	сучеои	1	160÷180	150÷160	140÷150	1.6	0.7÷1.0	14	20	20	-
	преклопни	1	160÷180	150÷160	150	1.6	-	14	20	20	
	угаони	1	160÷180	150÷165	160	1.6	-	14	20	20	
5	сучеои	1	200÷220	160÷180	150÷170	1.6	0.6÷0.9	15	20	20	-
	преклопни	1	200÷220	160÷180	165	1.6	-	15	20	20	
	угаони	1	200÷220	160÷180	165	1.6	-	15	20	20	
8	сучеои	2	280÷300	200÷230	200÷220	2.4	0.7÷0.9	17	25	25	150÷180°C
	преклопни	1	280÷320	220	220	2.4	-	17	25	25	
	угаони	1	300÷320	220	220	2.4	-	17	25	25	
12	сучеои	2	350÷380	240	240	2.4	0.5÷0.7	20	25	25	200÷220°C
	преклопни	2	350÷380	240	240	2.4	-	20	25	25	
	угаони	2	350÷380	240	240	2.4	-	20	25	25	
20	сучеои	2÷3	370÷390	250	250	2.4	0.3÷0.4	20	25	25	250°C
	преклопни	2÷3	380÷400	380÷400	240÷270	2.4	-	20	25	25	
	угаони	2÷3	380÷400	380÷400	240÷270	2.4	-	20	25	25	

¹⁾ - H, V, O - хоризонталан, вертикалан и положај заваривања изнад главе, респективно.

4.1.2 MIG заваривање бакра

MIG метода је погодна за заваривање бакра. Као додатни материјал употребљавају се бакарне електродне жице. Да се унесе довољно топлоте за топљење бакра и постигне добро уваривање препоручује се спрејни и/или пулсирајући спрејни пренос капљица додатног материјала и заваривање удесно које јегодно за радове у положеном или хоризонталном положају (сл. 4.5). Када се заварује у вертикалном положају препоручује се смер одоздо-навише. Надглавно заваривање MIG-ом се не препоручује. Потребно је полагати праве заваре, а не широке добијене њихањем између страница жлеба. Чисто аргонска заштита погодна је за делове дебљине до 6.4 mm. За веће дебљине боље је користити смешу 75% He и 25% Ar . Хелијум омогућава мањи унос топлоте у основни материјал, мање предгревање и дубље уваривање, а такође доприноси бржем преласку истопљеног додатног материјала у купку.



Слика 4.5 Варијанте основних положаја заваривања бакра за разне врсте спојева [2]

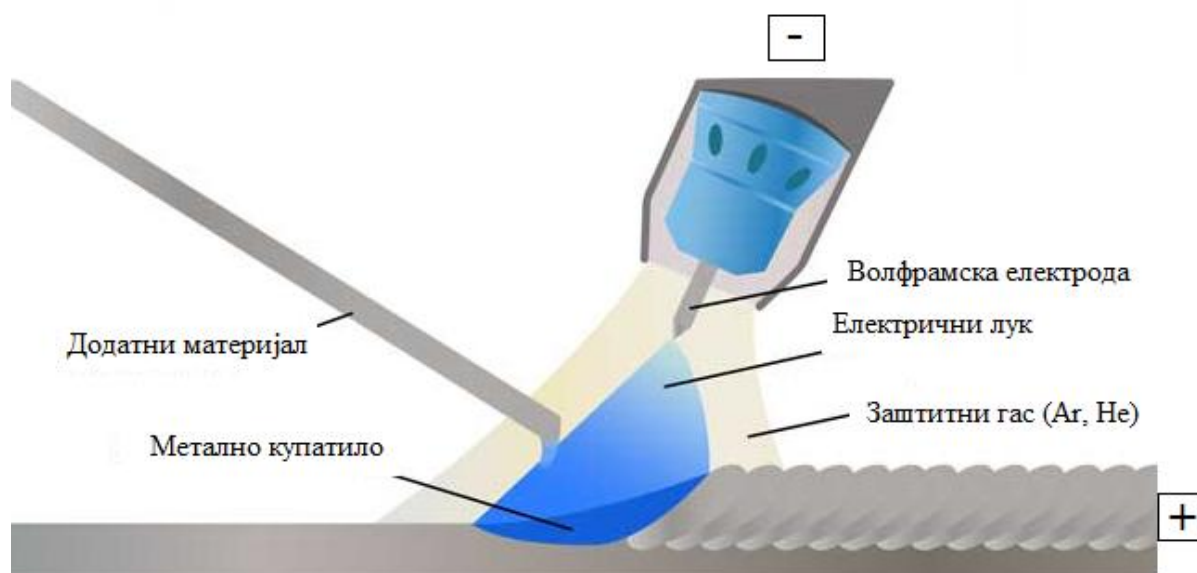
4.1.3 MIG заваривање титана

Код ове методе при заваривању титана 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, као и са коренске стране шав 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. Поклопац се не користи, калем титанске жице треба склонити са машине и спаковати га у пластичну врећу и одложити у поседну комору.

