

SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Poslijediplomski studij strojarstva

**KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT**

**STRUKTURNE PROMJENE ALUMINIJA SERIJE 6XXX UZROKOVANE  
ZAVARIVANJEM**

**Ratko Mimica**

**Split, travanj 2015.**

## Sadržaj:

1.	Uvod .....	3
2.	Zavarivanje taljenjem .....	4
2.1	Zona taljenja .....	4
2.2	Djelomično protaljena zona - partially melted zone (PMZ) .....	5
2.3	Zona utjecaja topline – Heat affected zone(HAZ):.....	7
3.	Aluminijske legure serije 6xxx .....	7
3.1	Očvršćivanje precipitatima .....	8
3.2	Razvoj mikrostrukture .....	8
3.3	Mehanizmi očvršćivanja .....	9
3.4	Temperna stanja – standardna .....	9
3.5	Višefazna toplinska obrada.....	11
3.6	Pregled važnijih znanstvenih saznanja iz područja precipitata.....	13
4	Stabilnost precipitata tokom zavarivanja .....	14
4.1	Produkt otopivosti i temperatura otapanja.....	15
4.2	Granice otopivosti - Stabilni precipitati .....	16
4.3	Granice otopivosti - Metastabilni precipitati.....	17
4.4	Ukrupnjavanje čestica .....	17
4.5	Otapanje čestica .....	18
5.	Zavarivanje toplinski očvrstivih aluminijskih legura .....	19
5.1	Profil tvrdoće toplinski očvrstnute aluminijske legure .....	19
5.2	Poveznica tvrdoće ,vršne temperature i mikrostrukture .....	21
5.3	Kritična zona i utjecaj parametara zavarivanja.....	22
5.4	Korektivne i preventivne radnje gubitka svojstava toplinski očvrstivim legurama. ....	23
	Preventivne radnje .....	23
	Korektivne radnje .....	24
6	Tehnike optimiranja u zavarivanju .....	24
6.1	Pregled područja optimiranja u zavarivanju.....	25
6.2	Neuralne Mreže .....	26
6.2.1	Karakteristike neuralnih mreža.....	26
6.2.2	Osnove umjetnih neuralnih mreža .....	26
6.2.3	Struktura neuralnih mreža.....	27
6.2.4.	Tipovi neuralnih mreža .....	28
6.2.5	Razvoj NN modela.....	29
6.3	Mehanizmi optimizacije .....	30
6.3.1	Propagacija unatrag – back propagation algorithm (BP) .....	30
6.3.2	Levenberg-Marquardt optimizacija .....	33
6.3.3	Optimiranje rojem čestica - Particle Swarm Optimisation(PSO).....	34
	Reference:.....	36

## 1. Uvod

Aluminij je neophodan u modernoj civilizaciji poradi manje specifične težine, čvrstoće i obradivosti. Područja primjene variraju od transportne industrije, građevinarstva ili proizvodnje i pakiranja hrane. Čisti aluminij je mekan i pruža neznatan otpor plastičnoj deformaciji. Međutim ukoliko se legira sa određenom količinom drugih elemenata moguće je dobiti čvrstoću čelika uz dvostruko manju težinu. Toplinskom obradom dodani legirani elementi formiraju precipitate veličine nekoliko nanometara, koji predstavljaju prepreke pomicanju dislokacija, na taj način očvršćujući leguru. Takav proces se naziva očvršćivanje precipitatima ili toplinsko očvršćivanje.

Aluminijske legure serije 6xxx spadaju u toplinski očvrstive legure koje se isporučuju kao ekstrudirani proizvodi u standardnim toplinskim stanjima. Iako je proces toplinsko očvršćivanja značajan prilikom zavarivanja dolazi do znatnog gubitka mehaničkih svojstava. Složeni kemijsko-fizikalni procesi koji se odvijaju tokom i nakon procesa zavarivanja čine ispitivanja zavarenih spojeva multidisciplinarnim područjem. Kod toplinski očvrstivih aluminijskih legura problematika se dodatno komplicira sa iznimno malom veličinom precipitata i brojem različitih intermetalnih faza. Iako su aluminijske legure u upotrebi već desetak godina, intenzivnije istraživanje aluminija i njegovih legura krenulo je tek odnedavno, porastom zahtjeva za upotrebom aluminijskih legura u transportnoj industriji. Bolje razumijevanje mehanizama koji se dešavaju prilikom toplinske obrade vodi boljoj kontroli procesa i kvalitetnijim proizvodima.

U ovom radu dat je teoretski pregled područja istraživanja, zajedno sa relevantnim znanstvenim postignućima.

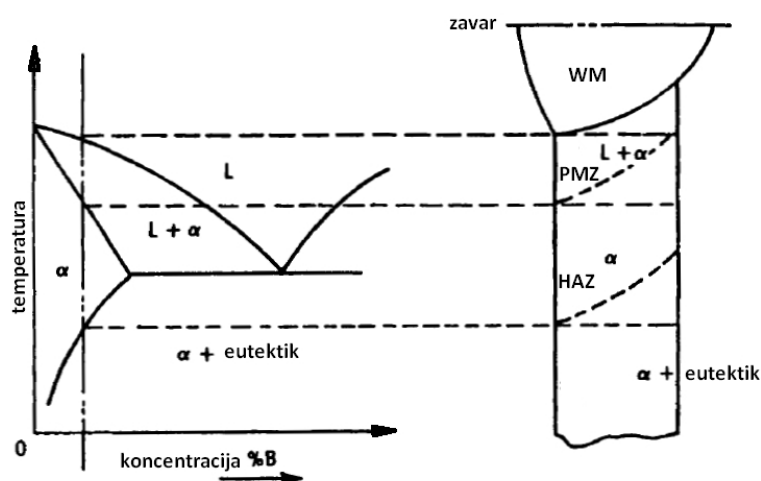
## 2. Zavarivanje taljenjem

Zavarivanje taljenjem je proces kojim se komponente spajaju uz pomoć intenzivnog izvora topline. Materijal se lokalno zagrije preko temperature tališta formirajući bazenčić taline. Nakon skrućivanja ostvaruje se nerastavljivi zavareni spoj. U protaljenom dijelu spoja materijal je u vrtložnom gibanju uvjetovanom uzgonom, gradijentom površinske napetosti, blizinom mlaza plazme i elektromagnetskim silama, ukoliko se radi o elektrolučnim procesima zavarivanja. U dijelu spoja koji nije protaljen (oko bazenčića taline), varijacija temperature sa vremenom, takozvani termalni ciklus, može rezultirati raznim faznim promjenama u krutom stanju kao i promjenama u strukturi kristalnog zrna. Interakcija između osnovnog materijala i izvora topline popraćena je serijom fizikalnih i kemijskih procesa, koji uvjetuju finalni sastav zavarenog spoja, geometriju, strukturu i svojstva.

Strukturne promjene materijala uzrokovane zavarivanjem su različite u ovisnosti o kojem se području zavarenog spoja radi, pa će se u sljedećem tekstu dati pojašnjenja tih područja zajedno sa njihovim karakterističnim promjenama.

### 2.1 Zona taljenja

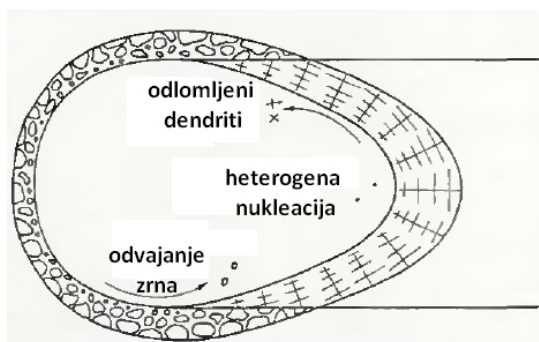
Zona taljenja (WM) definira se kao dio materijala koji se u potpunosti otopio zagrijavajući se uslijed termalnog ciklusa iznad likvidus temperature (*slika 1*). Vrlo je važna za ukupna svojstva zavarenog spoja jer se u tom području odvija taljenje skrućivanje, što rezultira sasvim različitom strukturom u odnosu na osnovni materijal čak i kad se radi o autogenim zavarima.



*Slika 1.* Shematski prikaz odnosa različitih područja zavarenog spoja u ovisnosti o koncentraciji legure.(1)

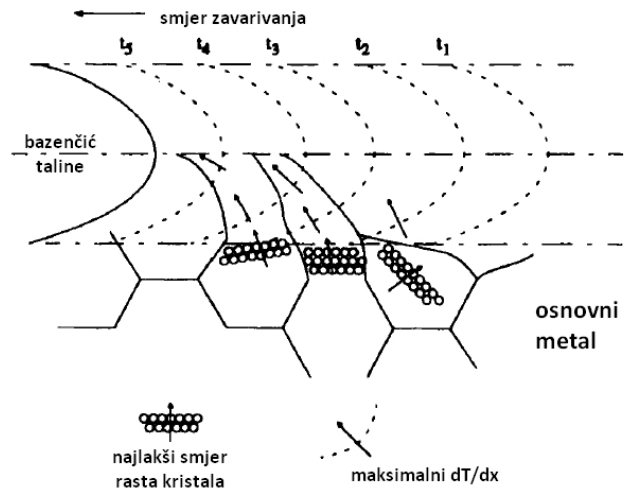
Osnovne smjernice koje određuju skrućivanje kod procesa zavarivanja su (2):

- skrućivanje je proces koji počinje nukleacijom pa zatim rastom kristala,
- Nukleacija je lakša ukoliko ima podlogu na kojoj počinje, heterogena nukleacija dominira,
- Za aluminijske legure su identificirana 3 mehanizma nukleacije (*slika 2*) (3),
- Rast novih kristala je kompetitivan(*slika 3*),
- Dok skrućivanje čistog metala uključuje samo premještanje atoma, kod legura se uz to sve dešava i „prilagodba“ koncentracije. Prilagodba nastaje poradi različite otopivosti u krutom u odnosu na tekuće stanje (obično je otopivost znatno veća u tekućem stanju), rezultirajući dodatnim načinima skrućivanja u odnosu na čiste metale.



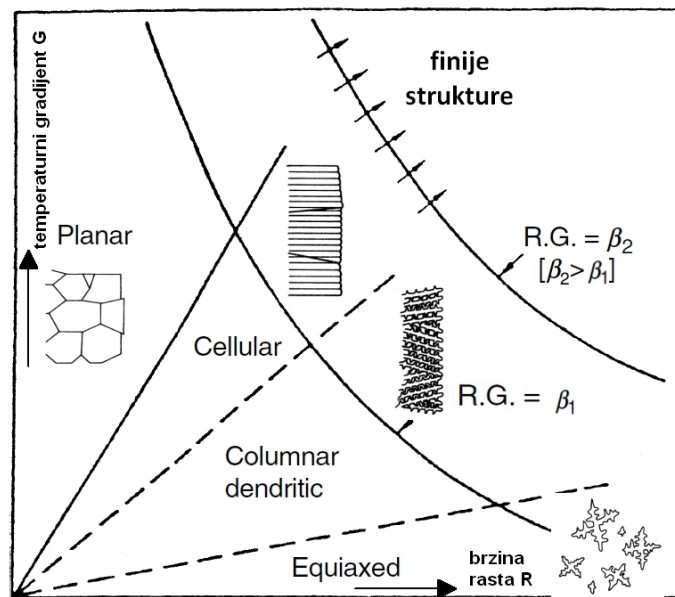
MEHANIZAM 1: fragmentacija dendrita  
 MEHANIZAM 2: heterogena nukleacija  
 MEHANIZAM 3: odvajanje zrna

Slika 2. mehanizmi nukleacije (3).



Slika 3. kompetitivni rast kristala(1).

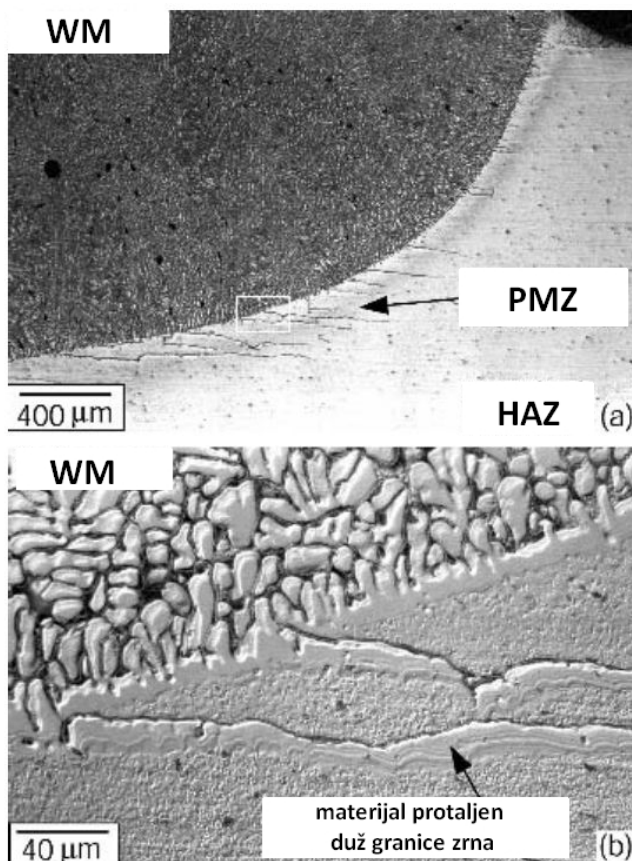
Kada kristalit raste put pothlađene taline, rast je usmjeren u takozvane dendritne smjerove rasta, ili preferirane smjerove rasta. Za FCC rešetke to predstavlja  $\langle 100 \rangle$  smjer. Oblik i veličina nastalih zrna ovise o gradijentu topline i brzini rasta kristala, odnosno iznosu pothlađenja pri uvjetima skrućivanja (slika 4)(1).



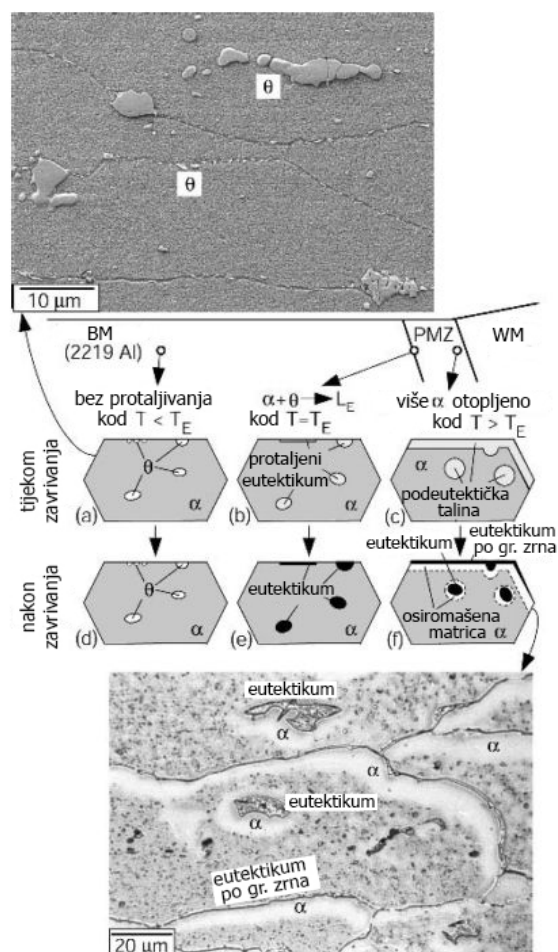
Slika 4. Način rasta kristala u ovisnosti o brzini rasta (pothlađivanju) i temperaturnom gradijentu (1).

## 2.2 Djelomično protaljena zona - partially melted zone (PMZ)

Djelomično protaljena zona (PMZ) je neminovna pojava koja prati zavarivanje legura. Pod tom zonom se smatra područje odmah do metala zava, za nju je karakteristično što se skrućivanje legura ne dešava na jednoj temperaturi već u temperaturnom području između likvidus i solidus linije za tu koncentraciju (slika 1). Slika 5a prikazuje dio PMZ prilikom GMAW zavarivanja aluminijske legure 6061 za dodatnim materijalom 4145 (4). Prisutnost tamno nagriženih granica zrna uz rub taljenja je indicacija protaljivanja po granicama zrna. Mikrostruktura unutar bijelog kvadrata je uvećana na slici 5b. Protaljen a potom skrnuti materijal uzduž granice zrna sastoji se od tamno nagrižene eutektičke granice zrna i trake  $\alpha$ -faze bogate aluminijem uzduže te granice.

