Utjecaj temperature popuštanja na mikrostrukturu i tvrdoću CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika

Polak, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:040026

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Tomislav Polak

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Tomislav Polak

UTJECAJ TEMPERATURE POPUŠTANJA NA MIKROSTRUKTURU I TVRDOĆU CuAlNi LEGURE S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj/suvoditelj: doc.dr.sc. Ivana Ivanić

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:
prof.dr.sc. Stjepan Kožuh, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - predsjednik
doc.dr.sc. Ivana Ivanić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - član
prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - član
prof.dr.sc. Mirko Gojić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – zamjenski član

Sisak, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY
SISAK

FAKULTETSKO VIJEĆE

KLASA: 602-04/22-04/14
URBROJ: 2176-78/22-04-156

Sisak, 7. rujna 2022.

Temeljem točke IX. Naputka o završnom radu i završnom ispitu Pravilnika o studiranju na preddiplomskim studijima i diplomskom studiju Metalurškog fakulteta i članka 23. Statuta Metalurškog fakulteta, Fakultetsko vijeće na svojoj 15. redovitoj sjednici od 7. rujna 2022. godine (t. 3), a na prijedlog Povjerenstva za nastavu, donosi sljedeću

ODLUKU

o odobravanju teme, imenovanju voditelja i Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada

I.
Studentu preddiplomskog sveučilišnog studija *Metalurgija* smjer *Metalurško inženjerstvo* **TOMISLAVU POLAKU** (0124124689) za voditeljicu završnog rada pod naslovom "Utjecaj temperature popuštanja na mikrostrukturu i tvrdoću CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika" ("Effect of tempering temperature on microstructure and hardness of CuAlNi shape memory alloy") imenuje se **doc.dr.sc. Ivana Ivanić**.

II.
Studentu iz točke I. ove Odluke imenuje se Povjerenstvo za ocjenu i obranu završnog rada u sastavu:

1. prof.dr.sc. Stjepan Kožuh, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – predsjednik,
2. doc.dr.sc. Ivana Ivanić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – članica,
3. prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – članica,

Za zamjenskog člana imenuje se prof.dr.sc. Mirko Gojić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet.

III.
Ova Odluka stupa na snagu danom donošenja.

IV.
Protiv ove Odluke može se uložiti prigovor Fakultetskom vijeću Metalurškog fakulteta u roku 8 dana od dana primitka iste.

Dekanica Metalurškog fakulteta

prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac

Dostavljeno:
1 x Tomislav Polak
4 x voditeljica, članovi Povjerenstva
1 x Studentska referada
1 x Tajništvo
1 x pismohrana Fakultetskog vijeća
1 x pismohrana

Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet
Aleja narodnih heroja 3; p.p.1; HR - 44103 Sisak
tel.: +385(0)44 533378; 533379; 533380; 533381
faks: +385(0)44 533378
e-mail: dekanat@simet.hr; url: www.simet.unizg.hr

IME: Tomislav

PREZIME: Polak

MATIČNI BROJ: BM 3670718

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

Utjecaj temperature popuštanja na mikrostrukturu i tvrdoću CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, _____

_____
(vlastoručni potpis)

_____

Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.

Zahvaljujem se mentorici doc.dr.sc. Ivani Ivanić na strpljenju, trudu, vremenu i pomoći koje mi je posvetila pri izradi završnoga rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji koja je bila moja potpora u studiranju kako financijska tako i moralna. Hvala svim mojim kolegama i prijateljima koji su uvijek bili uz mene i bodrili me.

SAŽETAK

U ovom radu prikazan je utjecaj temperature popuštanja na mikrostrukturu i tvrdoću CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika. Legura kemijskog sastava Cu – 12,8 Al – 4,1 Ni (mas. %) je dobivena iz tehnički čistih elemenata postupkom vertikalnog kontinuiranog lijevanja. Nakon lijevanja, dobivena šipka CuAlNi promjera 8 mm, podvrgnuta je postupku toplinske obrade koji se sastojao od kaljenja na 920 °C /60'/ hlađenje u vodi te popuštanja na 150 °C, 200 °C, 250 °C i 300 °C /60'/ hlađenje u vodi. Utjecaj temperature popuštanja na mikrostrukturu CuAlNi legure utvrđen je svjetlosnom i pretražnom elektronskom mikroskopijom. Utvrđena je martenzitna mikrostruktura kod svih ispitanih uzoraka te značajni porast zrna, posebice nakon popuštanja. Tvrdoća po Vickersu pokazuje značajno povećanje tvrdoće uzorka nakon popuštanja u odnosu na kaljeno stanje.