4.2 TIG заваривање

TIG заваривање представља електролучно заваривање нетопљивом волфрамском електродом ($T_t \approx 3410^\circ\text{C}$) у заштити инертног гаса где се спајање метала извршава топљењем и очввршћавањем дела основног и дела додатног материјала (жица – ако се користи), при чему се примењује инертан (неутралан) гас који неће стварати хемијска једињења са елементима из окружења. Активни гасови (CO_2) и њихове смеше не долазе у обзир, јер би изазвали оксидацију врха електроде. Код TIG метода заваривања (Tungsten Inert Gas), електрични лук се успоставља и одржава између волфрамске електроде и радног предмета, а у заштити инертних гасова (Ar , He) (сл. 4.6).



Слика 4.6 TIG метод заваривања [11]

Лимови (плоче) дебљине мање од 6 mm могу се међусобно спајати овим поступком без додатног материјала, стапањем страница волфрамском електродом, где је заварени спој - рубни (ивични) шав.

У нормалним радним условима волфрамска електрода се не топи па се за формирање заваривачког купатила, осим претопљеног материјала, посебно доводи и додатни материјал сличан основном материјалу. Тај материјал, у виду жице или шипке мањег пречника, топи се у електричном луку на ивици купке. Пошто се врх усијане волфрамске електроде лако оксидише (контаминира) кисеоником из ваздуха, неопходна је потпуна заштита врха волфрамске електроде и заваривачког купатила од

гасова из ваздуха. Показало се да инертни гасови (аргон – Ar и хелијум - He) дају стабилан електрични лук и одличну заштиту волфрамске електроде и металне купке.

TIG поступак се може механизовати помоћу посебних аутомата за довођење додатног материјала-жице пречника до 2.5 mm.

Термомеханичке особине чистог волфрама су:

- јачина на кидање: $R_m = 3447 \text{ MPa}$;
- тврдоћа: 45 HRC;
- температура топљења: 3410°C ;
- температура кључања (испаривања): 5630°C ;
- термичка проводност: $\lambda = 199.2 \text{ W/mK}$.

На нашим просторима за TIG заваривање се као заштитни гас најчешће примењује *аргон (Ar)* високе чистоће 99,95 до 99,99%. Испоручује се у челичним боцама под високим притиском од $150 \pm 3 \text{ bara}$. На излазу је редукциони вентил који даје радни притисак од 3.5 bara. Пошто аргон има нижи потенцијал јонизације од хелијума, лакше се у аргону успоставља лук и мањи је пад напона. С обзиром на то да је аргон тежи 10 пута од хелијума, аргонска заштита знатно је делотворнија у хоризонталном положају него хелијумска. Такође, и за заваривање наизменичном струјом подобнији је аргон, јер се лакше успоставља електрични лук кад је електрода на позитивном полуталасу наизменичне струје, која омогућава површинско *катодно чишћење*. Најзад, аргон је погоднији за ручно TIG заваривање, јер случајна промена дужине лука незнатно утиче на његову стабилност.

Хелијум (He) се више користи у Америци, јер је јефтинији будући да се тамо добија као примеса земног гаса. После пречишћавања, хелијум се директно може употребити као заштитни гас. Без обзира на то што аргон има више предности, ипак се за неке специфичне случајеве препоручује хелијум: може се одржавати лук веома мале дужине и тако се добија дубок, танак завар који најбоље одговара за полагање коренског пролаза при изради шавних цеви, хелијум је повољнији за радове у надглавном положају, јер се као лакши од ваздуха подиже у зону заваривања ефикасније штитећи купку. Да би се искористиле добре особине оба гаса (Ar и He), у неким случајевима се препоручује употреба мешавине, нпр. 75% He + 25% Ar [2]. Код заваривања алуминијума и његових легура, најчешће се примењује мешавина Ar и He у односу 70% He + 30% Ar. Мешавином се постиже дубље уваривање и омогућава рад са

наизменичном струјом, којом се остварује тзв. катодно чишћење неопходно за заваривање алуминијума и његових легура.

Извори напајања за TIG-заваривање

TIG заваривање се углавном изводи ручно а само у ретким случајевима и механизовано. Струјно - напонска карактеристика извора напајања је слична као код TIG уређаја. Таква струјно - напонска карактеристика извора напајања означава да се на излазу извора добија $I = \text{const}$, што одговара стрмопадајућој струјно-напонској карактеристици.

На савременим изворима за TIG заваривање може се одабрати:

- наизменична струја ($\sim$),
- једносмерна струја ($\text{ } \text{) и$
- наизменична ($\sim$) и једносмерна струја ($--$).

За радове на терену користе се агрегати који производе наизменичну или једносмерну струју. Енергетски параметри електричног лука (напон лука – U_l и јачина струје у луку – I_l).