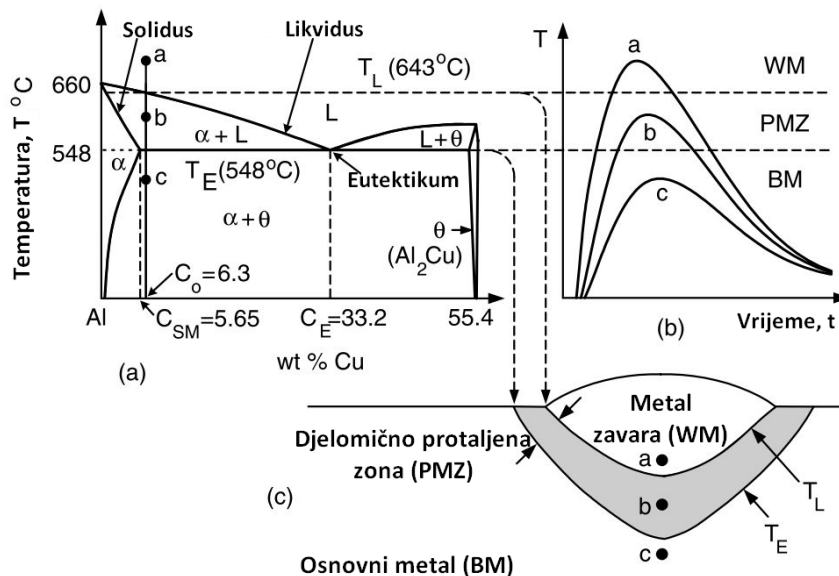


Slika 5. Djelomično protaljena zona prilikom GMAW zavarivanja 6061/4045 (4).



Slika 6. Razvoj mikrostrukture u PMZ aluminijske legure 2219 sa slikom osnovnog metala na vrhu i optičkim mikrografom PMZ na dnu(4).

Mehanizam protaljivanja može se objasniti na primjeru aluminijske legure 2219. Kao što je vidljivo u gornjem dijelu **slike 6** osnovni metal sadržava velike i male  $\theta$  čestice ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) unutar zrna i po granicama. Na granici između PMZ-a i osnovnog metala (**slika 6b**) materijal je zagrijan na eutektičku temperaturu  $T_E$ . Protaljivanje nastupa po eutektičkoj reakciji  $\alpha + \theta \rightarrow L_E$  gdje je  $L_E$  talina eutektičke koncentracije  $C_E$ . Reverzibilna reakcija nastupa hlađenjem,  $L_E$  se skrutne bez bez promjene kemijskog sastava ostavljajući eutektikum u zrnju i po granicama. Iznad  $T_E$ , tj., unutar PMZ protaljivanje je pojačano.  $\alpha$  matrica oko taline eutektičke koncentracije se otapa rezultirajući povećanjem volumena (**slika 6c.**). To uzrokuje promjenu kemijskog sastava taline sa eutektičkog na podeutektički ( $< C_E$ ), kao što je uvjetovano faznim dijagramom (**slika 7**). Po skrućivanju, iz taline podeutektičke koncentracije prvo dolazi do izlučivanja  $\alpha$  faze osiromašena sa Cu a tek kada se kemijski sastav taline vrati na vrijednost  $C_E$  nastupa skrućivanje eutektikuma (također uvjetovano dijagramom slijevanja). Rezultat su područja osiromašena sa Cu uz eutektikum po granici kristalnih zrna(4).



**Slika 7.** Formiranje PMZ u zavaru aluminijske legure 2219: a) Al-Cu fazni dijagram, strana aluminija, b) ekvivalentni termalni ciklusi, c) poprečni presjek(4).

### 2.3 Zona utjecaja topline – Heat affected zone(HAZ):

Područjem zone utjecaja topline (HAZ) smatra se dio materijala od ruba PMZ pa sve do područja gdje nisu zabilježene promjene svojstava u materijalu nakon zavarivanja. Materijal u HAZ je podvrgnut varijabilnom toplinskom ciklusu, a dinamika promjena koje se dešavaju u materijalu, osim o intenzitetu i trajanju toplinskog ciklusa ovise i o ostalim parametrima, kao što je stanje materijala prije procesa zavarivanja. Kako bi se bolje razumjele promjene koje se dešavaju u HAZ toplinski očvrstivih legura aluminija potrebno je detaljnije proučiti mehanizme i zakonitosti po kojima se odvija proces očvršćivanja precipitatima.

## 3. Aluminijske legure serije 6xxx

Aluminijske legure serije 6xxx spadaju u toplinski očvrstive, korozijski otporne slitine, posebno u atmosferskim uvjetima. Odlična je za obradu gnječanjem i ekstrudiranjem, s mogućnošću izrade vrlo kompleksnih oblika. Mogu biti dostupne u više varijanti, s različitim udjelima silicija i magnezija, optimirajući na taj način različite skupine svojstava, kao što su izgled površine, pogodnost anodiziranju ili mehanička svojstva. Mehanička svojstva nisu značajna u ekstrudiranom stanju, pa toplinskom obradom, bilo umjetnim ili prirodnim dozrijevanjem postizemo dodatna poboljšanja tvrdoće i čvrstoće. Dobra zavarljivost i lemljivost te dobra deformabilnost u hladnom stanju čine je izvrsnom za konstrukcije transportne primjene (dijelovi automobila, okviri od bicikli, željeznički vagoni,...).

Zbog izvrsne sposobnosti obrade ekstruzijom Al-Mg-Si toplinski očvrstive aluminijske legure u današnje vrijeme čine više od 80% ekstrudiranih proizvoda(5). Slitine serije 6xxx spadaju u korozijski otporne slitine, posebno u atmosferskim uvjetima, dok u prisustvu kloridnog medija dolazi do proboja zaštitnog filma što sugerira da su navedene slitine sklone jamičastoj koroziji zbog prisutnosti intermetalnih faza koje pogoduju stvaranje mikrogalvanskih članaka (6).

### 3.1 Očvršćivanje precipitatima

Magnezij i silicij su glavni legirni elementi koji formiraju magnezijev silikat ( $Mg_2Si$ ) ukoliko je težinski udio magnezija u odnosu na silicij 1.77:1(5).  $Mg_2Si$  čini legure 6xxx toplinski očvrstivim, a toplinska obrada upotrebljava se za modificiranje svojstava materijala promjenom mikrostrukture. Ona pruža načine modifikacije veličine, kemijskog sastava, vrste, morfologije i rasporeda precipitata u dozrijevanim aluminijskim legurama. Uslijed toplinske obrade takvih legura dolazi do formiranja precipitata veličine nekoliko nanometara, koji predstavljaju prepreke pomicanju dislokacija kroz kristal, na taj način očvršćujući aluminij.

### 3.2 Razvoj mikrostrukture

Proces se sastoji od 3 glavne faze:

- Rastopno žarenje – zadržavanje legure između solvus i solidus linije kako bi u aluminijskoj matrici otopili legirne elemente.
- Naglo hlađenje – cilj je onemogućavanje difuzije odnosno kreiranje prezasićene aluminijske matrice na sobnoj temperaturi. Osim samih atoma, i veliki broj vakancija ostane zamrznut prilikom naglog hlađenja, što je od velike važnosti u sljedećoj fazi postupka.
- Dozrijevanje (starenje) – formiranje precipitata kontroliranom dekompozicijom prezasićene krute otopine. Dekompozicija se može obaviti na bilo kojoj temperaturi ispod solvusa, pa i na sobnoj. Takvo dozrijevanje naziva se prirodno dozrijevanje.

Vremena držanja na određenim temperaturama i iznosi tih temperatura ovise o kemijskom sastavu legura, kao i finalnoj strukturi koja se želi postići. Prezasićena kruta otopina dozrijevanjem teži prelasku u stabilnu fazu ( $\beta$  –  $Mg_2Si$  kod Al-Mg-Si legura), ali prije dostizanja ravnotežnog stanja uobičajena je pojava metastabilnih faza. Pregled metastabilnih i ravnotežnih faza dat je u **tablici 1**.

**Tablica 1.** Pregled kompleksnog redoslijeda precipitacije 6xxx legura(7).

Faza:	Koncentracija (at.%)	Oblik	Opis, značajke
SSSS	0-5%*	Točkaste nepravilnosti	Prezasićena kruta topina: supstitucijski atomi Mg i Si, značajna koncentracija vakancija.
Nakupine atoma	1-15%*	nakupine	Rane nakupine otopljenih atoma, nepravilnosti u entalpiji formiranja, izražen utjecaj entropije.
Nakupine (1-5 nm)	10-25%	3d, 2d	Sfere i diskovi
inicijalna- $\beta''$	15-45%	igličasti	Monoklinska rešetka, jednostruki Si stupovi
pred- $\beta''$	35-60%	igličasti	Monoklinska rešetka, dvostruki Si stupovi, pojava cilindra niže gustoće (low density cylinder -LDC)
$\beta''$	50-90%	igličasti	Monoklinska rešetka, dvostruki Si stupovi, LDC pomaknut za 0.5b
B', $\beta'$ , U1, U2, U3	60-100%	Štapni	Skup heksagonalnih, trigonalnih i , ortorompskih faza
$\beta$	95-100%	kubični	Stabilna $Mg_2Si$ faza sa anti-fluoritnom strukturom, višak Si formira dijamantnu rešetku

\* precipitate i matricu je teško razlikovati. Čestice su nedozrele i sadržavaju previše Al da bi se odredilo sučelje

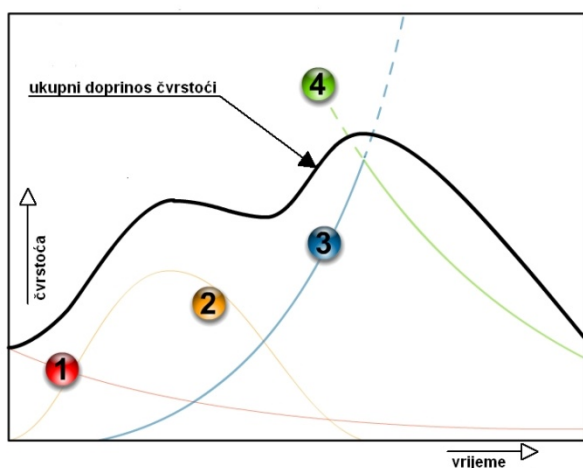


### 3.3 Mehanizmi očvršćivanja

Toplinsko očvršćivanje ovisi o obliku, veličini i tipu formiranih precipitata, a postoje 3 bitna mehanizma očvršćivanja.

1. Coherency strain hardening – nastaje uslijed otpora gibanju dislokacija kroz polja deformacija nastala kod koherentnosti matrice i precipitata.
2. Kemijsko očvršćivanje – odnosi se na povećanje naprezanja potrebnog za odrezati/presjeći koherentni precipitat.
3. Disperzijsko očvršćivanje – nastaje uslijed povećanja naprezanja da zaobiđe nekoherentnu česticu.

Bitno je primijetiti da ovi mehanizmi nisu međusobno isključivi, odnosno da su mnoge legure dizajnirane u svrhi maksimalnog iskorištenja sva tri mehanizma(7). Tipična krivulja dozrijevanja sa mehanizmima očvršćivanja prikazana je na sljedećoj slici(**slika 8**).



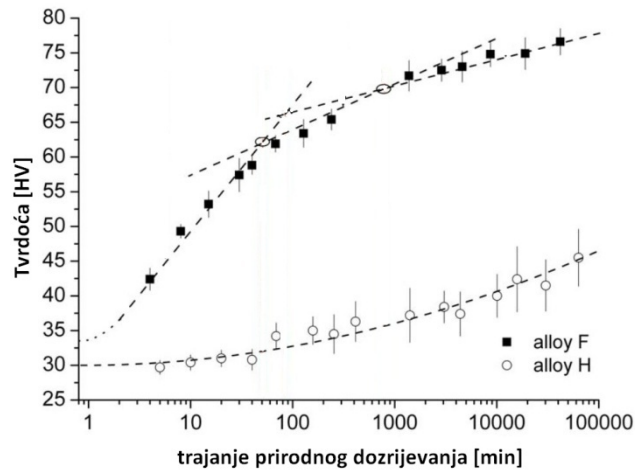
Slika 8.: Ukupni doprinos mehanizama očvršćivanja čvrstoći uslijed toplinske obrade(8).

1. Očvršćivanje uslijed otopljenih atoma u krutoj otopini, rastom metastabilnih faza i okrupnjivanjem ih je sve manje.
2. Coherency strain hardening, precipitati su u početku presitni da se dislokacija savije oko njih, rezultirajući manjom čvrstoćom, u kasnijim stadijima razmaci su preveliki, tvrdoća tada također pada. Maksimalno očvršćenje nastaje kada je međusobni razmak precipitata sličan minimalnom radijusu zakrivljenosti dislokacije.
3. Kemijsko očvršćivanje raste sa povećanjem radijusa čestice/vremena trajanja
4. Uslijed formiranja novih nekoherentnih čestica, u kasnijim fazama mehanizam disperzijskog očvršćivanja dominira. Daljnjim okrupnjivanjem efekt očvršćivanja pada.

### 3.4 Temporna stanja - standardna

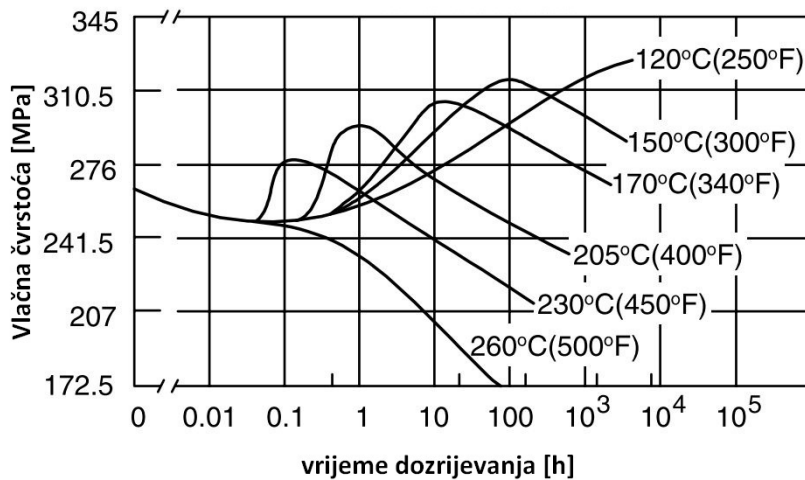
Joseph C. Benedyk je nedavno izdao vrlo detaljan pregled međunarodnih oznaka za temporna stanja toplinski očvrstivih aluminijskih legura(9) te područje primjene svake od njih. Zbog potreba istraživanja u daljnjem tekstu dati će se osvrt na osnovne: prirodno dozrijevanu strukturu(T4), strukturu dozrijevanu na maksimalnu tvrdoću (peak hardness)(T6), te predozrela struktura(T76 – T73).

**T4** - prirodno dozrijevana struktura obuhvaća rastopno žarenje, hlađenje u vodi zatim starenje na sobnoj temperaturi. Na nižim temperaturama kao što je sobna koeficijent difuzije je mali, pa su reakcije usporene kao i efekt očvršćivanja(**Slika 9**).



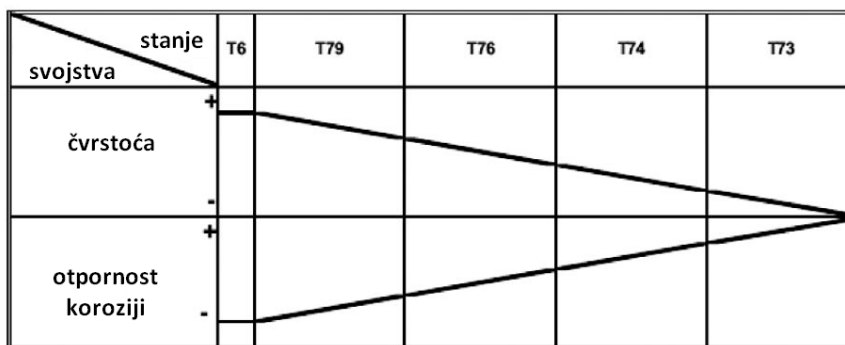
**Slika 9.** Promjena tvrdoće u ovisnosti o vremenu Al-Mg-Si legura: H – nizak maseni udio Mg i Si (Mg,Si = 0.4%); L – viši maseni udio (Mg=0.59%, Si=0,82%) legirnih elemenata(10).

**T6** – umjetno dozrijevana struktura, sastoji se od rastopnog žarenja, gašenja u vodi te umjetnog dozrijevanja na temperaturama od 120°C do obično 200°C. na nižim temperaturama procesi su sporiji pa time i efekti učvršćivanja što smanjuje ekonomičnost toplinske obrade, a opet preko 200°C se u pravilu ne ide jer se promjene znatno ubrzaju pa je teže kontrolirati vremenske intervale vezane za dobivanje vršne tvrdoće - peak hardnessa(*slika 10*).