Ključne riječi: legura s prisjetljivosti oblika, CuAlNi, toplinska obrada, popuštanje, mikrostruktura

ABSTRACT

In this paper, the influence of tempering temperature on the microstructure and hardness of CuAlNi alloy with shape memory effect is presented. Alloy with chemical composition Cu – 12.8 Al – 4.1 Ni (wt. %) was obtained from technically pure elements by the process of vertical continuous casting. After casting, the resulting CuAlNi bar with a diameter of 8 mm was subjected to a heat treatment procedure consisting of solution annealing at 920 °C /60'/ cooling in water and tempering at 150 °C, 200 °C, 250 °C and 300 °C /60'/ cooling in water. The influence of the tempering temperature on the microstructure of the CuAlNi alloy was determined by light and scanning electron microscopy. A martensitic microstructure was found in all tested samples and a significant grain growth was noticed, especially after tempering. The Vickers hardness shows a significant increase in the hardness of the sample after tempering compared to the annealed state.

Kay words: shape memory alloy, CuAlNi, heat treatment, tempering, microstructure

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. TEORIJSKI DIO 2
   2.1. Osnove efekta prisjetljivosti oblika 2
      2.1.1. Martenzitna transformacija 2
      2.1.2. Pseudoelastičnost 3
      2.1.3. Jednosmjerni efekt prisjetljivosti oblika 4
      2.1.4. Dvosmjerni efekt prisjetljivosti oblika 4
      2.1.5. Višestruki efekti prisjetljivosti oblika 5
   2.2. Legure s prisjetljivosti oblika 5
      2.2.1. Legure na bazi nikla 5
      2.2.2. Legure na bazi željeza 7
      2.2.3. Legure na bazi bakra 7
   2.3. Primjena legura s prisjetljivosti oblika 9
3. EKSPERIMENTALNI DIO 10
   3.1. Lijevanje CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika 10
   3.2. Toplinska obrada CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika 11
   3.3. Metalografska priprema CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika 11
   3.4. Mikroskopija CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika 12
      3.4.1. Svjetlosna mikroskopija 12
      3.4.2. Pretražna elektronska mikroskopija 13
   3.5. Ispitivanje mikrotvrdoće CuAlNi legura 13
4. REZULTATI I RASPRAVA 15
   4.1. Utjecaj temperature popuštanja na mikrostrukturu CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika ... 15
   4.2. Utjecaj temperature popuštanja na tvrdoću CuAlNi legura s prisjetljivosti oblika 19
5. ZAKLJUČAK 21

1. UVOD

Legure s prisjetljivosti oblika (engl. shape memory alloy, SMA) su legure koje se mogu deformirati hladnom ili toplom deformacijom, ali se pri zagrijavanju vraćaju u svoj prvobitan oblik prije deformacije. Legure s prisjetljivosti oblika su novije vrste legura, a najčešće su na bazi: bakara, aluminija, nikala, titana, željeza itd. Za pojavu prisjetljivosti oblika u zaslužna je austenitno – martenzitna transformacija koja se odvija na određenoj temperaturi ovisno o kemijskom sastavu legure. Kod legura s prisjetljivosti oblika, čvrstu fazu transformacije martenzita otkrio je Švedski fizičar Ölander 1932. godine. Ölander je provodio eksperiment na leguri zlato-kadmij gdje je hladno deformirao leguru, a potom je zagrijavao te se ona vratila u početni oblik. Drugi eksperiment provodili su Greninger i Moorad s legurama bakar-cink i bakar-kositar [1].

Efekti prisjetljivosti oblika prisutan je kod većeg broja legura i to kod:

1. legura na bazi nikla: (NiTi (nitinol), NiMnGa);
2. legura na bazi bakra (CuZnAl, CuAlNi);
3. legura na bazi željeza (FePt, FeNiCoTi i FeNiC);
4. legura na bazi plemenitih metala (PtFe, PtAl, PtGa)

Legura s prisjetljivosti oblika koja se u današnje vrijeme najčešće koristi je NiTi legura, a primjenjuje se u medicini, svemirskoj industriji, električnoj i strojarskoj industriji. Za tako široko područje primjene zaslužna su dobra mehanička i električna svojstva te biokompatibilnost [2].

Legure na bazi bakra su zamjena za NiTi legure, ali nemaju toliku stablinost i dobra mehanička svojstva kao NiTi legure, no imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na legure na bazi željeza. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra smatraju se iznimno važnima jer je njihova proizvodnja znatno jeftinija i lakša od proizvodnje NiTi legure [2, 3].

Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra ujedno posjeduju i širok raspon temperaturnog područja primjene (-200 °C do + 200 °C), malu temperaturnu histerezu te visoku sposobnost prigušenja vibracija prvenstveno kod legura legiranih s manganom [3].

U ovom radu ispitan je utjecaj temperature popuštanja na razvoj mikrostrukture te utjecaj na mikrotvrdoću CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Osnove efekta prisjetljivosti oblika

Legura s prisjetljivosti oblika „pamti“ svoj oblik zahvaljujući promjeni unutar strukture materijala, tj. martenzitnoj transformaciji koja nastaje zbog razlike između slobodne energije između marenzita i austenita.

2.1.1. Martenzitna transformacija

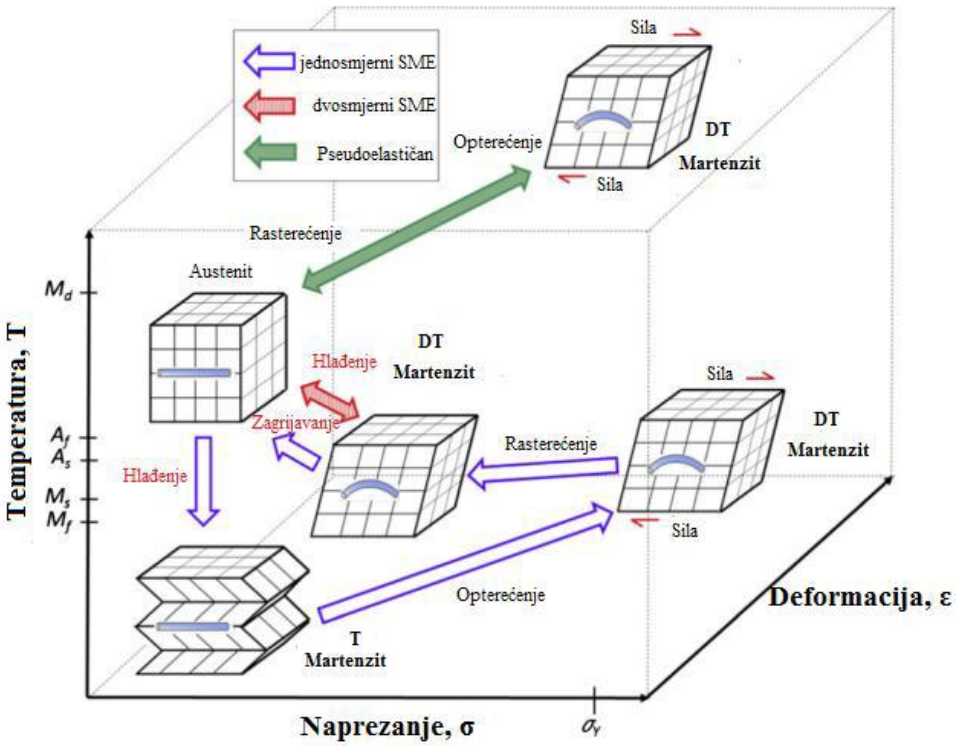
Dvije faze koje su odgovorne za efekt prisjetljivosti oblika su austenit (A) i martenzit (M). Austenit je faza koja je postojana na višim temperaturama dok je martenzit postojaniji na nižim temperaturama. Martenzitna transformacija je bezdifuzijska transformacija kod koje dolazi do promjene u kristalnim strukturama između uređene strukture austenita u manje uređenu strukturu - martenzita [4]. Postoji veći broj varijanti martenzita zbog različititih deformacija austenita u kristalnoj strukturi. Austenit ima kubičnu kristalnu plošno centriranu strukturu dok martenzit ima tetragonsku, ortorombsku ili monoklinsku. Do martenzitne transformacije dolazi kada slobodna energija martenzita postane manja od slobodne energije austenita. Tijekom same transformacije ne dolazi do difuzije atoma već samo do smične deformacije [4].

Između austenita, samoprilagođavajućeg martenzita i martenzita induciranog naprezanjem javlja se mogućih šest transformacija:

1. austenit se djelovanjem naprezanja transformira u naprezanjem induciran martenzit;
2. naprezanjem induciran martenzit se nakon rasterećenja na visokim temperaturama povratno transformira u austenit;
3. naprezanjem inducirani martenzit se pri određenom naprezanju transformira u drugi naprezanjem inducirani martenzit;
4. samoprilagođavajući matrenzit se pri određenom naprezanju transformira u naprezanjem induciran martenzit;
5. austenit se pri naprezanju transformira u naprezanjem induciran martenzit;
6. samoprilagođavajući martenzit se pri zagrijavanju transformira u austenit.