У зависности од удела људског рада, разликују се следећи начини TIG заваривања:

- Ручно,
- Механизовано,
- Аутоматско и
- Роботизовано.

Механизација TIG-а, односи се на довођење додатног материјала у лук и померање радног предмета.

Предности TIG метода су:

- врхунски квалитет споја, скоро без грешака;
- нема распрскавања-ДМ се топи у металној купки, не преноси се кроз лук;
- могућа примена и без ДМ;
- одлична контрола облика корена;
- прецизна контрола параметара заваривања;
- применљив на велики број тешко заварљивих ОМ;
- добра контрола извора топлоте и начина увођења ДМ;
- нема троске;
- могуће заваривање у свим положајима.

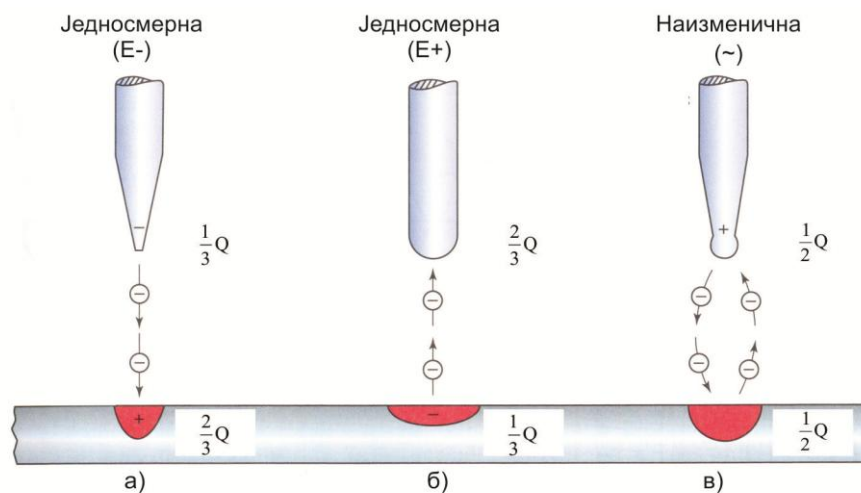
Недостаци TIG метода су:

- релативно мала топлотна моћ и веома ниска продуктивност;
- захтева се посебна обученост заваривача;
- тешкоће у заштити завареног споја при заваривању на отвореном;
- висока цена..

4.2.1 TIG заваривање алуминијума

TIG заваривање алуминијума је један од доминантних метода заваривања алуминијума, поготово када је битна естетика, кад су у питању танки делови, прецизни спојеви и тсл. У последње време део TIG подручја заваривања алуминијума и његових легура је преузео MIG уз помоћ напредних функција електронске контроле лука.

Ефекат катодног чишћења код TIG заваривања. Када је електрода на минус полу (E-) сматра се да се у основни материјал уноси 70% ($2/3 Q$) топлоте лука, а 30% ($1/3 Q$) се преноси на волфрамску электроду (сл. 4.7а). Када је електрода на плус полу (E+), обрнут је случај, 70% ($2/3 Q$) топлоте се предаје волфрамској електроди, а 30% ($1/3 Q$) се преноси у основни материјал (сл. 4.7б). Конкретно то значи да је уваривање, тј. пенетрација у материјалу већа када је електрода на минус полу. Међутим, ако би се заваривало само на E- у заштити аргона, топлота не би била довољна да разбије, а ни да растопи оксидни слој, већ би га уносила у метал шав. При заваривању на E+ дешава се да се оксидни слој разбија и разбацује ван места заваривања. Ранија теорија је била да електрони чистог алуминијума ударају у оксидни слој и разбијају га. Најновија теорија (јер стара теорија није могла да објасни како електрони који практично немају масу могу нешто да разбију) каже да јони гаса, који имају масу, а тиме и знатну кинетичку енергију, ударају и разбијају оксидни слој. Зато се користи наизменична струја за заваривање алуминијума аргоном (сл. 4.7в) где се 50% ($1/2 Q$) топлоте одводи у ОМ, а 50% ($1/2 Q$) одводи на волфрамску электроду. У једној фази када је електрода на плус полу, јони гаса разбијају оксид, а када је електрода на минус полу, следи растапање основног материјала и дубоко уваривање.



Слика 4.7 Утицај врсте струје и поларитета на расподелу топлоте при TIG заваривању [2]

Електрони, заправо не разбијају оксид јер немају масу, али са друге стране потенцијал јонизације саме легуре је већи од потенцијала јонизације оксида. Ово доводи до парадокса. Чист метал шава укључујући и онај у растопљеном стању је лош емитер електрона. Зато препоруку за скидање оксида не треба схватити буквално, јер ако се сав оксид уклони, лук ће постати нестабилан. Из разлога стабилности лука, потребно је да остане нешто оксида после чишћења.