**Slika 10.** Karakteristike umjetnog dozrijevanja za AA 6061 u T4 stanju(4).

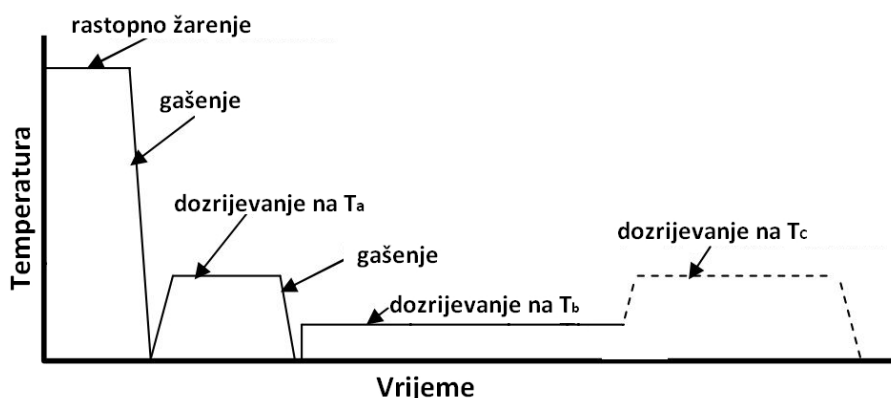
**T7** – predozrijevana struktura se dodjeljuje toplinski očvrstivim aluminijskim legurama, većinom serije 7xxx, koje se predozrijevaju kako bi se postigao kompromis između otpornosti na intergranularnu koroziju, otpornosti na napetosnu koroziju, udarne žilavosti i vlačne čvrstoće. Dodatna oznaka indicira koliko je legura predozrijevana što je shematski prikazano *slikom 11*.



Slika 11. Kvalitativni prikaz smanjenja čvrstoće nauštrb otpornosti koroziji od T79 do T73.

### 3.5 Višefazna toplinska obrada

Dosta godina je za toplinski očvrstive aluminijske legure smatrano da, nakon umjetnog dozrijevanja, mikrostruktura i mehanička svojstva ostaju stabilna tokom boravka na temperaturama nižim od onih korištenih pri dozrijevanju. Međutim, R.N. Lumley, I.J. Polmear i A.J. Morton su koristeći višefaznu toplinsku obradu razvili nova temperna stanja koja su primjenjiva za sve toplinski očvrstive aluminijske legure(11). Zabilježen je porast tvrdoće, čvrstoće, dinamičke izdržljivosti i udarne žilavosti, kod nekih legura je povećana otpornost koroziji uz zadržavanje visoke čvrstoće. Autori su postupak označili kao „I“ – interrupted odnosno prekinuti, shematski prikaz je na **slici 12**. Za potrebe istraživanja поближе će se objasniti 3 temperna stanja, poddozrijevano(T6I4), dozrijevano na vršnu tvrdoću(T6I6), i predozrijevano (T6I76)(**tablica 2**).

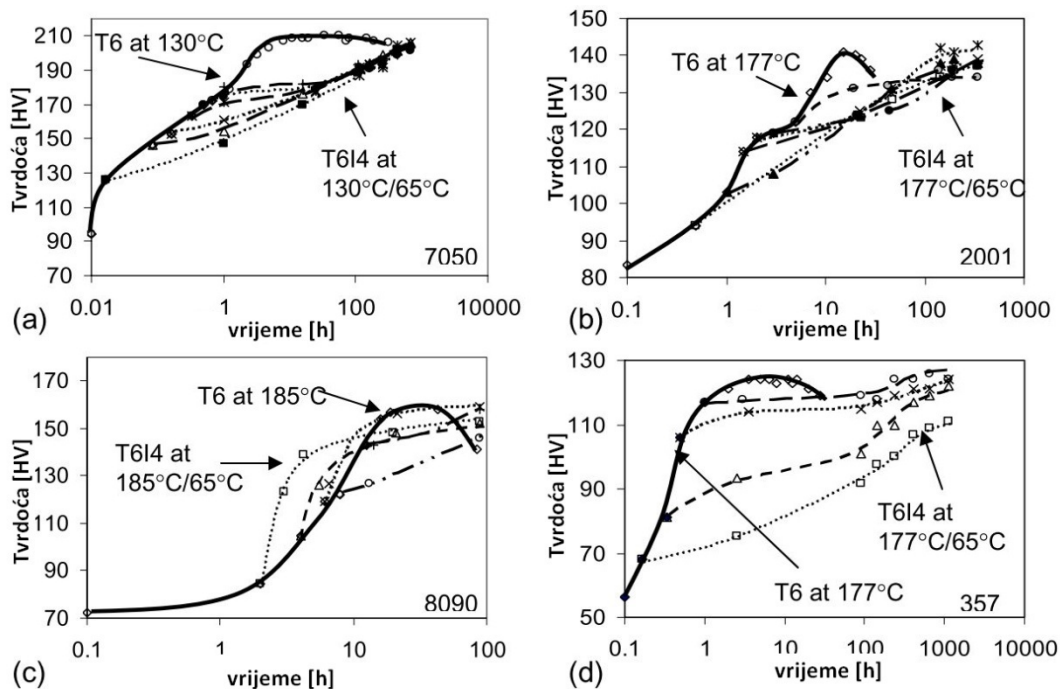


Slika 12. Shematski prikaz prekinute toplinske obrade, pojašnjenja u **tablici 2**(11).

**Tablica 2.** Neke od varijanti prekinutih toplinskih obrada (11).

Oznaka:	Postupak:
<b>T6I4</b>	Rastopno žarenje, gasiti, poddozrijevat na ( $T_a$ ), gasiti, dozrijevat na 25°C-65°C.
<b>T6I6</b>	Rastopno žarenje, gasiti, poddozrijevat na ( $T_a$ ), gasiti, dozrijevat na 25°C-65°C ( $T_b$ ), naknadno dozrijevat na $T_c$ , gdje je $T_c \leq T_a$ .
<b>T6I76</b>	Rastopno žarenje, gasiti, poddozrijevat na ( $T_a$ ), gasiti, dozrijevat na 25°C-65°C ( $T_b$ ), naknadno dozrijevat na $T_c$ , gdje je $T_c > T_a$ .

**T6I4** - odnosi na podozrijevanje na povišenoj temperaturi (npr. 150°C) do iznosa 50-85% vršne tvrdoće, hlađenju i zatim izlaganju na nižim temperaturama(25°C-65°C). Na nižim temperaturama dešava se nukleacija finih precipitata, koja dodatno osiromašuje matricu atomima uz podizanje čvrstoće. Navedeno stanje navedeno je kao T6I4 a na **slici 13** su prikazani porasti tvrdoće 4 različite aluminijske legure.



**Slika 13.** Krivulje sekundarnog dozrijevanja u usporedbi sa T6 krivuljom za aluminijske legure (a)7050, (b)2001, (c)8090, (d)357 (11).

**T6I6** se odnosi na leguru koja je prošla djelomično ili potpuno T6I4 stanje, zatim naknadno dozrijevanu na povišenoj temperaturi do dostizanja maksimalne tvrdoće. Zabilježeno je povećanje tvrdoće, vlačne čvrstoće i granice razvlačenja u iznosu od 10 – 15 % (Tablica 3), uz povećanje udarne žilavosti za većinu legura (10).

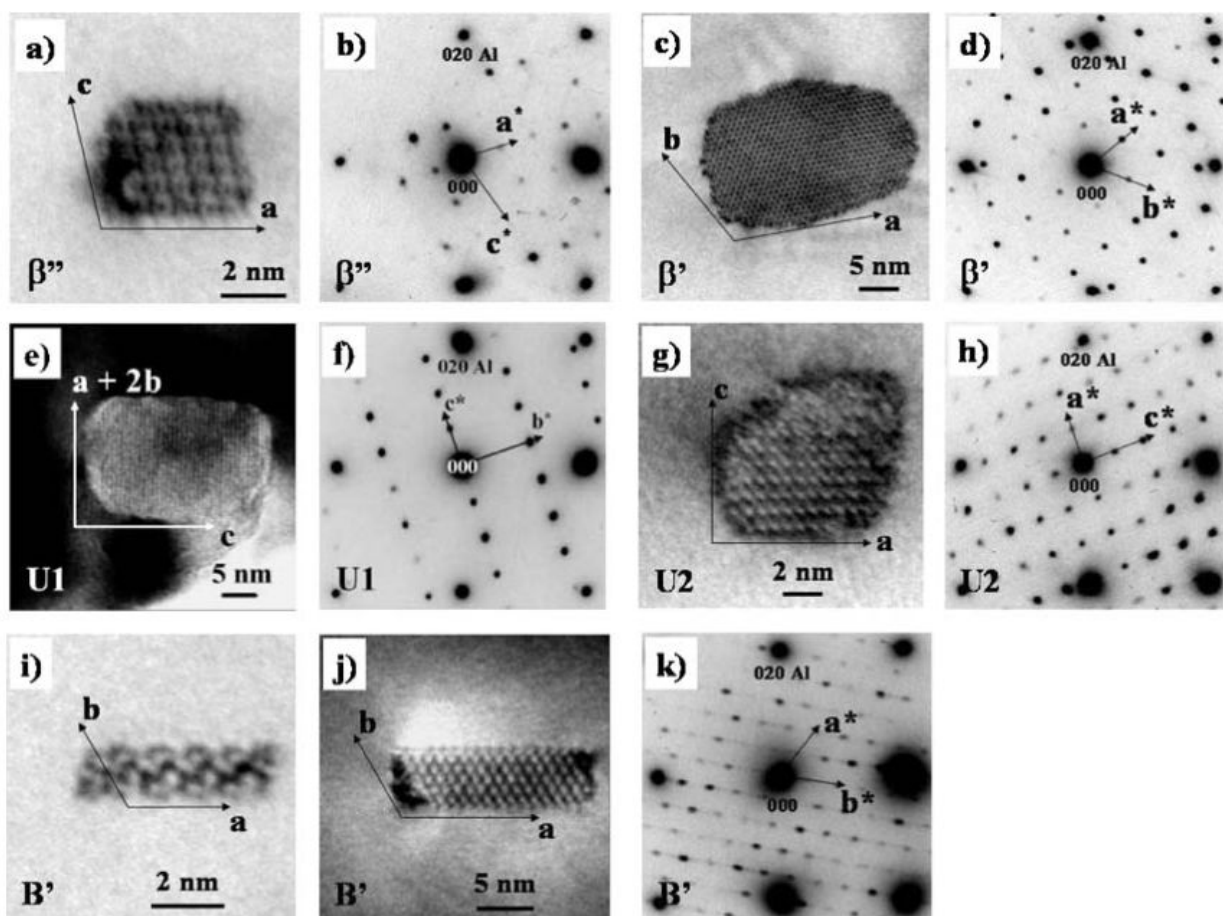
**Tablica 3.** Komparativna usporedba svojstava T6 i T6I6 toplinskih stanja (11).

Stanje Legura	T6			T6I6		
	Granica razvlačenja (MPa)	Vlačna čvrstoća (MPa)	Produljenje (%)	Granica razvlačenja (MPa)	Vlačna čvrstoća (MPa)	Produljenje (%)
Al-4Cu	236	325	5	256	358	7
2014	414	488	10	436	526	10
Al-Cu-Mg-Ag	442	481	12	502	518	7
6061	267	318	13	299	349	13
6013	339	404	17	380	416	15
7050	546	621	14	574	639	14
7075	505	570	10	535	633	13
8090	349	449	4	391	512	5
357	287	340	7	341	375	5

**T6I76** – postupak je sličan T6I6 stanju s razlikom u višoj finalnoj temperaturi. Eksperimenti na leguri 7050 su pokazali da T6I76 modificira strukturu dajući bolju otpornost napetosnoj koroziji uz zadržavanje vlačne čvrstoće jednakim T6 obradi.

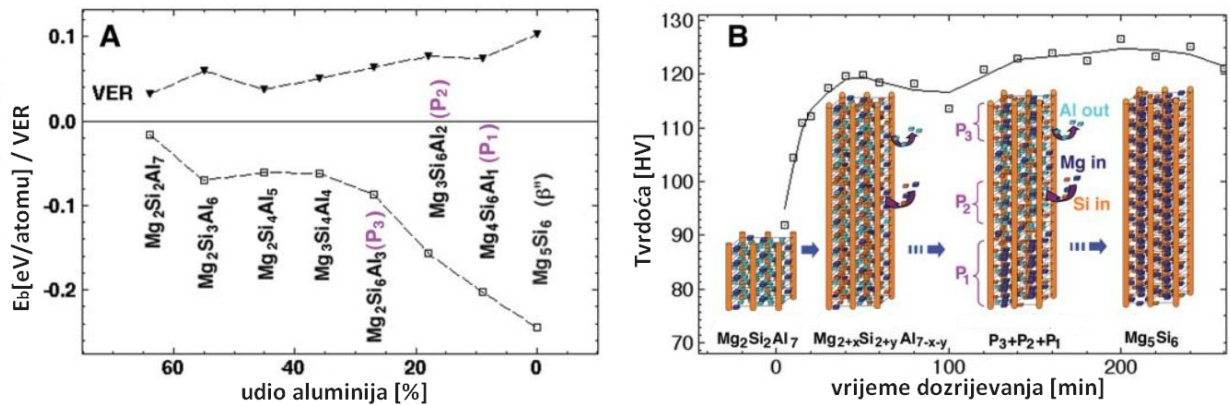
### 3.6 Pregled važnijih znanstvenih saznanja iz područja precipitata

Detaljan pregled dostupne literature vezane za precipitaciju toplinski očvrstivih aluminijskih legura dali su Ravi i Wolveron(12) te Chakrabarti i Lauglin(13). Računajući energiju formiranja, M.A. van Huis et al. (7,14) su zaključili da unatoč razlikama u kristalografiji i kemijskom sastavu  $\beta''$ , U1, U2, U3 i  $\beta'$  dijele jednaku podstrukturu heksagonski postavljenih Mg atoma. Također su ustanovili da se fazne pretvorbe među njima mogu okarakterizirati sa ravninskim pomakom tih podstrukture. Za ranije faze je ustanovljeno da oblik i redosljed precipitacije ovise o količinskom omjeru Mg i Si. Marioara et al (15) su u istraživanjima aluminijskih legura različitog odnosa Mg i Si u T4 i T6 stanju ustanovili da je kod dozrijevanja legura sa viškom silicija dominantna faza U1, u legurama bogatijim magnezijem formira se  $\beta'$  tip precipitata, a ukoliko je odnos magnezija i silicija 1.25 tada je dominantna faza umjetnog dozrijevanja  $\beta''$  koja se predozrijevanjem mijenja u U2 tip precipitata, kod kojeg je uočen najmanji pad svojstava tokom naknadnog dozrijevanja(*slika 14*).



*Slika 14:* prikazi svijetlih TEM (transmission electron microscopy) slika i difrakcijskih uzoraka precipitata u Al-Mg-Si legurama (15).

J. H. Chen et al.(16) su elektronskom mikroskopijom na atomskoj rezoluciji pokazali da stupovi Si atoma egzistiraju u skoro svim vrstama precipitata koji variraju po strukturi i sastavu. Stupovi se formiraju kao sitna nukleacijska mjesta sastava blizu  $Mg_2Si_2Al_7$  sa minimalnim odstupanjem od aluminijske matrice. Tokom dozrijevanja prolaze jednodimenzijски rast popraćen promjenom sastava. Ti stupovi omogućavaju stabilnu osnovu precipitata a tokom dozrijevanja put finalne strukture  $\beta''$  ( $Mg_5Si_6$ ) atomi aluminijske matrice se difuzijom zamjene sa atomima silicija i magnezija dok se ne postigne struktura  $\beta''$  (*slika 15*).



Slika 15. evolucija precipitata sa silicijevim stupovima kod dozrijevanja: a) omjer rasta volumena(VER) u odnosu na energiju formiranja ( $E_b$ ); b) shematski prikaz evolucije precipitata dozrijevanjem(16).

Maisonnette, D et al.(17) u istraživanju 6061 T6 strukture zaključuju da se struktura u T6 stanju sastoji od brojnih  $\beta''$  precipitata čiji volumni udio ne varira mnogo prilikom zagrijavanja. Precipitati evoluiraju u  $\beta'$  tokom zagrijavanja uz znatan porast veličine i smanjenje mehaničkih svojstava legure, a zagrijavanje do 560°C uz brzinu zagrijavanja od 15 K/s omogućava potpuno otapanje precipitata i dostizanje T0 toplinskog stanja(rastopno žareno).

Vezano za ulogu koklastera kod prirodnog i umjetnog dozrijevanja legura 6060 i 6061 mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da usporavaju kinetiku pretvorbe i svojstvo očvršćivanja na standardnim temperaturama dozrijevanja ( npr. 170°C), a ubrzavaju na povišenim temperaturama (npr.250°C)(18). Navedeno vrijedi za leguru 6061, kod legure 6060 svojstvo očvršćivanja uz pomoć koklastera je pojačano na 170°C, dok je utjecaj na kinetiku pretvorbe zanemariv za obje temperature. Te razlike su objasnili različitim interakcijama između otopljenih atoma i vakancija. Otapanje klastera je pokazalo slične aktivacijske energije kod obje legura.