Martenzitna transformacija može biti termoelastična i netermoelastična. Netermoelastična transformacija javlja se u željeznim legurama, dok termoelastičnu transformaciju imaju legure s prisjetljivosti oblika [5].

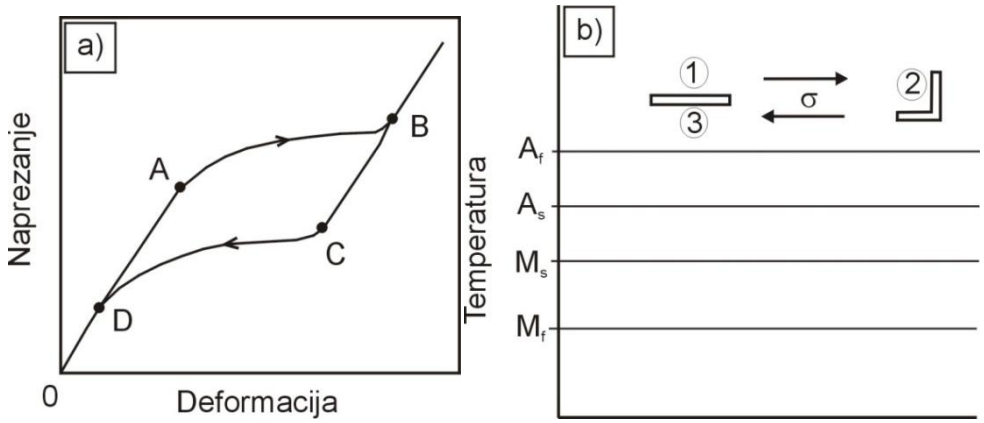
Na slici 1 prikazane su kristalne strukture i faze te karakteristična svojstva SMA legura (pseudoelastičnost, jednosmjerni i dvosmjerni efekt s prisjetljivosti oblika [6].



Slika 1. Kristalne strukture i faze te svojstva SMA legura; (T – samoprilagođavajući martenzit, DT – naprezanjem inducirani martenzit) [6]

2.1.2. Pseudoelastičnost

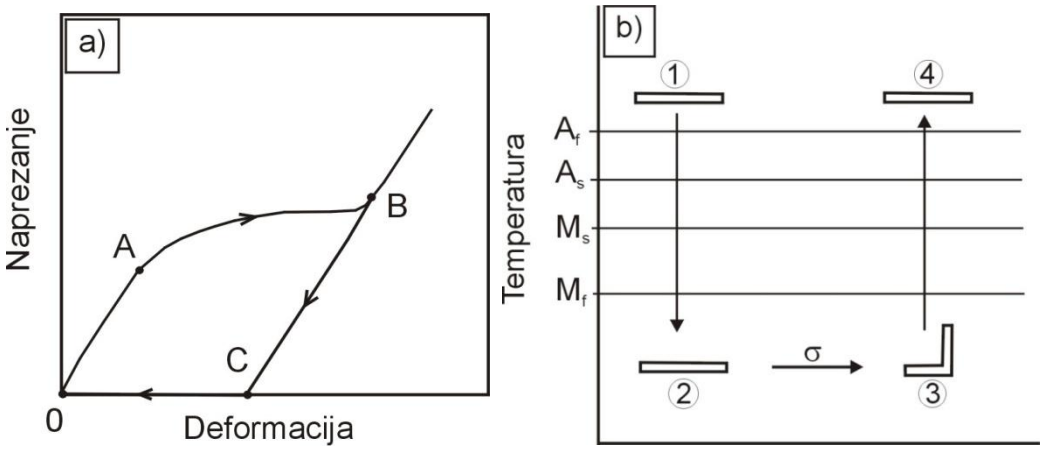
Kada se leguru s prisjetljivosti oblika podvrgne mehaničkom naprezanju vanjske sile i ona dosegne kritičnu vrijednost u točki A (prikazano na slici 2) započinje transformacija naprezanjem induciranog martenzita sve do točke B. Pri jednosmjernom efektu, legura „pamti“ samo oblik austenitne faze. Nakon rasterećenja, tj. prestankom naprezanja uzorak legure nakon deformacije se vraća u početni položaj [7].