Додатни метали могу бити у облику шипки, жица или жица намотаних на калем као и топлјивих уметака. Посебни стандарди дефинишу додатни метал за разне техничке метале: легуре алуминијума, легуре бакра, легуре магнезијума, легуре никла, угљеничне челике, нерђајуће челике и легуре титана. Стандардизовани пречници жица/шипки крећу се од 0.76-6.4 mm, номиналне дужине 920 mm, жица 0.5-4.8 mm, а спољни пречник калема се креће од 100 до 300 mm.

Још једном се наглашава да додатне жице за TIG метод морају да се одржавају беспрекорно чисте, у стању у каквом су испоручене. Свака прљавштина, мазиво, смоласте материје, уље или чак и ознаке оловком преносе се у шав. Отворене кутије за чување жица, запрљане или замашћене заваривачке рукавице, нечиста опрема, све отежава израду шавова задовољавајућег квалитета. Зато се каже да се додатне жице контролишу "белим рукавицама", па ако на њима остане траг, жице се морају још очистити. У заваривачници, жице се држе у чистом орману и у затвореним кутијама. Свака кутија мора да има налепницу која садржи: пречник жице, хемијски састав и ознаку жице. Треба имати у виду да се жице од нерђајућих челика продају у паковању од 11-22 kg. Основа за добијање "здравих" шавова је правилна припрема страница радних предмета (или закошавање страница) која се изводи брусним плочама или на

машинама алаткама (струг, глодалица, рендисалка). Брусне плоче морају да буду чисте и да се користе само за метал који се заварује. У супротном, задржане честице страних метала прелазе са плоче на странице жлеба и као страни укључци остају у металу шава. После брушења, а непосредно пре заваривања, потребно је очистити странице жлеба жичаном четком. Такође се мора водити рачуна и о мазивима коришћеним при машинској изради жлебова. Обавезна је употреба новог или филтрираног средства за хлађење и подмазивање које не садржи остатке честица од претходне обраде резањем. У сваком случају, странице жлеба и ближу околину треба очистити од површинских оксида, влаге и свих страних материја. Радни предмети дебљине до 3 mm, могу се у сучеоном споју заваривати без закошења, тј. у природном I-жлебу. То се односи на лимове од угљеничних, нисколегираних и нерђајућих челика и алуминијума. У таблицама 4.3 и 4.4 дате су препоруке за избор режима заваривања алуминијума једносмерном и наизменичном струјом.

Таблица 4.3 Препоруке за избор основних параметара ТИГ заваривања алуминијума једносмерном струјом позитивног поларитета [8]

Дебљина материјала mm	Врста споја -	Струја заварив.* А	Радни напон V	Пречник електроде mm	Проток заштитног гаса** l/min	Брзина заварив. m/min	Пречник додатног материјала mm	Број пролаза -
0.25	Прирубни спој	10÷15	10	0.5	9.5÷23.7	1.32	bez	1
0.25÷0.51	I	15÷30	10	0.5	9.5÷23.7	1.32	0.5	1
0.51÷0.76	I	20÷50	10	0.5	9.5÷23.7	1.32	0.5	1
0.76÷0.81	I	65÷70	10	2.4	9.5÷23.7	1.32	0.5	1
0.86÷1.0	I	25÷65	10	1.2	9.5÷23.7	0.91	1.2	1
1.0÷1.3	I	35÷95	10	1.2	9.5÷23.7	0.61	1.2	1
1.3÷1.5	I	45÷120	10	1.6	9.5÷23.7	0.61	1.2	1
1.5÷1.8	I	55÷145	10	1.6	9.5÷23.7	0.61	1.6	1
1.8÷2.0	I	80÷175	10	1.6	9.5÷23.7	0.61	1.6	1
2.0÷2.3	I	90÷185	10	3.2	9.5÷23.7	0.61	3.2	1
2.3÷3.2	I	180÷200	12.5	3.2	9.5÷23.7	0.57	3.2	1
3.2÷6.4	I	230÷340	12.5	3.2	11.8÷28.3	0.51	4.8	1
6.4÷12.7	V	300÷450	13	4.0	11.8÷28.3	0.51	4.8	1
12.7÷19.1	V	300÷450	13	4.8	11.8÷28.3	0.15	6.4	3
19.1÷25.4	X	300÷450	10	4.8	11.8÷28.3	0.13	6.4	2
> 25.4	X	550÷570	10	6.4	18.8÷28.3	0.13	6.4	2

* При ручном извођењу заваривања бирати мање, а при аутоматском веће вредности јачине струје.