## 4 Stabilnost precipitata tokom zavarivanja

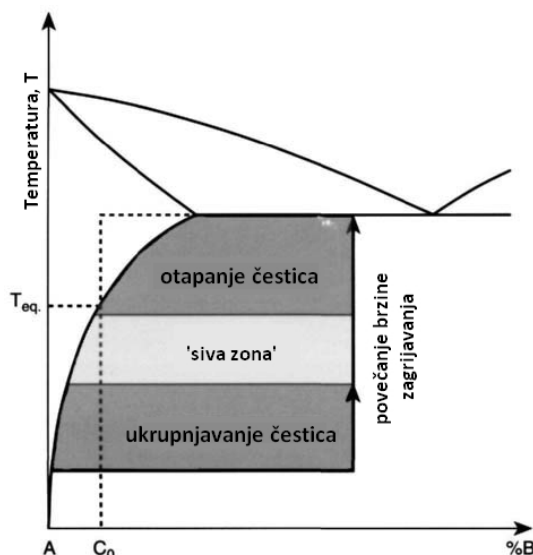
Stabilnost precipitata toplinski očvrstivih aluminijskih legura je od velike važnosti za tehnologiju zavarivanja. Kao što je pojašnjeno u poglavlju 3, takve legure prethodno prolaze optimiziranu termomehaničku obradu sa ciljem dobivanja finoizrnatih precipitata očvrstite matrice. A sve u svrhu balansiranja čvrstoće, žilavosti i dinamičke izdržljivosti. Fino balansirani odnos mikrostrukture i precipitacije se značajno poremeti toplinom neophodnom za proces zavarivanja, što utječe na mehanički integritet zavarenog spoja (19).

Ukoliko se prethodno toplinski očvrstnuta legura podvrgne dodatnom izvoru topline u vidu zavarivanja ili naknadne toplinske obrade, nekoliko procesa pridonosi promjeni u volumnog udjela i veličini precipitata u matrici. Dva najzastupljenija su (20):

- Ukрупnjavanje
- Otapanje čestica (reverzija)

Ukрупnjavanje čestica se obično odvaja na temperaturama znatno nižima od solvus temperatura precipitata  $T_{eq}$ , dok je otapanje dominantan mehanizam pri višim temperaturama(**slika 16**).





Slika 16. shematski prikaz karakterističnih promjena koje se dešavaju u materijalu nakon ponovnog zagrijavanja (19).

Ne postoji jasna granica između ova dva područja, što znači da u jednom djelu zavarenog spoja može doći do istovremenog ukрупnjavanja i otapanja čestica, ukoliko im je temperaturni interval u takozvanom „sivom području“.

Zbog različitih kinetika reakcije, bitno je ta dva procesa promatrati odvojeno. Ukрупnjavanje je vođeno isključivo energijom površinske napetosti, dok je otapanje, koje uključuje promjenu ukupnog volumnog udjela, vođeno promjenom slobodne energije transformacije.

#### 4.1 Produkt otopivosti i temperatura otapanja

Produkt otopivosti je osnovna termodinamička količina koja određuje stabilnost čestica u ravnotežnim uvjetima. Zbog svoje jednostavnosti nalazi na široku primjenu kod ocjene odgovora disperzijski očvrnutih slitina na toplinske obrade i procese zavarivanja(21). Produkt otopivosti izvodi se iz analize Gibbsove slobodne energije za reakciju otapanja  $A_n B_m = nA + mB$  u ravnotežnom stanju, a može se pisati kao(19):

$$\log[\%A]^n [\%B]^m = \frac{\Delta S^0}{R'} - \frac{\Delta H^0}{R'T} = C^* - \frac{D^*}{T} \quad [1]$$

Gdje je:\*

- $C^*$ -bezdimezijska (normalizirana) entropija reakcije, za  $Mg_2Si$  tip precipitata iznosi 5.85
- $D^*$  - bezdimezijska entalpija reakcije, za  $Mg_2Si$  tip precipitata iznosi 5010

U aluminijskim legurama osim  $Mg_2Si$  tipa može doći do formiranja drugih precipitata što znatno povećava kompleksnost analize, stoga će se samo binarni intermetalici razmatrati u daljnjem tekstu.

Preuređivanjem gornje jednadžbe moguće je izračunati ravnotežnu temperaturu otapanja precipitata:

$$T_d = \frac{D^*}{C^* - \log[\%A]_0^n [\%B]_0^m} \quad [2]$$

Gdje su  $[\%A]_0$  i  $[\%B]_0$  analitički udjeli elemenata A i B u osnovnom metalu (at%).

U praksi, određeni stupanj predgrijavanja je neophodan kako bi se savladala kinetička barijera otpora otapanju, stoga u stvarnim zavarivačkim primjerima temperatura otapanja precipitata može biti znatno viša od one dobivene jednostavnim termodinamičkim izračunom produkta otapanja.

Poradi nedostatka faznih dijagrama za višemetalne spojeve, produkt otopivosti predstavlja samo praktičan način procjene otopivosti u čvrstom stanju u komercijalnim legurama aluminija.

## 4.2 Granice otopivosti - Stabilni precipitati

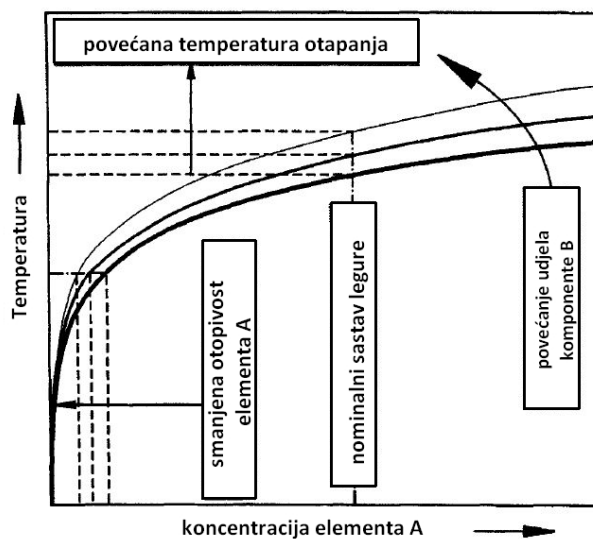
U slučaju većih, nekoherentnih precipitata koncentracija elementa A u ravnoteži sa čistim  $A_nB_m$  na različitim temperaturama može se odrediti preuređujući *jednadžbu* [1]:

$$[\%A] = \frac{\exp(\Delta S^0/nR)}{[\%B]^{m/n}} \exp\left(-\frac{\Delta H^0}{nRT}\right) \quad [3]$$

S druge strane, kada se čista binarna komponenta otapa koncentracija elemenata A i B u krutoj otopini je određena stohiometrijom reakcije:

$$[at.\%B] = [at.\%B]_0 - \frac{m}{n}([at.\%A]_0 - [at.\%A]) \quad [4]$$

Alternativno, možemo izraziti  $T$  kao funkciju produkta  $[\%A]^n[\%B]^m$  kombinacijom *jednadžbi* [1] i [4]. Time se matematički opisuje granica otopivosti ravnotežnog precipitata u višekomponentnoj leguri (*slika 3*).



**Slika 17.** Faktori koji utječu na otopivost u krutom stanju intermetalne komponente u višelegirnom sistemu (shematski prikaz)(19).

Sa *slike 17* je vidljivo da će otopivost u krutom stanju uvijek rasti sa porastom temperature kada je  $\Delta H^0$  pozitivna, što je karakteristično za intermetalne spojeve u metalima i legurama, budući da je proces otapanja u takvim sustavima endoterman. Rezultat toga je da povećavanje koncentracije elementa B smanjuje granicu otopivosti elementa A pomičući granicu otopivosti put viših temperatura.

Uz pomoć *slike 17* moguće je potvrditi da je ravnotežni volumni udio precipitata za fiksnu temperaturu opisan sa:

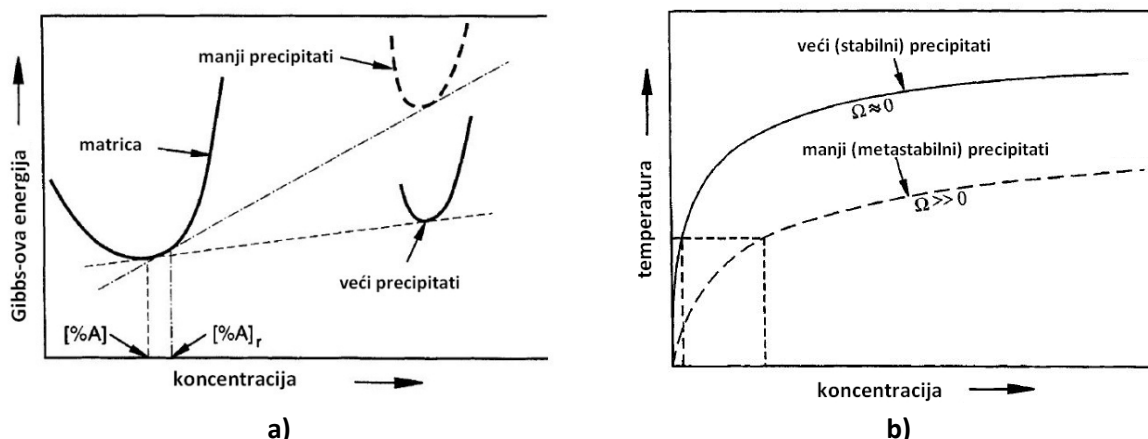
$$f_{eq.} = f_{max} \left(1 - \frac{[at.\%A]}{[at.\%A]_0}\right) \quad [5]$$



Jednadžba [5] predstavlja osnovu za procjenu ravnotežnog volumnog udjela u kompleksnim legirnim sustavima pri različitim temperaturama kada je koncentracija elementa B dovoljna da veže sve atome komponente A u precipitate (19).

### 4.3 Granice otopivosti - Metastabilni precipitati

U praksi na krutu otopivost ima utjecaja i veličina čestica. Gibbsova energija malog precipitata će biti viša od one većeg, što u rezultira povećanom otopivošću. Takva pojava u literaturi se naziva i kapilarnost Gibbs-Thompsonovog efekta (*slika 18*).



Slika 18. Kapilarnost Gibbs-Thompsonovog efekta(a) i utjecaj na toplinsku postojanost metastabilnih precipitata(b)(19).

### 4.4 Ukрупnjavanje čestica

Kada raspršene čestice imaju neku otopivost u matrici u kojoj su sadržane, manje čestice će imati tendenciju otapanja a materijal u njima će participirati u većim česticama. Pokretačka sila je redukcija energije sučelja između precipitata i matrice. U konačnici će u sustavu postojati samo jedna velika čestica.

Ovisnost konačnog radijusa čestice pri kontinuiranom grijanju i hlađenju dana je sa:

$$r^3 - r_0^3 = \frac{c_1 t}{T} \exp(-Q_s/RT) \quad [6]$$

Gdje je  $c_1$  kinetička konstanta, a  $Q_s$  aktivacijska energija procesa ukрупnjavanja. Za binarne intermetalne spojeve,  $Q_s$  se može smatrati jednakom aktivacijskoj energiji za difuziju manjeg pokretnog atoma precipitata u matrici.

Za izračun stupnja ukрупnjenja po jednom zavarivačkom termalnom ciklusu potrebno je *jednadžbu 6* integrirati između granica  $t_1$  i  $t_2$ :

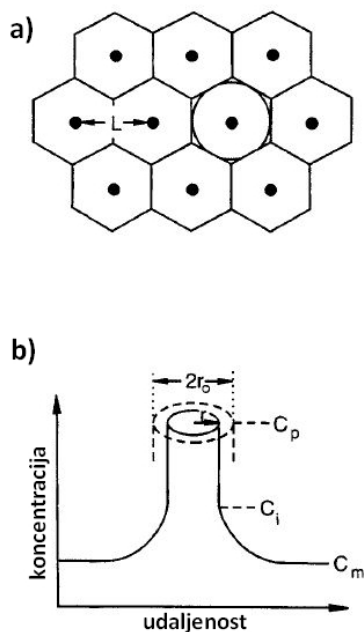
$$r^3 - r_0^3 = c_1 \int_{t_1}^{t_2} \frac{t}{T} \exp(-Q_s/RT) dt \quad [7]$$

Integral na desnoj strani predstavlja kinetičku snagu toplinskog ciklusa u odnosu na ukрупnjavanje čestica, i može se odrediti numerički kada je poznato toplinsko opterećenje zavara (T-t). Međutim, glavna pretpostavka prilikom dobivanja *jednadžbe [7]* jest da se čestica ukрупnjava sa skoro konstantnim volumnim udjelom, tj., tokom ukрупnjavanja nema gubitka materijala u okolnu matricu. Takva pretpostavka ograničava područje primjene *jednadžbe [7]* samo na područja gdje je vršna temperatura toplinskog ciklusa zavarivanja dovoljno ispod ravnotežne solvus temperature precipitata(19).

## 4.5 Otapanje čestica

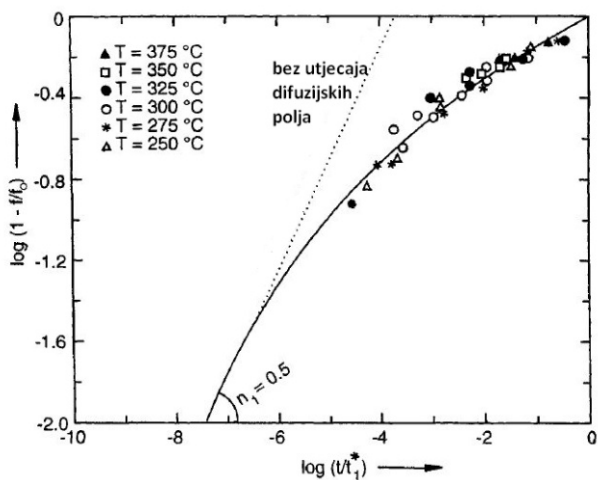
Tokom zavarivanja, toplinski impuls u ZUT blizu linije spajanja može rezultirati potpunim otapanjem precipitata, posljedica čega može biti značajni porast zrna i pad čvrstoće. Stoga je bitno razumjeti kako parametri zavarivanja utječu na brzinu otapanja čestica. U sljedećem tekstu date su osnove kinetike otapanja čestica.

U konačnoj matrici, istrošenoj od elemenata koji čine intermetalne spojeve, za štapne ili igličaste precipitate brzina otapanja može se odrediti numerički iz pojednostavljenog dvodimenzionalnog difuzijskog modela (*slika 19*).



*Slika 19.* Numerički model za otapanje štapnih i igličastih precipitata u konačnoj iskorištenoj matrici: a) geometrija ćelije koja se otapa, b) koncentracijski profil (pomični) na sučelju čestica-matrica.

Brzina otapanja čestice će postepeno opadati sa povećavanjem vremena trajanja toplinskog opterećenja zbog utjecaja difuzijskih polja susjednih precipitata (*slika 20*).



*Slika 20.* Krivulja otapanja  $\beta''$  precipitata pri različitim temperaturama u aluminijskoj leguri 6082-T6(19).

Za izotermalnu toplinsku obradu na temperaturi različitoj od referentne, maksimalno zadržavanje na toj temperaturi je dano sa:

$$t_1^* = t_{r_1}^* \exp \left[ \left( \frac{Q'_{app.}}{n_1 R} + \frac{Q_s}{R} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{r_1}} \right) \right] \quad [8]$$

A stopa pretvorbe sa:

$$f/f_0 = (t/t_1^*)^{n_1} \quad [9]$$

Gdje je:

$Q'_{app.}$  - metastabilna granična entalpija otapanja precipitata

$Q_s$  - aktivacijska energija za difuziju manje mobilnog atoma od kojeg se sastoji precipitat

$t_{r_1}^*$  - vrijeme potrebno za potpunu reverziju pri  $T_{r_1}$

$n_1$  - vremenski eksponent (uzima se konstantan za date uvjete)

$T_{r_1}$  - odabrana referentna temperatura

Jednadžba [8] vrijedi za izotermalna toplinska opterećenja, da bi se primijenila na procese zavarivanja potrebno je poznavati  $T(t)$  ovisnost. U tom slučaju, umjesto izraza  $t/t_1^*$  koristi se  $dt/t_1^*$  i integrira se preko cijelog toplinskog ciklusa, rezultirajući:

$$I_1 = \int_0^t \frac{dt}{t_1^*} = (1 - f/f_0)^{1/n_1} \quad [10]$$

Takav integral naziva se kinetička snaga termalnog ciklusa u odnosu na reverziju (otapanje).

Iz gornjih poglavlja proizlazi:

- i. da se aluminijskim legurama može znatno povećati čvrstoća adekvatnom toplinskom obradom. Porast čvrstoće ovisi o strukturi, veličini i rasporedu precipitata.
- ii. Toplina oslobođena zavarivanjem imati će značajan utjecaj na prethodno toplinski očvrstnutu strukturu, mijenjajući mehanička i metalurška svojstva.