Slika 2. Dijagram naprezanje – deformacija legure s prisjetljivošću oblika (a) i shematski prikaz pseudoelastičnosti (b); 1 i 3 prikazuju početni oblik legure, a 2 prikazuje oblik legure nakon deformacije [7]

2.1.3. Jednosmjerni efekt prisjetljivosti oblika

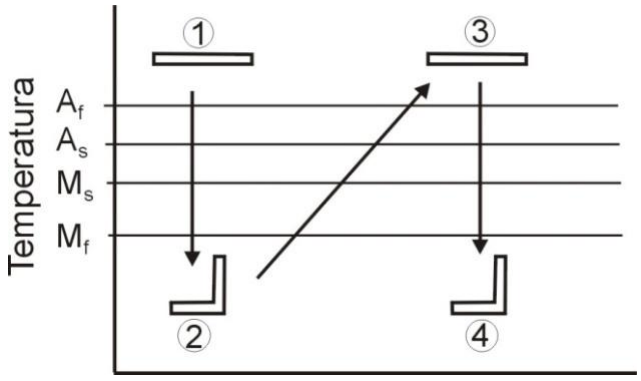
Do započinjanja transformacije samoprilagođavajućeg martenzita udeformacijski inducirani martenzit dolazi kada na uzorak djeluje vanjska odnosno mehanička sila gdje uslijed opterećenja naprezanje dosegne kritičnu vrijednost u točki A prikazano na slici 3. Sama transformacija traje do točke B [8]. Kada na leguru prestane djelovati mehanička sila, legura zadržava određeno istezanje koje se može ooraviti zagrijavanjem legure gdje dolazi do inducirane povratne faze transformacije (točka C) [9].



Slika 3. Dijagram naprezanje – deformacija za leguru s prisjetljivošću oblika (a) i shematski prikaz jednosmjernog efekta prisjetljivosti oblika (b); 1 i 4 prikazuju originalni oblik legure, 2 prikazuje oblik nakon hlađenja, a 3 prikazuje oblik legure nakon naprezanja [10]

2.1.4. Dvosmjerni efekt prisjetljivosti oblika

Dvosmjerni efekt prisjetljivosti oblika dolazi kada legura ne pamti samo oblik pri deformaciji austenitne faze već mijenja oblik pri hlađenju i zagrijavanju (slika 4). Dvosmjerni efekt nastaje kada leguru s prisjetljivosti oblika podvgnemo toplinskom opterećenju bez prisustva djelovanja vanjske sile. U tom trenutku legura pamti i austenitni i martenzitni oblik. Postoje tri mikrostrukturna oblika: visokotemperaturni austenit, niskotemperaturni martenzit i naprezanjem inducirani martenzit. Međutim da bi došlo do „pamćenja“ oblika potrebno je leguru prvo „istrenirati“ [11].



Slika 4. Shematski prikaz dvosmjernog efekta prisjetljivosti oblika [12]

Taj efekt možemo dobiti na dva načina:

a) Termomehaničko cikliranje – legura pamti oblik visokotemperaturne i niskotemperaturne faze te promjenom temperature mijenja i oblik.

b) Stabilizacija naprezanjem induciranog martenzita - prate se precipitati γ – faze i deformacijsko polje koje nastaje ili nestaje kod promjene temperature [13].

2.1.5. Višestruki efekti prisjetljivosti oblika

Do pojave višestrukog efekta s prisjetljivosti oblika dolazi kada „istrenirani“ materijal ima jedan ili više među oblika dok se vraća iz deformiranog odnosno „ istreniranog“ oblika u početni oblik. Dokazano je da svaki polimer bio prirodni ili sintetički ima višestruki [13].