** Најбоље је установити оптимални проток пробама.

Таблица 4.4 Препоруке за избор основних параметара ТИГ заваривања алуминијума наизменичном струјом [8]

Дебљина материјала mm	Врста споја -	Размак у корену жлеба mm	Положај заварив.*	Јачина струје А	Пречник електроде mm	Проток заштитног гаса l/min	Брзина заварив. m/min	Пречник додатног материјала mm	Број пролаза -
1.6	I	1.6	H, V, HV	70÷100	1.6÷2.4	9.5	0.20÷0.25	2.4	1
	I	1.6	O	65÷75	1.6	12	0.20÷0.25	2.4	1
2.4	I	2.4	H	95115	2.4÷3.2	9.5	0.20÷0.25	3.2	1
	I	2.4	V, HV	95÷110	2.4	9.5	0.20÷0.25	2.4÷3.2	1
	I	2.4	O	901÷10	2.4÷3.2	12.0	0.20÷0.25	2.4÷3.2	1
3.2	I	3.2	H	125150	3.2	9.5	0.25÷0.31	3.2÷4.0	1÷2
	I	2.4	V, HV	110÷140	3.2	9.5	0.25	3.2	1÷2
	I	2.4	O	115÷140	3.2	12	0.25÷0.31	3.2÷4.0	1÷2
4.8	V(60°)	3.2	H	170÷190	4.0÷4.8	9.5	0.25÷0.31	4.0÷4.8	2
	V(60°)	2.4	V	160÷175	4.0	9.5	0.25÷0.31	4.0	2
	V(90°)	2.4	HV	155÷170	4.0	9.5	0.25÷0.31	4.0	2
	V(110°)	2.4	O	165÷180	4.0	14	0.25÷0.31	4.0	2
6.4	V(60°)	3.2	H	220÷275	4.8÷6.4	14	0.20÷0.25	4.8÷6.4	2
	V(60°)	2.4	V	200÷240	4.8	14	0.20÷0.25	4.8	2
	V(90°)	2.4	HV	190÷225	4.0÷4.8	14	0.20÷0.25	4.0÷4.8	2÷3
	V(110°)	2.4	O	210÷250	4.8	16.5	0.20÷0.25	4.8	2
9.5	V(60°)	3.2	H	315÷375	6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8÷6.4	2
	V(90°)	2.4	H	340÷380	6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8÷6.4	2
	V(60°)	2.4	V	260÷300	4.8÷6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8	3
	V(90°)	2.4	V, HV, O	240÷300	4.8÷6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8	2
	V(60°)	2.4	HV	240÷300	4.8÷6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8	3
	V(110°)	2.4	O	260÷300	4.8÷6.4	19	0.20÷0.25	4.8	3

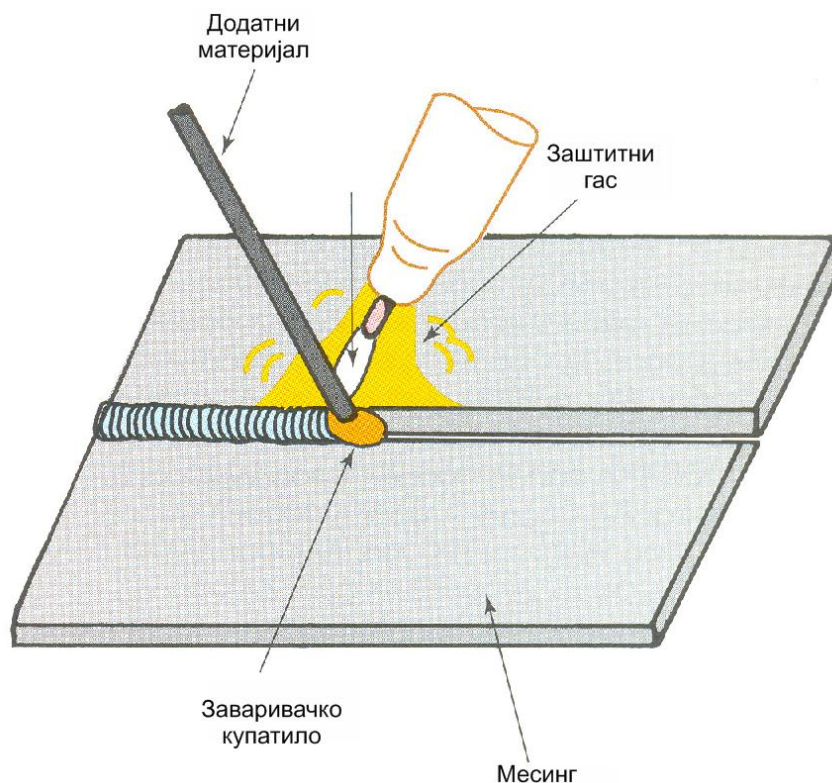
* Н - хоризонтални, V - вертикални, HV - хоризонтално-вертикални, О - изнад главе.