## 5. Zavarivanje toplinski očvrstivih aluminijskih legura

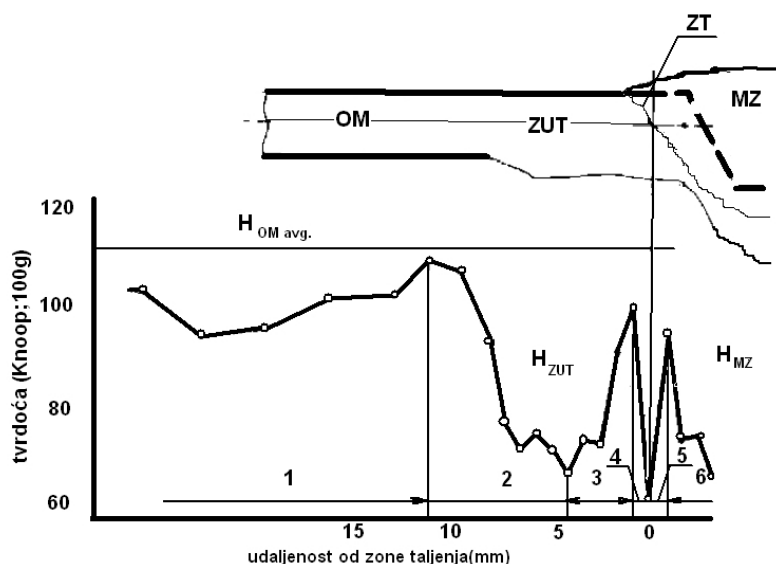
Toplinski očvrstnute legure kojima je povećanje čvrstoće i tvrdoće ostvareno preko mehanizama precipitacijskog očvršćivanja negativno reaguju na toplinu upotrijebljenu pri zavarivanju. Pod negativno se smatra omekšavanje, odnosno proces žarenja. Odziv legure je složen uslijed različitih toplinskih ciklusa koji djeluju na različita područja zone utjecaja topline, a ovisi o vršnoj temperaturi i vremenu zadržavanja iznad kritičnih temperatura(22).

### 5.1 Profil tvrdoće toplinski očvrstnute aluminijske legure

Radi izrazito velikih gradijenata topline kod zavarivanja strukturne promjene koje se dešavaju su izrazito brze i problematične za pratiti tokom samog procesa. Uvid u promjene može se dobiti iz korelacije

toplinskih opterećenja sa mjerenjima tvrdoće zavarenog spoja. Mjerenje tvrdoće predstavlja vrijedan i dostupan alat za stjecanje uvida u strukturne promjene zavarenih spojeva. Identificiranje područja najmanje tvrdoće, odnosno udaljenost i širina takvog područja značajna je zbog određene korelacije sa rasteznom čvrstoćom zavarenog spoja.

Malin et al. (23) kod ispitivanja Al-Mg-Si legurama podijelio krivulja profila tvrdoće u par distinktivnih dijelova (**Slika 21**).



**Slika 21.** Profil tvrdoće zavarenog profila AA6060-T6 sa prikazom 6 karakterističnih područja(23).

#### Područje 1:

Ovo područje karakterizira fluktuacija tvrdoće koja može ići i do 20% tvrdoće osnovnog materijala. Širina područja za postavljene uvjete iznosila je preko 50 mm od centra zavara. Pad tvrdoće i lokalna omekšana mjesta, iako postoje, izgleda da nemaju bitan utjecaj na svojstva zavarenog spoja, budući da se ovo područje ne javlja kao mjesto loma materijala.

#### Područje 2:

U ovom području dolazi do značajnog smanjenja tvrdoće materijala, vrijednosti tvrdoće mogu pasti i do 48% vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala ( $H_{BM}$ ), širina ovog područja je zavisna o snazi toplinskog ciklusa o čemu je bilo riječi ranije, a varira ovisno o linearnoj energiji(  $Q$  - [J/mm]) korištenoj pri zavarivanju, i hlađenju ZUT(osigurano dodatno odvođenje toplote u ZUT – uže područje).

Korisna karakteristika raspodjele tvrdoće po području je prosječni gradijent tvrdoće  $G_{Havg}$ :

$$G_{Havg} = \frac{\text{razlika tvrdoće područja } \Delta H}{\text{širina područja}} \quad [11]$$

$G_{Havg}$  područja 2 je relativno mali u usporedbi sa sljedećim područjima.

#### Područje 3:

Područje 3 karakterizira oporavak tvrdoće koje može doseći i  $H_{BM,avg}$ , širina tog područja je manja od područja 2 i pod izrazitim je utjecajem hlađenja ZUT (23). Prosječni gradijent tvrdoće je veći nego u području 2.

Područja 2 i 3 u literaturi su ponekad poznata pod nazivom „preozrelo područje“ („overaged zone“). To bi bilo značajno pojednostavljenje stvarnih procesa u tom području, na granici između ta dva područja paralelno sa zavarom proteže se ravnina smanjene tvrdoće(i čvrstoće) koja je često mjesto loma materijala, odnosno najmekše mjesto u zavarenom spoju.

#### Područje 4:

Područje 4 je vrlo usko područje(veliĉine milimetra) koje se naslanja na suĉelje metala zavara. U ovom području tvrdoća pada na male vrijednosti, ĉesto najniže u cijelom spoju(45%  $H_{BM}$ ). Širina tog područja nije pod utjecajem hlaĉenja ZUT ni  $Q$ .

#### Područje 5:

Područje 5 je takoĉer usko područje koje se nalazi tik uz zonu taljenja sa strane metala zavara. Za ovo područje je karakteristiĉan izraziti oporavak tvrdoće materijala koja mođe doseći i do 90%  $H_{BM}$ .

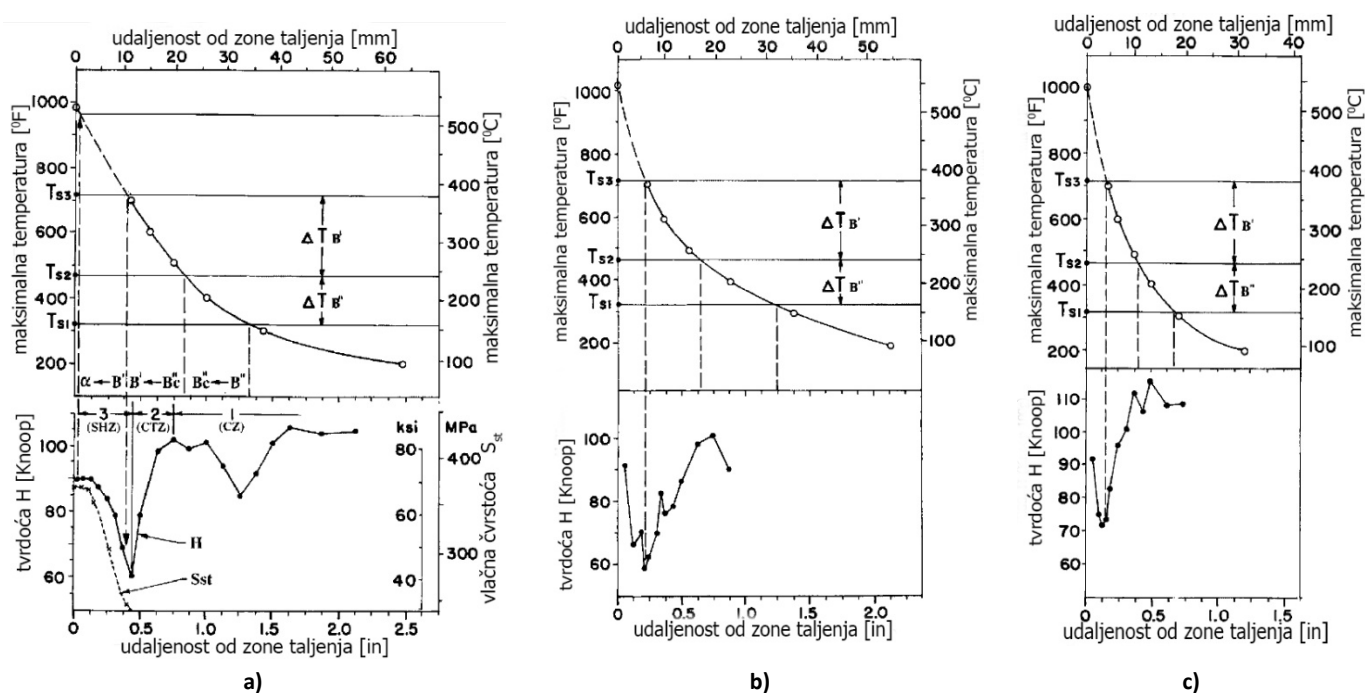
Postojanje područja 4 i 5 je utvrĉeno tek kasnijim istraživanjima, znaĉajnim povećanjem rezolucije(smanjenjem opterećenja) tvrdomjera. U ta dva, relativno uska područja, prvo dolazi do drastiĉnog pada a zatim i do povrata tvrdoće. Gradienti tvrdoće su ekstremni i mogu doseći  $G_{Havg} \sim 50 [HK/mm]$  za područje 4 i preko  $G_{Havg} \sim 100 [HK/mm]$  za područje 5.

#### Područje 6:

Područje 6 predstavlja ostatak od strane metala zavara pa do centra spoja. Ovdje je tvrdoća u padu i do sredine zavara mođe pasti i do 55%  $H_{BM}$ . U konaĉnici pad tvrdoće u kombinaciji sa porozitetom mođe rezultirati lomom zavarenog spoja u tom području.

## 5.2 Poveznica tvrdoće ,vršne temperature i mikrostrukture

U prijašnjim istraživanjima, detektiranjem vršne temperature (uz pomoć temperaturno osjetljivih boja) tokom procesa za više razliĉitih parametara zavarivanja ustanovljena je karakteristiĉna vršna temperatura koja za sobom ostavlja područje najmanje tvrdoće u ZUT. Temperatura iznosi oko 370°C i povezuje se sa gornjom granicom stabilnosti  $\beta'$  precipitata (23)(slika 22).



Slika 22. Ovisnost vršne temperature o području minimalne tvrdoće i temperaturi stabilnosti  $\beta'$  precipitata za različite parametre zavarivanja: a) visoki; b) srednji i c) niski  $Q(23)$ .

Usporedbom profila krivulja tvrdoće, sa TEM snimkama prethodnih istraživanja(24) ustanovljena su karakteristična područja u ZUT(*slika 8a*) i MZ. Prije daljnje diskusije treba uzeti u obzir da temperature pretvorbi precipitata(metastabilnih) variraju u ovisnosti o brzini zagrijavanja, kemijskom sastavu i ostalim faktorima, pa granice navedenih područja ne treba uzimati doslovno već kao uvid u procese koji se dešavaju tokom termalnog ciklusa zavarivanja.

**Područje 1** – do oko 240°C, područje ukрупnjavanja (coarsening zone - CZ), prve naznake strukturnih pretvorbi. Aktivni proces je ukрупnjavanje  $\beta''$  precipitata koji su prethodnom toplinskom obradom(T6) dovedeni do optimuma broja/veličine za postići maksimalno očvršćenje (peak hardness). Rezultat je lokalno smanjenje tvrdoće/čvrstoće.

**Područje 2** - od 240 - 380°C, područje daljnjeg ukрупnjavanja i pretvorbe(coarsening-transition zone - CTZ), simultano sa otapanjem  $\beta''$  precipitata(koji su prešli gornju granicu postojanja  $T_{S2}$ , *slika 22*) dolazi do formiranja i ukрупnjavanja  $\beta'$  zrna.  $\beta'$  zbog svoje veličine i strukture nude manju mogućnost očvršćavanja nego  $\beta''$  što se manifestira padom tvrdoće, a njihovim ukрупnjavanjem tvrdoća dodatno pada. Izrazito nepovoljan slučaj je rub područja egzistencije  $\beta'$  precipitata, tada je veličina zrna maksimalna što obara tvrdoću na iznimno male vrijednosti. Širina područja 3 naziva se kritična širina  $W_{cr}$ , a temperaturni raspon kritični temperaturni interval  $\Delta T_{cr}$ .

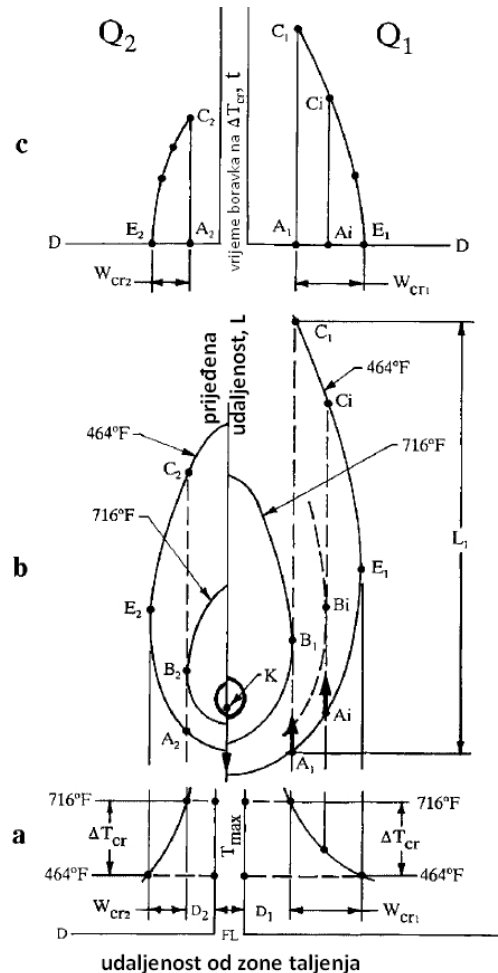
**Područje 3**, od 380°C pa do temperature taljenja. Dolazi do otapanja  $\beta'$  precipitata u aluminijskoj matrici budući da su temperature iznad područja stabilnosti istih. Tim procesom, aluminijska matrica se obogaćuje sa Si i Mg što podiže tvrdoću uslijed takozvanog očvršćivanja otapanjem(solution-hardening)stoga se ovo područje naziva SHZ (solution hardening zone).

Osim ova 3 područja dano je tumačenje(23) i za Područje 4 i 5(*slika 21*) – uz sami rub zone taljenja na stranu ZUT kao i područje sa suprotne strane(od strane MZ) je nezamijećeno dugi niz godina dok povećanom rezolucijom tvrdomjera nije potvrđeno. Radi se o vrlo uskom području(širine nekad i manje od milimetra) sa velikim padom tvrdoće(prosječni gradijent promjene tvrdoće i preko 100HK/mm). Razlozi za to mogu se naći u različitoj otopivosti legirnih elemenata Si i Mg u krutom i tekućem stanju. Naime i Si i Mg imaju značajno veću otopivost u tekućem stanju pa tik do zone taljenja može doći do migracije iz ZUT u zonu taljenja. Posljedica je manja mogućnost očvršćivanja otapanjem u ZUT dijelu i drastičan pad tvrdoće u području 4. Na strani MZ prezasićenje rubnog protaljenog područja atomima Mg i Si može pomaknuti kemijsku koncentraciju put toplinski očvrstive legure(što nije slučaj sa preporučenim dodatnim materijalom za AlMgSi legure). Gradijenti temperature u tom području su ekstremno veliki, a brzina hlađenja se može usporediti sa gašenjem, u konačnici rezultirajući porastom tvrdoće u tom području. Ovo područje se u literaturi naziva i područje pretvorbe(transition zone - TZ).

### 5.3 Kritična zona i utjecaj parametara zavarivanja

Pri konstantnoj linearnoj energiji  $Q$  električni luk u gibanju stvara tzv., kvazistacionarno toplinsko polje u ZUT. Pod kvazistacionarno se misli da se polje giba uzduž zavara (brzinom zavarivanja), ali ostaje nepromijenjeno u odnosu na relativni koordinatni sustav koji se pomiče s električnim lukom (*slika 23b*).

Kako bi se pokušalo kvalitativno predvidjeti čvrstoću zavarenog spoja uveden je pojam kritična zona. Kritična zona je područje drastičnog pada tvrdoće, a odnosi se na područje u ZUT zavarenog spoja širine  $W_{cr}$  koje prolazi kroz kritičnu temperaturu  $\Delta T_{cr}$  (*slika 23a*).



**Slika 23.** shematski prikaz kritične zone za dva različita nivoa  $Q$ , lijevi niski i desni visoki i to: a) u odnosu na maksimalnu temperaturu  $T_{max}$  i udaljenost od centra  $D$ ; u odnosu na izoterme termalnog ciklusa b); u odnosu na vrijeme izloženosti(23).

Smatra se da na gubitak tvrdoće bitno utječu 2 faktora: širina zone  $W_{cr}$  i vrijeme izloženosti ( $t$ ). iz **slike 24** se vidi da manji  $Q$  smanjuje udaljenost kritične zone ( $D_2 < D_1$ ), i kritičnu širinu ( $W_{cr2} < W_{cr1}$ ). Također za konstantnu brzinu gibanja električnog luka vremena izloženosti( $t$ ) kritičnim temperaturama su duža ( $A_1C_1 > A_2C_2$ ).

Dakle, korištenjem veće linearne energije  $Q$ , šira je kritična zona  $W_{cr}$  i duži vremenski interval  $t$  boravka na  $\Delta T_{cr}$ . Duže vrijeme boravka znači manje  $\beta''$  (koja se duže vremena otapa), veći broj  $\beta'$  (manje čvrste faze) koja je zamjenila  $\beta''$ , uz dodatno smanjenje tvrdoće dužim vremenom izloženosti  $t$  koje će omogućiti i veće ukрупnjenje formiranih  $\beta'$ .

## 5.4 Korektivne i preventivne radnje gubitka svojstava toplinski očvrstivim legurama.

Nakon razumijevanja pojava koje se dešavaju u ZUT toplinski očvrstive aluminijske legure moguće je na par načina spriječiti gubitak svojstava, a uz to postoji i par načina za povratiti izgubljena svojstva nakon zavarivanja.