2.2. Legure s prisjetljivosti oblika

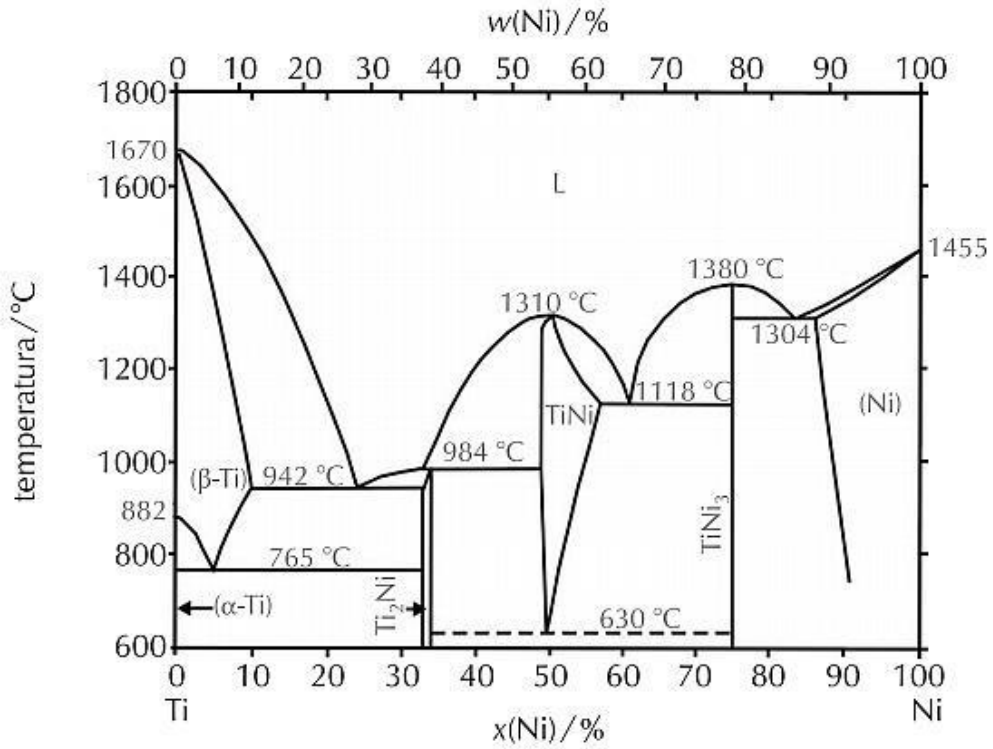
U legure s prisjetljivosti oblika ubrajamo legure na bazi nikla, željeza, bakra i plemenitih metala.

2.2.1. Legure na bazi nikla

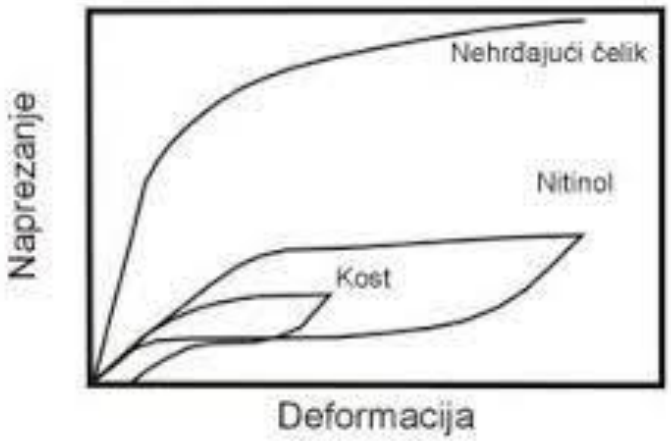
Buecher je šezdesetih godina 20. stoljeća otkrio prisjetljivost oblika na legurama nikla i titanija, a najpoznatija legura je $Ni_{50}Ti_{50}$. Svojstva i temperature faznih transformacija NiTi legure ovise o načinu proizvodnje, postupcima toplinske obrade te uvelike o kemijskom sastavu, a posebice o udjelu nikla u leguri te uglavnom temperature fazne transformacije iznose od - 40 °C do + 100 °C [8].

Kako bi se lakše mogla razumijeti svojstva i mikrostruktura legura s prisjetljivosti oblika na bazi nikla i tinata, potrebno je proučiti fazni dijagram. Pomoću njega se određuje stabilnost pojedinih faza pri određenoj temperaturi. Na slici 5 prikazan je fazni dijagram NiTi legure s prisjetljivosti oblika [13, 14].

Druga važna činjenica za legure NiTi je povoljan Youngov modul elastičnosti. Na slici 6 prikazana je razlika u dijagramu naprezanja-deformacije kod legure NiTi, nehrđajućeg čelika i kosti. U odnosu na nehrđajući čelik može se zamijetiti slično ponašanje (sličan oblik krivulje) za NiTi leguru i kost [6].



Slika 5. Fazni dijagram NiTi legure s prisjetljivosti oblika [13, 14]



Slika 6. Prikaz naprezanja – deformacija za nehrđajući čelik, NiTi i kosti [6]

Oporavak nakon istezanja odnosno deformacije za jednosmjerne efekte iznosi 8 % dok je za dvosmjene efekte 4 %. Kako bi legura na bazi nikla postigla efekt prisjetljivosti oblika potrebno je provesti toplinsku obradu nakon proizvodnje postupcima plastične deformacije u hladnom stanju. Proizvodnja legura NiTi je zahtjevna zbog oksidacije titana, visokih cijena sirovina te loše obradivosti metala [15].