4.2.2 ТИГ заваривање бакра

ТИГ-заваривање **бакра** изводи се једносмерном струјом са волфрамском електродом на минус полу (Е-). Препоручује се торирана (2% Th) волфрамска електрода. Предност се даје техници улево мада обе методе (улево и удесно) могу дати добре спојеве. Препоручује се полагање уских правих завара, јер би широки довели до оксидације купке. Додатни материјал мора да буде сличан основном материјалу. Као заштитни гас употребљава се аргон, хелијум или њихова мешавина. Аргон се препоручује за танке бакарне лимове дебљине до 1.6 mm. Хелијум се употребљава за

дебље пресеке, јер се постиже дубље уваривање. Хелијумско-аргонске мешавине 2:1 или 3:1 често се користе.

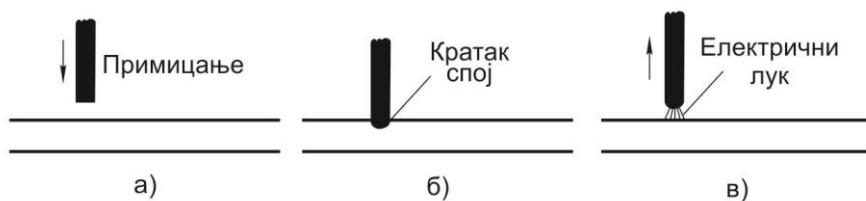
Заваривање **месинга** код TIG поступка испаравање цинка може се умањити усмеравањем лука ка врху шипке додатног материјала (сл. 4.8). Шипка се загрева и повремено топи, али треба пазити да она не додирује радни предмет. Препоручује се загревање делова на 95 до 315°C при TIG и MIG заваривању.



Слика 4.8 TIG заваривање месинга; заваривачки лук је усмерен ка врху додатне шипке да се умањи прегревавање месинга [2]

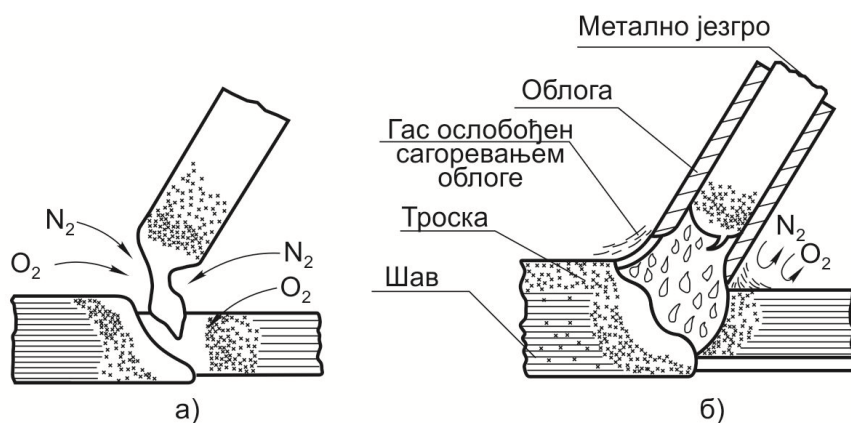
4.3 REL заваривање

Метод REL заваривања се заснива на успостављању и одржавању електричног лука између радног предмета и додатног материјала (електроде). У пракси електрични лук се успоставља најпре примицањем електроде ка радном предмету (сл. 4.9а), затим њиховим додиром (сл. 4.9б) и најзад наглим одвајањем (сл. 4.9в). При одмицању електроде струјно коло тежи да се и даље одржи те настаје лук. Ручним електролучним заваривањем, постиже се већа концентрација топлоте, а самим тим и брже заваривање и ужа зона под утицајем топлоте него при окси-ацетиленском заваривању.



Слика 4.9 Успостављање електричног лука код REL заваривања [7]

Приликом REL заваривања примењују се обложене електроде (сл. 4.10б) којима се постижу боље особине метала шави и ЗУТ-а и стабилнији лук у току заваривања, јер приликом коришћења голих електрода (сл. 4.10а) растопљени метал бива директно изложен кисеонику и азоту из ваздуха. При овој појави механичке особине шави су веома ниске, а нарочито пластичност и ударна жилавост. Стога је такво спајање метала било неприменљиво.



Слика 4.10 Голу (а) и обложена електрода (б) приликом REL заваривања [2, 7]

Основна улога облоге електроде јесте да:

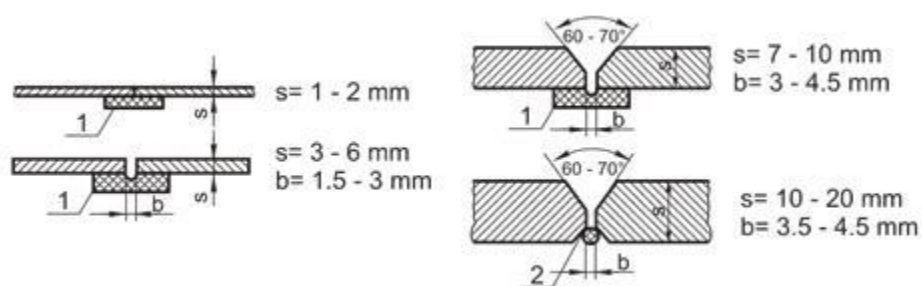
- штити металну капљицу, купку и зону заваривања од кисеоника и азота из ваздуха (спољне атмосфере) где се најпре ствара заштитни гасни омотач око металне капљице на путу кроз електрични лук;
- дезоксидише растоп, тј. редукује оксид гвожђа (FeO) из купке образујући оксиде других елемената који су нерастворљиви у гвожђу и прелазе у троску;
- легира метал шави хемијским елементима садржаним у облози;
- доприноси стабилизацији електричног лука (захваљујући елементима K , Na , Ca и оксида Fe);
- прекрива купку течном троском која као топлотни изолатор продужава време хлађења шави и штити га од ваздуха.

4.3.1 REL заваривање алуминијума

Приликом заваривања алуминијума овом методом, користе се специјалне обложене електроде. Код плоча дебљине 6 - 10 mm потребно је предгревање на 200-

250°C, а за плоче дебљине 10-16 mm препоручује се предгревање на 300-350°C. Облоге електрода намењених за заваривање алуминијума веома су хигроскопне, па се пре заваривања оне обавезно суше на 250-350°C у интервалу од 2 до 3 h. Положаји заваривања могу бити природни (хоризонталан) и принудни (вертикалан, зидни и надглавни), а електрода се води праволинијски уз што краћи електрични лук.

Припрема страница радних предмета, сходно њиховој дебљини, приказана је на слици 4.11. Веома брзо одвођење топлоте из зоне заваривања (3.7 пута брже код Al него код челика) може се умањити постављањем графитних подлошки (позиција 1 на слици 4.11-лево) или уметањем графитног штапића (позиција 2 на слици 4.11-десно) у корен жлеба.



Слика 4.11 Припрема алуминијумских лимова и плоча за електролучно заваривање [7]

После заваривања, треска се одстрањује челичном четком. Предности REL заваривања алуминијума у односу на гасно, јесу већа продуктивност и боља отпорност споја према корозији. Својства отпорности и пластичности REL шава, могу бити блиска основном материјалу. Мана, која нема већи практични значај, јесте микропорозност на лицу шава и у прелазној зони. Микропоре се уочавају само под микроскопом и не погоршавају механичка својства споја, али у извесној мери смањују корозивну отпорност. Знатно штетнији могу да буду гасни мехурићи који се појављују при коришћењу влажних електрода или ако се алуминијумске плоче заварују без предгревања. Без обзира на ове недостатке, REL заваривање алуминијума, још увек налази примену, мада се предност даје методима заваривања у заштити аргона (TIG и MIG).

Чињеница је да постоји 4 типа алуминијумских електрода (чист Al, AlMn, AlSi5 и AlSi12, од којих је ова последња најчешће коришћена). Облога електроде садржи соли за растварање оксида, као и елементе за стабилизацију лука и заштиту од спољашње атмосфере.

4.3.1 REL заваривање бакра

REL заваривање *бакра* изводи се бакарним обложеним електродама што већег пречника који омогућава примену јаче струје, односно већи унос топлоте у основни материјал. Заваривање се мора изводити у положеном положају. Када се заварују бакарни предмети дебљине од 3.2 mm, предлаже се температура предгревања 260°C или више.

За REL заваривање калајне бронзе препоручује се полагање праволинијских завара. Основни метал – бронза мора бити предгејана на 200°C, а загревање између појединих завара треба да омогући да се температура основног материјала одржи на 200°C. После полагања сваког завара, потребно је чекићем искивати завар и ЗУТ.

4.4 GPZ заваривање

Гасно заваривање (сл. 4.12) се сврстава у методе заваривања топљењем, јер се чврст спој између завариваних делова остварује топљењем и затим очвршћивањем њихових страница. Иако се као гориви гас највише примењује ацетилен, у неким областима заваривања и сродним поступцима користе се и други гасови. Осим техничких гасова за заваривање се употребљавају и додатни материјали, а понекад и топителји.



Слика 4.12 Поступак гасног заваривања [12]

За заваривање и сечење *гориви гас* је пре свега ацетилен C_2H_2 . Други гориви гасови, као водоник, нафтни гас, коксни гас, земни гас, метан, бензинске паре не користе се за заваривање челика због ниже температуре пламена и јаког оксидишућег дејства. Могу бити коришћени за предгревање, жарење или сечење, као и за заваривање неких нискотопљивих метала и њихових легура.

За заваривање челика употребљавају се разне врсте *додатних материјала* (жица) који се бирају зависно од врсте завариваног челика. Неопходно је да жице буду глатке

и чисте, тј. без оксида, масти, боја и других нечистоћа. Треба их чувати и од влаге. У случају појаве корозије, потребно је да се жице пре употребе очисте брусним папиром.