### Preventivne radnje

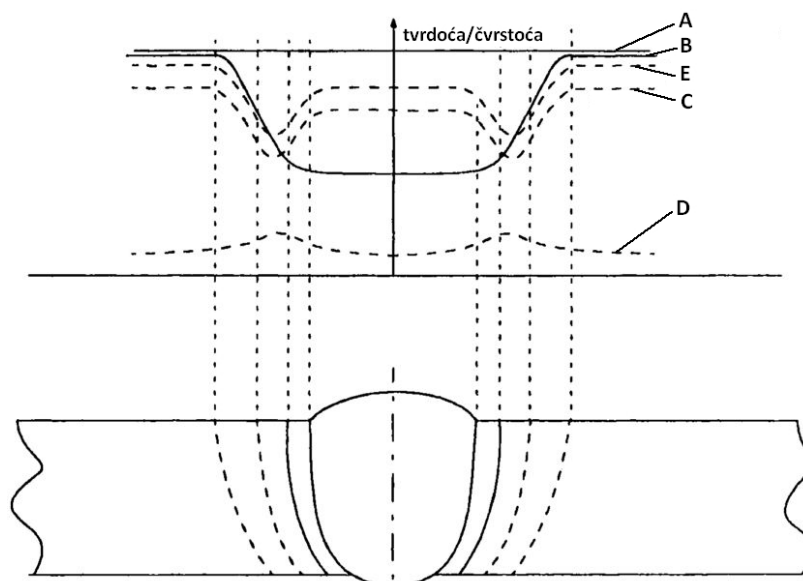
Budući da je i otapanje i rast čestica proces koji traži temperaturu i vrijeme, dva osnovna načina koja mogu pomoći pri sprječavanju gubitka svojstava odnose se na: smanjenje unosa topline i smanjenje vremena izloženosti temperaturi. Prvi način je ostvariv upotrebom procesa koji za spajanje ne

upotrebljavaju visoke temperature, na primjer upotrebom sile. Kod zavarivanja taljenjem ovaj način se ne može u potpunosti primijeniti. Drugi, puno praktičniji pristup je upotreba procesa zavarivanja koji uzrokuje izrazito veliko zagrijavanje popraćeno sa brzim hlađenjem. Ideja ovog pristupa je održavanje vremena na visokim temperaturama toliko kratkim da kinematika difuzijskih procesa nema dovoljno vremena uništiti svojstva(22).

U biti postoji i treći pristup, gdje se umjetno dozrijevanje radi nakon zavarivanja . Drugim riječima, neovisno da li su sastavni dijelovi spoja bili dozrijevani ili ne, nakon zavarivanja rastopno žariti, ugasiti i dozrijevati. Ovaj način je neekonomičan i riskantan budući da se spojevi mogu nepovratno deformirati ili popucati, a nepraktično je i iz razloga što materijal na temperaturama rastopnog žarenja toliko omekša da može doći do gubitka oblika i dimenzija(22).

### Korektivne radnje

Za oporavak toplinski očvrsnute legure nakon zavarivanja preporuča se naknadno dozrijevanje ukoliko je to moguće izvesti. Naknadno dozrijevanje će omogućiti formiranje precipitata u zoni taljenja, pod uvjetom da dodatni materijal pruža tu mogućnost. Osim u zoni taljenja dozrijevanje će se odviti i u djelomično protaljenoj zoni i kao i u dijelu ZUT gdje je nastupilo otapanje(reverzija). u zonama gdje se odvija naknadno dozrijevanje doći će do djelomičnog oporavka izgubljenih svojstava, ali ne optimalnih. U zoni ZUT koja je već predozrijevana situacija se neće popraviti, naknadno dozrijevanje donekle će i smanjiti mehanička svojstva(**slika 24**).



**Slika 24.** Shematski prikaz mogućeg izgleda krivulja tvrdoće u ovisnosti o toplinskim obradama prije i poslije zavarivanja: A) tvrdoća prije zavarivanja; B) prethodno dozrijevano i zavareno; C) prethodno dozrijevano i dodatno dozrijevano nakon zavarivanja; D) rastopno žareno prije zavarivanja; e) rastopno žareno nakon zavarivanja i dozrijevano(22).

## 6 Tehnike optimiranja u zavarivanju

Zavarivanje kao proces zbog svojih karakteristika predstavlja problem kod modeliranja. Često je nejasna veza između ulaznih parametara i izraza, ekstremni temperaturni gradijenti nepovoljno utječu na točnost mjerenja veličina tijekom samog procesa, a nehomogenost materijala zajedno sa ostalim faktorima otežavaju kvalitetnu ponovljivost procesa.



Jedno od rješenja je upotreba složenijih alata za optimiranje kao što su evolucijski algoritmi i neuralne mreže, te kombinacija istih sa jednostavnijim metodama. U pregledu gradiva će biti prikazani trenutni trendovi optimiranja pri zavarivanju a u sljedećim poglavljima općenito će se objasniti najbitnije od njih.

## 6.1 Pregled područja optimiranja u zavarivanju

Opsežan pregled literature vezan za tehnike optimiranja u zavarivanju napravili su K.Y. Benyounis i A.G. Olabi(25). Pregled obuhvaća metode: Faktorski plan pokusa, linearnu regresiju, metodu odzivne površine(RSM), neuralne mreže(ANN), Taguchi metodu i evolucijske algoritme(GA), sa primjenom na oblik i geometriju zavara kao i za mehanička svojstva. Na osnovi pregledanih radova zaključuju da su sve pokrivene metode prikladne za modeliranje, kontrolu i optimiranje procesa zavarivanja (**Tablica 4**), ali i da u nedostatku komparativnih studija nije moguće prosuditi koja metoda bolje odgovara kojem problemu.

**Tablica 4:** usporedba uobičajenih tehnika modeliranja/optimiranja(25).

Tehnika optimiranja	ANN	GA	RSM	Taguchi	Faktorski plan
Vrijeme računanja	Dugo	Jako dugo	Kratko	Srednje	Kratko
Eksperimentalna domena	Pravilna ili nepravilna	Pravilna ili nepravilna	Samo pravilna	Pravilna ili nepravilna	Samo pravilna
Razvoj modela	Da*	Ne	Da	Ne	Da**
Optimizacija	Preko modela	Izravna	Preko modela	Izravna	Preko modela
Razumijevanje	Srednje	Teško	Lagano	Normalno	Lagano
Dostupnost (software)	Dostupno	Dostupno	Dostupno	Dostupno	Dostupno
Nivo točnosti optimiranja	Visok	Visok	Vrlo visok	Normalan	Vrlo visok
Primjena	Učestalo	Rijetko	Učestalo	Rijetko	Učestalo

\*Bez interacijskih učinaka faktora

\*\* bez efekta kvadrata faktora

Kumar i Rakesh(26) koriste metodu optimiranja rojem čestica(PSO) s ciljem finog podešavanja neuralnih mreža kod mapiranja MIG procesa zavarivanja. Razvijena su i testirana četiri različita pristupa. U prva dva optimiranja rojem čestica koriste kako bi podesili višeslojnu neuralnu mrežu bez povratne petlje i neuralnu mrežu sa radijalnom baznom funkcijom. U druga dva pristupa optimiranje slojem čestica je korišteno zajedno sa algoritmom unatračne propagacije u podešavanju strukture neuralne mreže sa radijalno baznom funkcijom, sa razlikom u tehnikama klasteriranja podataka. U trećem pristupu je korištena fuzzy C-means(FCM) tehnika, odnosno entropy-based fuzzy clustering (EFC) u četvrtom. Zaključuju da se pristupi 3 i 4 ponašaju slično i daju bolje performanse od pristupa 1 i 2. Za rezultate istraživanja je ponuđeno sljedeće objašnjenje: PSO algoritam ima dobra lokalna i globalna pretraživačka svojstva, ali za optimiranje funkcije sa većim brojem varijabli može pasti u problem permutacija, u čemu pomaže upotreba algoritama za lokalno optimiranje kao što je algoritam unatračne propagacije.

E.R. Dhas et al.(27) su uz pomoć Taguchijevih metoda i regresijske analize razvili matematičke zavisnosti ulaz-izlaz. Ti podaci su korišteni zajedno sa podacima iz eksperimentalnog seta za razvoj četiri neuralne mreže, naknadno procijenjene po vremenu računanja i točnosti predviđanja. Pronađeno je da neuralna mreža trenirana sa algoritmom optimizacije brojem čestica (NNPSO) daje bolje rezultate u odnosu na neuralnu mrežu trenirane genetskim algoritmom (NNGA), neuralnu mrežu sa radijalnom baznom funkcijom (RBFNN) i neuralnu mrežu treniranu algoritmom unatračne propagacije(BPNN).

## 6.2 Neuralne Mreže

Umjetne neuralne mreže (ANN) su računski sustavi koji simuliraju mikrostrukturu biološkog neuralnog sustava. Bitna prednost neuronskih mreža je obrada kompleksnih podataka koji ne moraju biti linearno povezani, tj., gdje nema jasne poveznice između ulaznih i izlaznih podataka. Nakon treniranja(učenja) mogu se upotrijebiti za predviđanje novih i neovisnih ulaznih podataka. ANN imitiraju proces učenja kakav se dešava u ljudskom mozgu i u stanju su procesirati probleme koji uključuju nelinearne podatke čak i kad su ti isti podaci neprecizni ili skriveni u šumovima. Vrlo važno svojstvo ovih mreža je njihova mogućnost prilagodbe, gdje „učenje na primjeru“ zamjenjuje klasično programiranje. To svojstvo omogućava aplikaciju mreža u područjima gdje postoji malo i nepotpuno razumijevanje problema, ali postoji dovoljno podataka na osnovu kojih se može učiti.

Ove mreže nazivamo „neuralnima“ iz razloga što su inspirirane neuroznanosti, što nužno ne znači da su dosljedni modeli bioloških neurona ili mogućnosti kognitivnog učenja. U stvari je većina mreža bliže povezana tradicionalnim matematičkim i/ili statističkim modelima ( neparametarski klasifikatori uzoraka, algoritmi klastera, nelinearni filteri i statistički regresijski modeli) nego neurobiološkim modelima.

### 6.2.1 Karakteristike neuralnih mreža

- Neuralne mreže iskazuju mogućnosti preslikavanja(mapping), tj., ulazne uzorke(obrasce) mogu preslikati na njima povezane izlazne,
- neuralne mreže uče na primjeru. Sustav se može utrenirati na poznatim primjerima prije sposobnosti zaključivanja na nepoznatim primjerima problema. Što znači da mogu identificirati novi objekt prethodno netrenirane,
- neuralne mreže posjeduju mogućnost generaliziranja. Stoga mogu predvidjeti nova rješenja(outcomes) na osnovi prijašnjih trendova,
- ANN su robusni sustavi i toleriraju greške, odnosno u stanju su obuhvatiti cijeli uzorak(pattern) iz nepotpunih, parcijalnih ili uzoraka skrivenih u šumovima,
- ANN su u stanju velikom brzinom procesirati paralelne i raspodijeljene informacije(28).

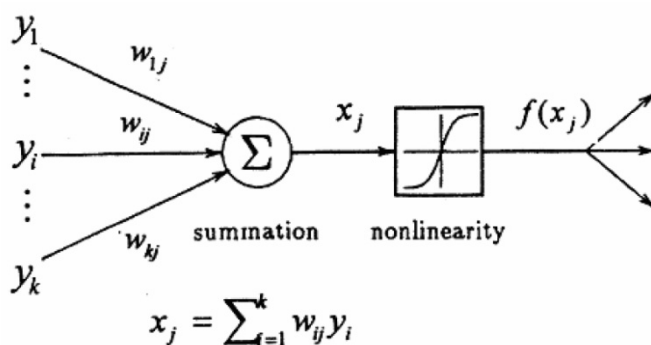
### 6.2.2 Osnove umjetnih neuralnih mreža

Neuralna mreža(NN) sastoji se od niza povezanih stanica: neurona. Neuroni primaju impulse od ulaznih podataka ili od drugih neurona, obavljaju transformaciju tih podataka i šalju rezultat ili ostalim neuronima ili izlaznim stanicama.

Neuron je realna funkcija ulaznog vektora  $(y_1, \dots, y_k)$ . Izlaz se ostvaruje kao:

$$f(x_j) = f(\alpha_j + \sum_{i=1}^k w_{ij} y_{ij}) \quad [12]$$

Gdje je  $f$  funkcija, tipično sigmoidna. Grafički prikaz neurona vidljiv je na **slici 25**.



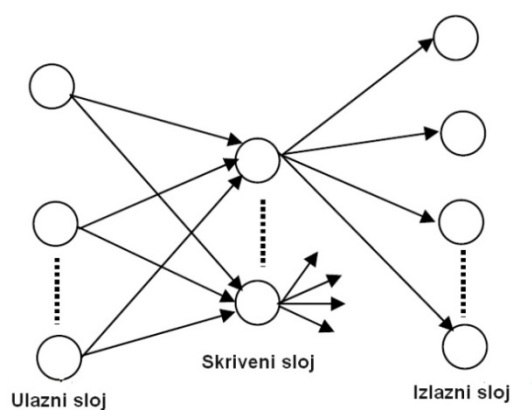
Slika 25. Grafički prikaz neurona

### 6.2.3 Struktura neuralnih mreža

ANN je definirana kao sustav za obradu podataka koji se sastoji od velikog broja jednostavnih i visokopovezanih procesnih elemenata (neurona) strukture inspirirane onoj u cerebralnom korteksu mozga. Postoji nekoliko struktura neuralnih mreža od kojih su najčešće opisane ispod.

#### Mreže bez povratnih veza (FFNN)

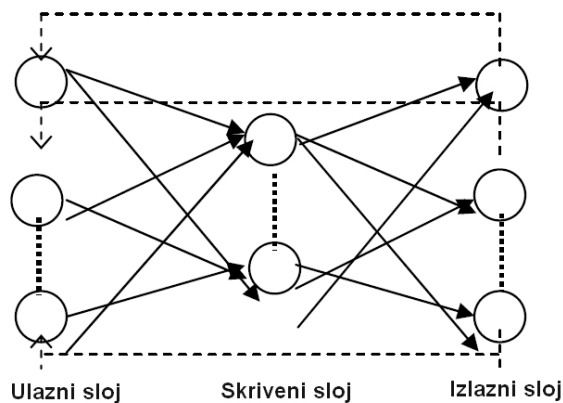
U mreži bez povratnih veza, informacija ide u jednom smjeru po zacrtanim putovima, od ulaznog sloja do izlaznog. Ne sadržava petlje, odnosno izlaz sa bilo kojeg sloja neurona ne utječe na ulaz u isti sloj (*slika 26*).



*Slika 26.* Shematski prikaz višeslojne nepovratne mreže

#### Mreže sa povratnom vezom

Ove mreže razlikuju se od nepovratnih time što imaju bar jednu povratnu petlju. Što znači da postoji povratna veza prema prethodnim slojevima kao što je prikazano na *slici 27*. Također može postojati slučaj da je izlaz neurona povezan sa ulazom u isti neuron.



*Slika 27.* Shematski prikaz višeslojne povratne mreže

#### Ljestvičaste mreže

Ljestvičaste mreže sastoje se od 1-D, 2-D ili višedimenzionalnog polja neurona sa skupom izvornih čvorova koje daju ulazne signale. Ovo je jedna vrsta nepovratne mreže gdje su neuroni raspoređeni u poje, a svaki ulaz spojen je na sve neurone u polju(29).

#### 6.2.4. Tipovi neuralnih mreža

Najvažnije vrste neuralnih mreža za rješavanje stvarnih problema uključuju, višeslojnu perceptronsku mrežu, mreže radialne osnovne funkcije, i kohoneovu samoorganizirajuću mrežu. U nastavku su iznesena osnovna svojstva tih tipova.

##### *Višeslojna perceptron mreža*

Najpopularniji od svih sustava neuronskih mreža je višeslojni perceptron (MLP) koji :

- ima neograničen broj ulaza,
- ima jedan ili više skrivenih slojeva sa neograničenim brojem neurona u sloju,
- upotrebljava linearnu kombinaciju funkcija u ulaznim slojevima,
- upotrebljava općenitu sigmoidnu aktivacijsku funkciju u skrivenim slojevima,
- ima neograničen broj izlaza sa bilo kakvom aktivacijskom funkcijom.

Ukoliko postoji dovoljno podataka na raspolaganju, dovoljno skrivenih jedinica i dovoljno vremena za treniranje, gotovo svaka funkcija se da dovoljno točno aproksimirati sa MLP mrežom (statistička analogija je aproksimiranje funkcije sa  $n$ -tim redom polinoma). Stoga je MLP pogodna za općenite aproksimacije kad postoji malo predznanje o vezi između ulaza i cilja. Iako je jedan skriveni sloj dovoljan ukoliko postoji dovoljno ulaznih podataka, postoje situacije kada mreža može imati manje jedinica i težinskih omjera u više slojeva u odnosu na mrežu sa jednim skrivenim slojem, što može poboljšati generalizaciju.