2.2.2. Legure na bazi željeza

Prema zastupljenosti, nakon legura na bazi nikla i bakra, legure na bazi željeza predstavljaju treću skupinu legura s prisjetljivosti oblika. Ova skupina legura s prisjetljivosti oblika je ekonomski superiornija od NiTi legura. Razlog tome je relativno niska cijena legura i jednostavnost proizvodnje jer se može koristiti postrojenje namijenjeno za konvencionalnu proizvodnju čelika. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi željeza uključuju FePt, FePd, FeMnSi, FeMnAl, FeNiC i FeNiCoTi. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi željeza imaju manje istaknut efekt prisjetljivosti oblika, no s obzirom na jeftiniju i bržu proizvodnju mogu se koristiti pri zamijeni legura s prisjetljivosti oblika na bazi nikla. Prednosti legura s prisjetljivosti oblika na bazi željeza je lakša i jednostavnija obradivost, ali zbog velike oksidacije željeza nužno ju je legirati s elementima poput kroma i nikla, koji značajno smanjuju efekt prisjetljivosti oblika. Kako bi proces bio ekonomski isplativ, razina troškova proizvodnje legura na bazi željeza s prisjetljivosti oblika mora biti na istoj razini kao proizvodnja ugljičnog čelika [11].

2.2.3. Legure na bazi bakra

Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra imaju visoku temperaturnu stabilnu β-fazu te navedenoj kategoriji pripadaju najpoznatije CuZnAl i CuAlNi legure zajedno s njihovim četverokomponentnim inačicama. Legurama na bazi bakra mogu se poboljšati mehanička i kemijska svojstava dodavajući im mali udio određenog legirajućeg elementa. Ukoliko se CuAlNi leguri poveća udio aluminija dolazi do povećanja temperatura početka nastanka martenzita, dok se dodatkom srebra povećava tvrdoća i poboljšava otpornost na koroziju [8]. Dodatkom četvrtog legirajućeg elementa (kobalta, cirkonija, bora ili titana) utječe se na veličinu zrna, tj. navedeni elementi služe za usitnjavanje zrna (od 50 μm do 100 μm), ali i poboljšanje svojstava legure, npr. duktilnosti i slično [10].

CuZnAl

CuZnAl legura je komercijalno korištena legura s prisjetljivosti oblika, odmah nakon NiTi. U usporedbi s legurom NiTi, legura CuZnAl je jednostavnija i jeftinija za proizvodnju, ima bolju električnu i toplinsku vodljivost te bolju duktilnost. Međutim, legura CuZnAl ima znatno inferiornija svojstva prisjetljivosti oblika. CuZnAl legure s prisjetljivosti oblika pokazuju značajni efekt memorije oblika u određenom području kemijskog sastava. Legura ima prostorno centriranu kubnu β-faznu strukturu koja je stabilna na visokim temperaturama. Uobičajeni postupak proizvodnje CuZnAl legure je betatizacija kako bi se održala β-faza, te hlađenje u vodi kako bi se postigla martenzitna mikrostruktura [10].

CuAlNi

CuAlNi legura također je jeftinija i jednostavnija za proizvodnju u odnosu na leguru NiTi. Taljenje CuAlNi legura se najčešće provodi u vakuumskim indukcijskim pećima sa zaštitnom atmosferom inertnog plina, kako bi se spriječila oksidacija aluminija, dok se postupci metalurgija praha i postupak brzog skrućivanja primjenjuje za proizvodnju sitnozrnatih legura bez upotrebe elemenata koji se koriste za usitnjavanje zrna. CuAlNi legura s prisjetljivosti oblika proizvedene konvencionalnim načinom vrlo je krhka, što je povezano s velikom elastičnom anizotropijom i krupnozrnatom mikrostrukturom. Anizotropija martenzitne transformacije ima izravne posljedice na makroskopsko ponašanje polikristala. Polikristali

imaju niski stupanj oporavka oblika zbog nasumično raspoređene orijentacije i pseudoelastičnog učinka koji je ograničen na 2 %, što je premala vrijednost za praktičnu upotrebu [10].

U tablici 1. prikazana su kemijska i mehanička svojstva legura s prisjetljivosti oblika.

Tablica 1. Usporedba svojstava NiTi, CuAlNi i CuAlZn legura s prisjetljivosti oblika [10]