Топитељи су средства у облику праха или пасти неопходних за заваривање ливеног гвожђа, бакра, месинга, бронзи, алуминијума и нерђајућих челика и других легура. Топитељи штите течан метал од оксидације у процесу заваривања, јер везују тешко топлјиве оксиде градећи једињења која као лакша од метала испливају на површину. Према хемијском саставу, топителји могу бити кисели или базични, а њихово дејство заснива се на чињеници да метали растварају сопствене оксиде, а оксиде других метала преводе у троску.

Опрема за гасно заваривање састоји се из: боца за гасове, редукционих вентила, сигурносних осигурача (сувих или водених), разводних црева, горионика и измељевих пламеника.

4.4.1 GPZ заваривање алуминијума и бакра

Окси-ацетиленско заваривање **алуминијума** може бити успешно, али оно заостаје за TIG-ом и MIG-ом. Гасно заваривање се не препоручује из разлога зато што доводи у шав и у радни предмет више топлоте него код осталих метода, па се добија много шири ЗУТ и веће деформације него код електролучних метода.

Бакар и његове легуре могу се заваривати окси-ацетиленским пламеном или другим горивим гасовима. Међутим, окси-ацетиленски пламен има предност, јер ослобађа већу количину топлоте у односу на друге угљоводоничне гасове. Општа процедура је слична оној која се спроводи и при заваривању челика. Због бржег одвођења топлоте кроз бакар препоручује се избор пламеника за један до два броја већег него за челике исте дебљине. Бакарни предмети дебљи од 3.2 mm предгревају се пре заваривања. При гасном заваривању бакра и његових легура неопходно је користити топителје (боракс, борну киселину или њихове мешавине) да би се спречила оксидација бакра.

5. ЗАКЉУЧАК

Заваривање има веома широку и веома разнородну примену у машинству и другим индустријским гранама. Омогућава израду одговорних машинских делова и читаве конструкције спајањем делова једноставног облика, претежно израђених од железарских полупроизвода - лимова, плоча, профила или у комбинацији са одливцима и отковцима. Примењује се и при репаратури или регенерацији похабаних и оштећених делова или целе опреме.

Алуминијум спада у групу лаких - нежелезних и средњетопљивих метала. Поступак добијања овог метала се изводи из руде боксита електрометалуршким методама. Неке механичке и технолошке особине алуминијума и његових легура се могу поправити деформационим ојачањем, термичком обрадом и легирањем. Највише коришћени легирајући елементи су силицијум, бакар, магнезијум, манган, цинк и др. Алуминијум и његове легуре спадају у тешко заварљиве материјале, пре свега због формирања тешко топљивог оксида алуминијума Al_2O_3 . Избор метода и технологије заваривања алуминијума се своди на добијање једног, непропусног и беспорозног шавва, без прслина, са што је могуће већом јачином чистог метала шавва али и зоне утицаја топлоте.

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 оджари постаје знатно мекши и пластичнији.

Бакар припада групи тешких метала и црвенкасте је боје, није магнетичан. Спада у средњетопљиве метале. Механичка својства бакра веома зависе од стања испоруке, односно претходне механичке и термичке обраде. Може да се легира са више елемената, али су најважнији цинк и калај. Легуре бакар-цинк зову се месинзи, а легуре бакар-калај (манган, берилијум, ...) бронзе. Додатни легирајући елементи могу се користити да се образују различите врсте бронзи и месинга.

У овом завршном раду су дате, надам се, веома корисне напомене за успешно заваривање ових условно или веома тешко заварљивих метала и њихових легура. Упрошћено речено, обојени метали и њихове легуре данас се најуспешније заварују методима заваривања у заштити инертних гасова нетопљивом или топљивим електродама.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
2. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
3. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: *Технологија заваривања-приручник*, друго издање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
4. Интернет страница: <http://www.mflkv.kg.ac.rs/index.php/centar-za-ispitivanje-i-spajanje-materijala>, приступљено 20.08.2017
5. Интернет страница: <http://www.eksi.co.rs>, приступљено 21.08.2017.
6. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић: *Гасно заваривање-приручник*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
7. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић: *REL заваривање-приручник*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
8. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић: *TIG заваривање-приручник*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
9. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић: *MAG/MIG заваривање-приручник*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
10. Интернет страница: http://var.rs/wp-content/uploads/2016/03/1458397643_image45.png, приступљено 03.09.2017.
11. Интернет страница: https://media.licdn.com/mpr/mpr/shrinknp_800_800/AAEAAQAAAAAAAAAgzAAAJDdjNmUxYzAwLTRlZDEtNDJhMS04NDQ3LTZhOTIyNjQwZDE3Ng.jpg, приступљено 06.09.2017.
12. Интернет страница: <http://roa.h-cdn.co/assets/15/48/980x490/landscape-1448825915-roa120115dpt-boot-lostart-81.jpg>, приступљено 05.10.2017.