##### *Mreža sa radialnom baznom funkcijom*

To su također mreže bez povratne veze, ali imaju jedan skriveni sloj. Takve mreže:

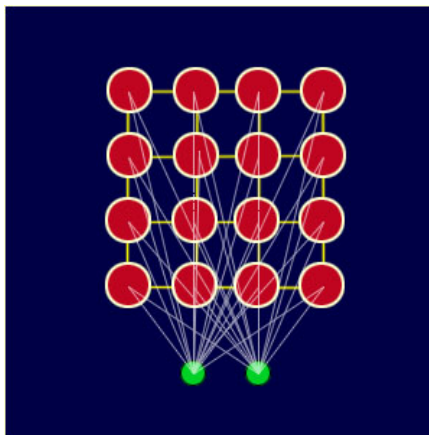
- imaju bilo koji broj ulaza,
- tipično imaju jedan skriveni sloj sa neograničenim brojem jedinica,
- upotrebljavaju radialne kombinacije funkcija u skrivenom sliju, bazirane na kvadratu euklidske udaljenosti između ulaznog i težinskog vektora,
- imaju neograničen broj izlaza sa bilo kakvom aktivacijskom funkcijom
- tipično upotrebljava eksponencijal softmax aktivacijske funkcije

MLP mreže su, kako je rečeno, procesno distribucijske jer se učinak skrivenih jedinica može distribuirati preko cijelog ulaznog područja. Za razliku od toga, za Gaussove mreže se kaže da su lokalno procesne jer je učinak skrivene jedinice uobičajeno koncentrirano lokalnom području centriranom oko težinskog faktora.

##### *Kohonenova neuralna mreža*

Samoorganizirajuće karte značajki (SOFM, ili Kohonen) mreže se upotrebljavaju dosta različito u odnosu na ostale mreže. Gdje su sve ostale mreže kreirane da uče uz nadzor, SOFM mreže kreirane su primarno za učenje bez nadzora(30).

Kohonen mreža pokušava naučiti strukturu podataka, stoga je primjenjiva u istraživačkoj analizi podataka ili pri detekciji noviteta. SOFM mreže se mogu naučiti da raspoznaju klastere u podacima za učenje, te da na njih odgovaraju. Ukoliko se susretnu sa novim podatkom, mreža ga ne prepoznaje i ubacuje pod novitet. SOFM mreže imaju samo dva sloja: ulazni sloj i izlazni sloj (takozvana topološka karta) (*slika 28*).



Slika 28. Jednostavna SOFM mreža

### 6.2.5 Razvoj NN modela

Razvijanje modela neuralne mreže obavlja se u nekoliko koraka, o koji su općenito navedeni u daljnjem tekstu.

#### Selekcija varijabli:

Ulazne varijable bitne za modeliranje istih samim procesom odabiru se prigodnim procedurama odabira.

#### Formiranje treninga, testiranje i validacija:

Skup podataka se dijeli u tri različita područja naziva treniranje, testiranje i validacija. Skup za treniranje je najveći i neuralna mreža ga koristi za učenje uzoraka koji se pojavljuju u podacima. Skupa podataka za testiranje upotrebljava se za procjenu sposobnosti generalizacije navodno utrenirane mreže. Finalna provjera brzine rada utrenirane mreže vrši se uz pomoć validacijskog skupa.

#### Arhitektura mreže:

Arhitektura neuralne mreže definira njenu strukturu i uključujući broj skrivenih slojeva, broj skrivenih neurona u sloju, broj izlaznih čvorova itd.

- Broj skrivenih slojeva: skriveni sloj (ili više njih) omogućavaju mreži generalizaciju. U teoriji, NN sa jednim skrivenim slojem i dovoljnim brojem skrivenih neurona je u mogućnosti aproksimirati bilo koju linearnu funkciju,
- Broj skrivenih čvorova: ne postoji univerzalna formula za optimalni broj skrivenih neurona, ali neka okvirna pravila su dostupna za njihov izračun(31). Za troslojnu mrežu sa  $n$  ulaza i  $m$  izlaza, skriveni sloj sadrži  $\sqrt{n * m}$  neurona.
- Broj izlaznih čvorova: NN sa jednim izlazom će dati superiornije podatke u odnosu na onu sa više izlaza, pogotovo ukoliko su izlazi široko postavljeni,
- Aktivacijska funkcija: aktivacijske funkcije su matematičke formule koje određuju izlaz iz neurona. Svaka jedinica prima svoj ulazni signal i na njega primjenjuje aktivacijsku funkciju. Svrha prelazne funkcije je sprječavanje velikih vrijednosti na izlazu koje mogu „paralizirati“ mrežu i tim spriječiti treniranje. Uobičajeno se upotrebljavaju sigmoidne prijelazne funkcije zbog toga što su nelinearne i neprekidno diferencijalne, što je poželjno za učenje mreže.

#### Kriterij procjene:

Najčešća funkcija greške koja se minimizira u NN je suma kvadrata greške. Ostale funkcije koje se nude u software-skim aplikacijama uključujući najmanje apsolutne devijacije, asimetrične najmanje kvadrate i razlike postotaka.

### Treniranje mreže:

Treniranje ANN za učenje obrazaca u podacima uključuje iterativnu prezentaciju primjera točnih poznatih odgovora. Cilj je naći težinski skup između neurona koji određuje globalni minimum funkcije greške. To uključuje odluke o broju iteracija i odabir brzine učenja (konstanta proporcionalnosti koja određuje veličinu težinskih podešavanja učinjenih pri svakoj iteraciji) i vrijednosti momenta (koliko prijašnji težinski faktori utječu na trenutne).

## 6.3 Mehanizmi optimizacije

### 6.3.1 Propagacija unatrag – back propagation algorithm (BP)

Algoritam propagacije unatrag predstavlja jedno od najznačajnijih otkrića u razvoju ANN,(32). Upotrebljava se u višeslojnim mrežama bez povratnih veza, odnosno, mreža šalje signal put izlaza, a greška se propagira put nazad. BA upotrebljava učenje uz nadzor, što znači da se algoritmu dalju primjeri željenih ulaza i izlaza, a greška se računa na osnovu razlike dobivenih i željenih rezultata. Cilj BA je smanjivanje ove greške, sve dok ANN treniranjem ne nauči podatke. Treniranje započinje nasumičnim težinskim faktorima, sa ciljem njihovog daljnjeg podešavanja koje vodi minimiziranju greške. Aktivacijska funkcija neurona ANN pri implementiranju BA je zbroj ulaza  $x_i$  pomnožen sa njihovim težinskim faktorima  $w_{ji}$ :

$$A_j(\bar{x}, \bar{w}) = \sum_{i=0}^n x_i w_{ji} \quad [13]$$

Dakle, aktivacija ovisi samo o ulaznim veličinama i težinskim faktorima. ovakav oblik neurona nazivamo linearnim. Takav način u praksi ima dosta ograničenja, stoga se kao izlazna funkcija najčešće se upotrebljava sigmoidna funkcija:

$$O_j(\bar{x}, \bar{w}) = \frac{1}{1+e^{-A_j(\bar{x}, \bar{w})}} \quad [14]$$

Sigmoidna funkcija je vrlo blizu jedinici za veće pozitivne brojeva, 0.5 za 0, i vrlo blizu nule za velike negativne brojeve. Navedeno omogućava blagi prijelaz između visokog i niskog izlaza neurona. Funkcija greške definira se kao:

$$E_j(\bar{x}, \bar{w}, d) = (O_j(\bar{x}, \bar{w}) - d_j)^2 \quad [15]$$

Kvadrat razlike se uzima jer je uvijek pozitivan, te je veći ukoliko je razlika značajna, odnosno mali ukoliko je razlika manja. Greška cijele mreže je suma svih grešaka neurona u izlaznom sloju:

$$E_j(\bar{x}, \bar{w}, d) = \sum_j (O_j(\bar{x}, \bar{w}) - d_j)^2 \quad [16]$$

Algoritam unatražne propagacije sada računa kakav je utjecaj greške na ulaz, izlaz i težinske faktore. Nakon toga slijedi prilagođavanje težinskih faktora upotrebljavajući pad gradijenta:

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \quad [17]$$

Jednadžba 17 se može interpretirati na sljedeći način: podešavanje svakog težinskog faktora ( $w_{ji}$ ) će biti negativna vrijednost konstante ( $\eta$ ) pomnožene sa ovisnošću prethodne greške mreže, koja je derivacija  $E$  u odnosu na  $w_{ji}$ . Veličina prilagodbe će ovisiti o  $\eta$  i o doprinosu težinskog faktora greške funkcije. Stoga je potrebno „samo“ pronaći derivaciju greške u odnosu na  $w_{ji}$ . Prvi korak je izračun ovisnosti greške o izlazu, koji je derivacija  $E$  u odnosu na  $O_j$  (3).

$$\frac{\partial E}{\partial O_j} = 2(O_j - d_j) \quad [18]$$

Nakon toga izračun ovisnosti izlaza o aktivaciji, koja opet ovisi o težinskim utjecajima:

$$\frac{\partial O_j}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial O_j}{\partial A_j} \frac{\partial A_j}{\partial w_{ji}} = O_j(1 - O_j)x_i \quad [19]$$

A slijedi iz [18] i [19]:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial O_j} \frac{\partial O_j}{\partial w_{ji}} = 2(O_j - d_j)O_j(1 - O_j)x_i \quad [20]$$

Stoga će prilagodba pojedinog težinskog faktora biti (iz [17] i [20]):

$$\Delta w_{ji} = -2\eta(O_j - d_j)O_j(1 - O_j)x_i \quad [21]$$

*Jednadžba [21]* je prikladna za izračunavanje mreže sa dva sloja. Ukoliko imamo više slojeva i želimo podesiti težinske faktore prethodnog sloja( nazovimo ih  $v_{ik}$ ) potrebno je prvo izračunati kako greška utječe ne na težinu, nego na ulaz od prethodnog. Nadalje je potrebno ustanoviti kako greška mreže utječe na podešavanje  $v_{ik}$ :

$$\Delta v_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial v_{jk}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial v_{ik}} \quad [22]$$

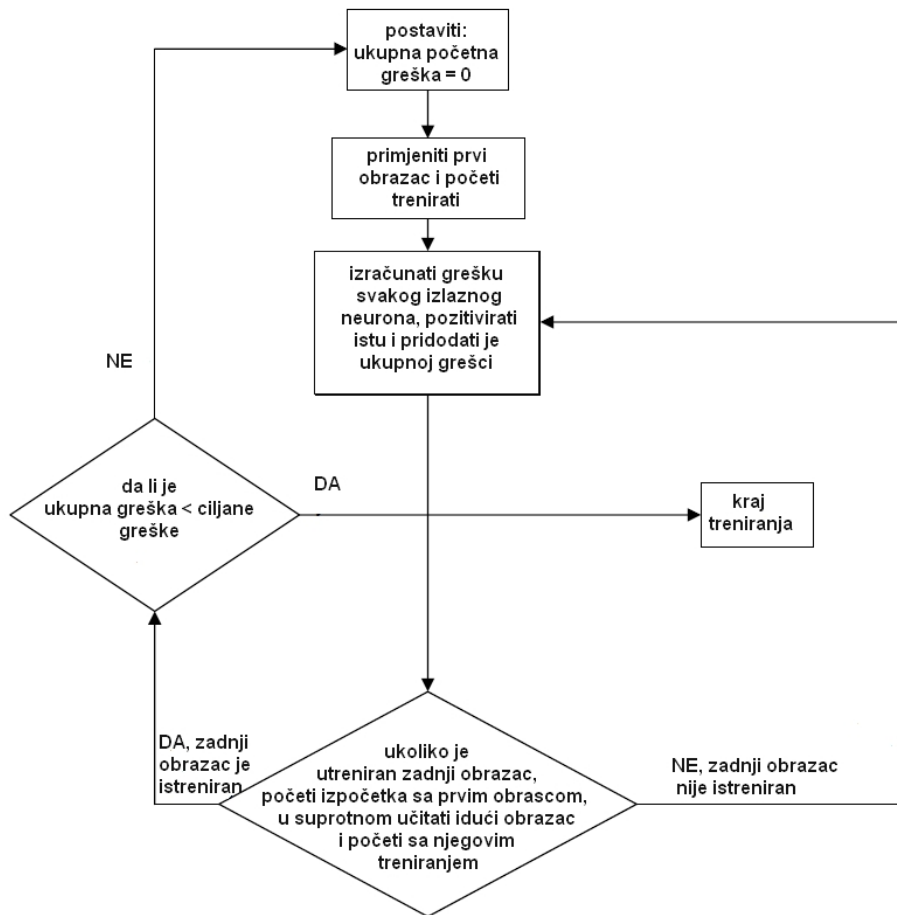
I uz pretpostavku da su ulazi  $u_k$  u neuron  $v_{ik}$  :

$$\frac{\partial x_i}{\partial w_{ji}} = x_i(1 - x_i)v_{ik} \quad [23]$$

Ukoliko se želi dodati još jedan sloj, po istom principu, računamo kako greška utječe na ulaze i težinske faktore prvog sloja. Indeksiranje je nešto na što treba obratiti pažnju, jer svaki sloj može imati različiti broj neurona.

Iz praktičnih razloga ANN sa propagacijom unatrag ne sadrži previše slojeva, budući da vrijeme za treniranje mreže raste eksponencijalno.

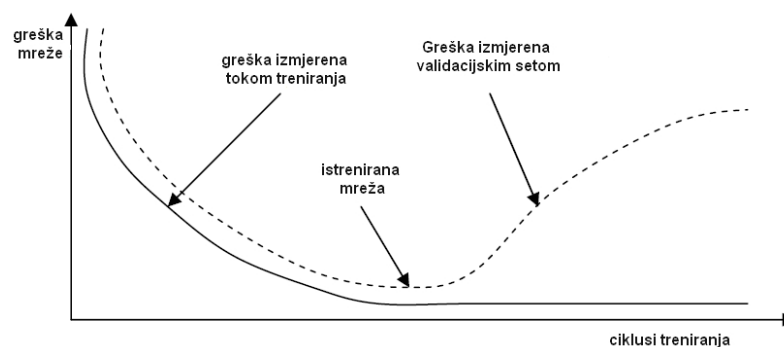
U prethodnom dijelu je spomenuto da je ukupna greška mreže zbroj svih grešaka izlaznog sloja, treniranje mreže završava ukoliko ta greška pada unutar prethodno određenog tolerantnog područja (*slika 29*).



Slika 29. Treniranje neuralne mreže

Jednom kad je mreža istrenirana, u stanju je prepoznati ne samo „čiste“ uzorke, već i one skrivene među šumovima. Zapravo performanse mreže se mogu poboljšati namjerno ubacujući obrasce sa šumovima, kao i nasumično ubacivanje obrazaca.

Postoji i bolji način zaustavljanja treniranja mreže, upotrebom validacijskih setova. Princip se sastoji od ubacivanja uzoraka sa šumovima iz vremena treniranja mreže (na tim uzorcima nije obavljeno treniranje), te njihova upotreba pri kalkulaciji greške. Kada se greška smanji mreža staje (slika 30).

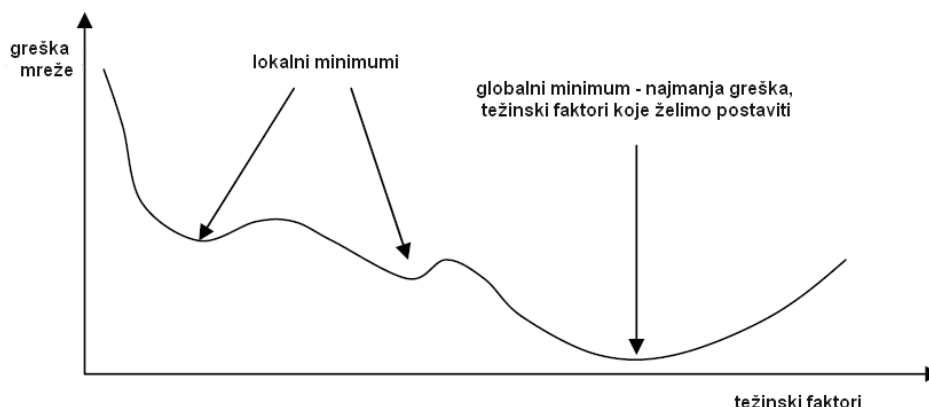


Slika 30. Upotreba validacijskih setova pri treniranju mreže.

Kada je mreža u potpunosti istrenirana, greška validacijskog seta je na minimumu, ukoliko se mreža pretrenira (povećanje točnosti smanjuje brzinu mreže), greška validacijskog seta počinje rasti.



Od postojećih problema vezani za propagaciju unazad najpoznatiji je tzv., „Lokalni Minimum“. Do toga dolazi jer algoritam uvijek mijenja težinske faktore na način da smanjuje grešku. Ali ukoliko greška zahtjeva kratkotrajni rast kao dio globalnog pada (*slika 31.*), u tom slučaju, algoritam staje, jer ne može ići uzbrdo (povećavati grešku).



**Slika 31.** Lokalni minimumi

Postoji više načina rješavanja ovog problema. Najjednostavniji od njih je resetiranje težinskih faktora na nasumične vrijednosti i početi treniranje ispočetka. Drugi način je dodavanje „momenta/zamaha“ na promjenu težinskih faktora, što bi značilo da promjena težine pri jednoj iteraciji ne ovisi samo o trenutnoj grešci, već i o prethodnim promjenama, na primjer:

$$W^+ = W + \text{trenutna promjena} + (\text{promjena prethodne iteracije} * \text{konstanta})$$

Gdje je konstanta < 1.

### 6.3.2 Levenberg-Marquardt optimizacija

Levenberg-Marquardt metoda je standardna tehnika upotrebljavana za rješavanje nelinearnih problema najmanjih kvadrata. Problemi se javljaju tokom prilagođavanja parametrizirane funkcije (čiji parametri nisu linearni) skupu izmjerenih podataka minimizirajući sumu kvadrata greške između funkcije i dobivenih točaka. Levenberg-Marquardt predstavlja kombinaciju dviju minimizirajućih metoda: metodu pada gradijenta i Gauss-Newtonovu metodu. U metodi pada gradijenta, suma kvadrata greške se reducira ažuriranjem parametara u smjeru najveće redukcije najmanjih kvadrata cilja. U Gauss-Newtonovoj metodi, suma kvadrata greške se reducira uzimajući funkciju najmanjeg kvadrata kao lokalno kvadratnu, i pronalazeći minimum kvadrata. Levenberg-Marquardt se ponaša kao metoda pada gradijenta kada su parametri daleko od optimalne vrijednosti, a kao Gauss-Newtonova metoda ukoliko su parametri blizu optimuma.

Metoda pada gradijenta je opća minimizacijska metoda koja ažurira parametarske vrijednost u smjeru suprotnom gradijentu funkcije cilja. Poznata je kao visokokonvergentni algoritam za nalaženje minimuma jednostavnih funkcija cilja(33,34). Za probleme sa tisućama parametara, metoda pada gradijenta može biti jedina izvediva.

Gauss-Newtonova metoda minimizira zbroj kvadrata funkcije cilja, za koju pretpostavlja da je približno kvadratna u parametrima blizu optimalnog rješenja. Za srednje složene probleme ova metoda konvergira rješenju brže od one koja upotrebljava pad gradijenta.

### 6.3.3 Optimiranje rojem čestica - Particle Swarm Optimisation(PSO)

Optimiranje rojem čestica (PSO) je evolucijska tehnika optimiranja u kojoj se skup čestica giba prostorom u potrazi za najboljim rješenjem problema. Koncept je izveden iz ponašanja jata ptica u potrazi za hranom.

Svaka od čestica je određena točkom u  $N$ -dimenzionalnom prostoru, a podešavanje putanje se modificira u skladu sa vlastitim iskustvom čestice i iskustvom ostalih čestica. Svaka čestica bilježi svoju poziciju u prostoru potrage u odnosu na najbolju poziciju (definiranu od strane korisnika uz pomoć fitness-a) postignutu do sad. Takva pozicija se naziva personal best  $Pbest$ . PSO također prati lokaciju najbolje postavljene čestice od cijelog roja, takva veličina se naziva global best  $Gbest$ . Osnovni koncept se sastoji o ubrzavanja čestice put  $Pbest$  i  $Gbest$ , sa slučajno određenom akceleracijom za svaki vremenski korak.

PSO starta sa nasumičnom inicijalizacijom čestica u prostoru potrage. Pozicija  $i$ -te čestice u  $d$ -dimenzionalnom prostoru potrage može se definirati kao  $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{id})$ , a brzina kao  $V_i = (v_{i1}, \dots, v_{id})$ . Kako bi se smanjila tendencija čestice da napusti prostora potrage, vrijednost  $V_i$  vektora se održava u rasponu od  $[-v_{max}, v_{max}]$ . Ako je najbolja pozicija čestice (što odgovara najboljoj fitness vrijednosti postignutoj u vremenu  $t$ )  $P_i = (p_{i1}, \dots, p_{id})$ , a pozicija čestice sa najboljim fitnessom  $P_i = (p_{i1}, \dots, p_{id})$ , nove pozicije i brzine kod iduće procjene fitnessa se računaju kao:

$$v_{id}(t + 1) = \omega v_{id}(t) + c_1 rand(\cdot)(p_{id} - x_{id}(t)) + c_2 Rand(\cdot)(p_{id} - x_{id}(t)) \quad [24]$$

$$x_{id}(t + 1) = x_{id}(t) + v_{id}(t + 1) \quad [24]$$

Gdje je:

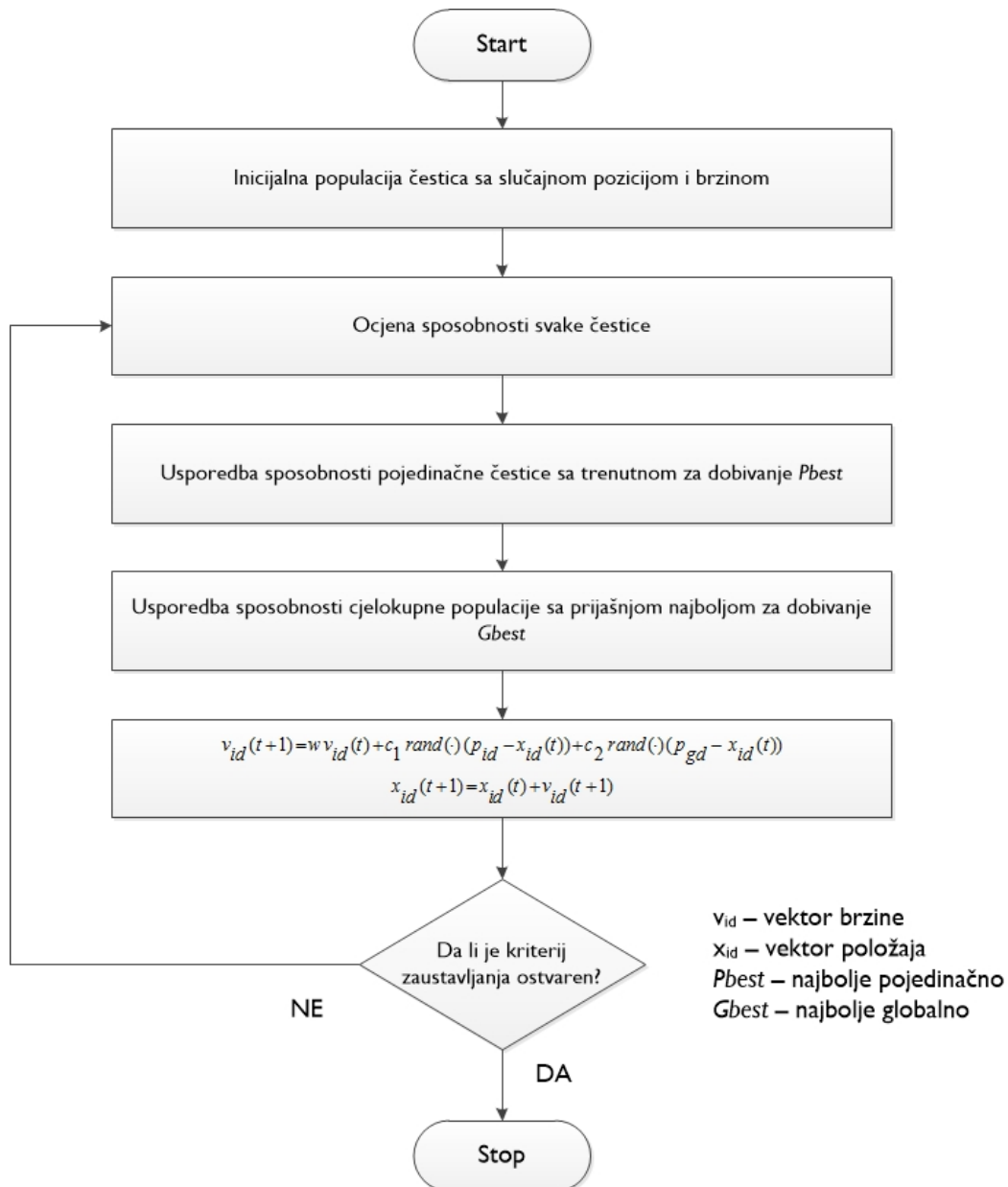
$v_{id}$  - brzina  $d$ -te dimenzije  $i$ -te čestice,

$\omega$  - konstanta koja se vodi kao inercijska težina

$c_1, c_2$  - koeficijenti ubrzanja

$rand(\cdot)$  i  $Rand(\cdot)$  - dva odvojeno generirana uniformno raspoređena nasumična broja koja leže u rasponu  $[0,1]$ .

Prvi dio *jednadžbe 24* predstavlja prethodnu brzinu, koja osigurava neophodni moment gibanja po prostoru potrage. Drugi dio predstavlja kognitivnu komponentu, odnosno osobno razmišljanje svake čestice. Kognitivna komponenta usmjerava gibanje ka najboljoj poziciji koju je čestica imala do sad. Treći dio jednadžbe predstavlja socijalnu komponentu, koja česticu usmjerava ka globalno najboljoj poziciji pronađenoj do sad. Ovakav algoritam je stekao popularnost zbog svoje jednostavne arhitekture, lakoće pri implementaciji i sposobnosti da brzo konvergira razumno dobrom rješenju(26). Osnovni PSO algoritam prikazan je na *slici 32*.



Slika 32: PSO algoritam

Za razliku od genetskih algoritama koji svakom novom generacijom uništava postojeće znanje, prednost PSO-a je u tome što zadržava prethodne spoznaje o najboljim rješenjima. PSO osim toga potiče čestice na kooperaciju i razmjenu podataka, što značajno poboljšava globalnu potragu (35).

## 7 Zaključak

U ovom radu dat je pregled područja koji se bavi zavarivanjem toplinski očvrstivih aluminijskih legura i problemima koji ih prate. Na početku rada dat je uvod u distinktivna područja značajna za zavareni spoj: zona taljenja, djelomično protaljena zona i zona utjecaja topline. Prva dva područja i prirodni zakoni koji ih prate su dosta slični svim aluminijskim legurama, bile one toplinski očvrstive ili ne. Razlika je u zoni utjecaja topline, koja kod toplinski očvrstivih legura prolazi naknadnu toplinsku obradu, uz već postojeću predobradu dozrijevanjem. Kako bi se razumjele promjene koje se dešavaju u tom području kod zavarivanja, potrebno je razumjeti proces precipitacije koji se javlja prije, tijekom i nakon samog procesa zavarivanja. Stoga je u trećem poglavlju dat pregled osnovnih karakteristika toplinski očvrstive legure

6xxx, njenih mehanizama očvršćivanja, redoslijeda precipitacije, te značajnih znanstvenih postignuća iz tog područja. U poglavlju tri također je dat pregled osnovnih toplinskih stanja spomenutih legura, a osim standardnih, objašnjenje su i relativno nove višefazne toplinske obrade, koje nude znatno poboljšanje mehaničkih svojstava testiranih legura.

Tokom zavarivanja, već formirani precipitati prolaze kroz dodatni toplinski ciklus, koji je teoretski pojašnjen u poglavlju 4, a praktično u poglavlju 5, zajedno sa do sada poznatim korektivnim i preventivnim radnjama u svrni minimiziranja štete nanesene toplinskim ciklusom pri zavarivanju.

Pregled trenutnih trendova kod optimiranja procesa zavarivanja nalazi se u području 6, zajedno sa objašnjenjima osnovnih sustava i algoritama optimiranja.

## Literatura:

- (1) Robert W. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, book, chapters 5&6, 2008.
- (2) Robert W. Messler Jr, Joining of Materials and Structures, book, chapter 9.2: Welding Thermal Cycles and Heat Flow Around Welds, page 457, Elsevier 2004.
- (3) KOU.S and LE.Y., Nucleation Mechanisms and Grain Refining of Weld Metal, supplement to welding journal, 1986. P 305s – 313s, 1986.
- (4) S. Kou, *Metallurgy Second Edition Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003, p. 466.
- (5) C. Meng, "Effect of Preheating Condition on Strength of AA6060 Aluminium Alloy for Extrusion," Auckland University of Technology, 2010.
- (6) R. Mimica, J. Radošević, and S.-S. Matešić, "Elektrokemijska svojstva aluminijske slitine EN AW 6060," *strojarstvo*, vol. 53, no. 4, pp. 199–202, 2011.
- (7) M. a. van Huis, J. H. Chen, M. H. F. Sluiter, and H. W. Zandbergen, "Phase stability and structural features of matrix-embedded hardening precipitates in Al-Mg-Si alloys in the early stages of evolution," *Acta Mater.*, vol. 55, pp. 2183–2199, 2007.
- (8) aluMATTER, precipitation hardening, precipitation hardening overview, <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=61&pageid=989848382>
- (9) J. C. Benedyk, "International Temper Designation Systems for Wrought Aluminum Alloys," *Light Met. Age*, vol. 67, pp. 3–6, 2009.
- (10) J. Banhart, C. Sin, T. Chang, Z. Liang, N. Wanderka, M. D. H. Lay, and A. J. Hill, "Natural ageing in Al-Mg-Si alloys – a process of unexpected complexity," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 12, no. 7, pp. 559–571, 2010.
- (11) R. N. Lumley, I. J. Polmear, and a. J. Morton, "Temper developments using secondary ageing," *Mater. Forum*, vol. 28, pp. 85–95, 2004.
- (12) C. Ravi and C. Wolverton, "First-principles study of crystal structure and stability of Al-Mg-Si-(Cu) precipitates," *Acta Mater.*, vol. 52, pp. 4213–4227, 2004.
- (13) D. J. Chakrabarti and D. E. Laughlin, "Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si alloys with Cu additions," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 49, pp. 389–410, 2004.

- (14) M. a. van Huis, J. H. Chen, H. W. Zandbergen, and M. H. F. Sluiter, "Phase stability and structural relations of nanometer-sized, matrix-embedded precipitate phases in Al-Mg-Si alloys in the late stages of evolution," *Acta Mater.*, vol. 54, pp. 2945–2955, 2006.
- (15) C. D. Marioara, H. Nordmark, S. J. Andersen, and R. Holmestad, "Post- $\beta$ " phases and their influence on microstructure and hardness in 6xxx Al-Mg-Si alloys," *J. Mater. Sci.*, vol. 41, pp. 471–478, 2006.
- (16) J. H. Chen, E. Costan, M. a van Huis, Q. Xu, and H. W. Zandbergen, "Atomic pillar-based nanoprecipitates strengthen AlMgSi alloys.," *Science*, vol. 312, no. 2006, pp. 416–419, 2006.
- (17) D. Maisonnette, M. Suery, D. Nelias, P. Chaudet, and T. Epicier, "Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a 6061 aluminium alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 6, pp. 2718–2724, 2011.
- (18) S. Pogatscher, H. Antrekowitsch, T. Ebner, and P. J. Uggowitzer, "the Role of Co-Clusters in the Artificial Aging of Aa6061 and Aa6060," pp. 415–420, 2012.
- (19) G. Oystein, *Metallurgical modelling of welding*, vol. 34. The Institute of Materials, 1997.
- (20) P. Hasen, *Physical metalurgy*, book, 1996.
- (21) K. Easterling, *Introduction to the physical metallurgy of welding*. Butterworth-Heinemann, 1992.
- (22) W. Robert, *Principles of Welding*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim All, 1999, p. 689.
- (23) V. Malin, "Study of Metallurgical Phenomena in the HAZ of 6061-T6 Aluminum Welded Joints," *Weld. J.*, pp. 305–318, 1995.ž
- (24) Dumolt S.D., An investigation of the microstructural changes in heat affected zone of age hardenable aluminium alloys using transmission electron microscopy. Ph.D. Thesis, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, 1983.
- (25) K. Y. Benyounis and a. G. Olabi, "Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches - A reference guide," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 39, pp. 483–496, 2008.
- (26) R. Malviya and D. K. Pratihar, "Tuning of neural networks using particle swarm optimization to model MIG welding process," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 1, pp. 223–235, 2011.
- (27) E. R. Dhas, S. Kumanan, and C. P. Jesuthanam, "Prediction of weld quality using intelligent decision making tools," *Artif. Intell. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 131–148, 2012.
- (28) G. K. Jha, „artificial Neural Networks and its applications," *International journal of computer science and issues*, pp.41-49,2005.
- (29) S. Lončarić, *Neuronske mreže, Uvod*, FER-Zagreb,2004.
- (30) D. Patterson, *Artificial Neural Networks*, Singapore, Prentice Hall (1996)
- (31) T. Masters, *Practical neural networks recipes in C++*, Academic Press, New York (1993)
- (32) D. Rumelhart, J. McClelland, *Parallel Distributed processing*, MIT Oress, Cambridge (1986)
- (33) M.I.A. Lourakis. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar, Technical Report. Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology – Hellas (2005).
- (34) K. Madsen, N.B. Nielsen, and O. Tingleff, *Methods for nonlinear least squares problems*. Technical Report. Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, (2004).
- (35) J. Yu, S. Wang, and L. Xi, "Evolving artificial neural networks using an improved PSO and DPSO," *Neurocomputing*, vol. 71, pp. 1054–1060, 2008.