Svojstva legura	CuAlNi	NiTi	CuZnAl
Talište /	1000-1050	1250	1020
Granica razvlačenja /	400	580	80-200
Vlačna čvrstoća /	500-800	800-1000	500-600
Duktilnost /	5-7	54	15
Zamorna čvrstoća /	350	350	270
Toplinski kapacitet /	373-574	450-620	390-400
Toplinska provodljivost /	30-75	8,6-18	84-120
Entalpija transformacije	9	28	7
Gustoća	7100-7200	6400-6500	7540-8000
Latentna toplina	7000-9000	19000-32000	7000-9000
Električna otpornost	0,1-0,14	0,5-1,1	0,07-0,12
Koeficijent toplinskog širenja	17	6,6-11	17
Maksimalno naprezanje pri oporavku	300-600	500-900	400-700
Uobičajeno radno naprezanje	70	100-130	40
Normalni broj toplinskih ciklusa	$>5*10^3$	$>10^5$	$>10^4$
Youngov modul elastičnosti	80-100	28-83	5-20
Temperature transformacije promjene oblika	-200-200	-200-200	-200-150
Temperaturna histereza	20-40	2-50	5-20
Maksimalni jednosmjerni efekt prisjetljivosti oblika	6	7	4
Uobičajeni dvosmjerni efekt prisjetljivosti oblika	1	3,2	0,8
Maksimalna temperatura pregrijavanja	300	400	150
Kapacitet prigušenja vibracija	10-20	15-20	30-85

Veličina zrna	25-100	1-100	50-150
Taljenje, lijevanje, kontrola sastava	Prihvatljivo	Teško	Prihvatljivo
Oblikovanje	Teško	Teško	Lako
Hladna deformacija	Vrlo teško	Prihvatljivo	Ograničeno
Strojna obrada	Dobra	Teška	Vrlo dobra
Korozijska otpornost	Dobra	Izvrsna	Prihvatljivo
Biološka kompatibilnost	Loša	Izvrsna	Loša
Omjer troškova	1,5-20	10-100	1-10

2.3. Primjena legura s prisjetljivosti oblika

U strojarskoj industriji legure s prisjetljivosti oblika primjenju se kako bi osigurale mehaničke i temperaturne promjene na elektromehaničkim upravljačkim sustavima za hidraulične spojeve, za opruge, motore itd. Također koriste se kao regulatori temperature, uređaji za otvaranje i zatvaranje staklenika u poljoprivredi, koriste se kao cijevne spojnice, šipke za mostove koje imaju veliku važnost u prigušivanju vibracija kako ne bi došlo do pucanja betona od vanjskih vibracija. Legure s prisjetljivosti oblika imaju svojstvo i umanjivanja vibracija stoga se upotrebljava u graditeljstvu i mostogradnji. Legure s prisjetljivosti oblika koriste se u elektroindustriji za brtvljenje električne opreme, proizvodnju antena za mobilne uređaje, prekidače, sigurnosne ventile te električne spojnice. Sve je veća upotreba SMA legura u proizvodnji medicinskih uređaja i opreme kao što su nosači, žice i filteri. Medicinski materijali, odnosno metalni implantati smatraju se najvažnijim područjem primjene ovih materijala (implantati u kirurgiji, ortopediji, urologiji i kardiologiji). Legure s prisjetljivosti oblika također se primjenjuju u stomatologiji. Nekoliko primjera gotovih proizvoda načinjenih od legura s prisjetljivosti oblika prikazano je na slici 7 [15].

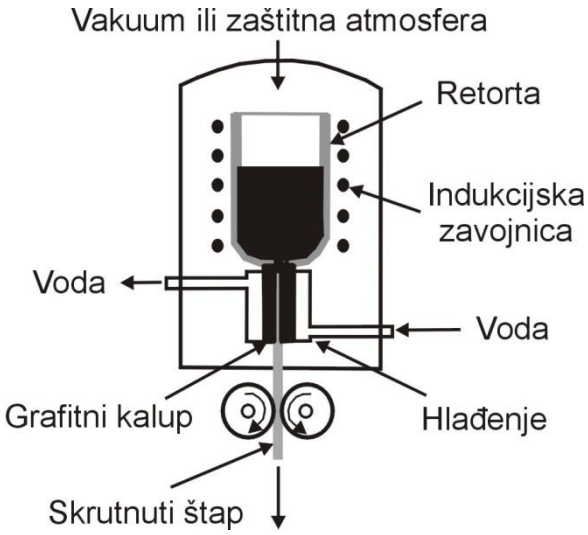
Legure NiTi koriste se u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, a za to je zaslužen visok efekt prisjetljivosti oblika, dobra mehanička svojstva, korozijska otpornost, biofunkcionalnosti i ostala svojstva. Legure NiTi koristite se u izradi mikrocrpki, mikrovalova, mikrozrcala itd. Legure CuAlNi upotrebljavaju se kao konektori za mikroelektrične čipove. Dok se legure na bazi željeza, zbog svog jedinstvenog svojstva magnetske inducirane deformacije, koristi za izradu senzora ili magnetskih aktuatora [16].

Slika 7. Proizvodi na bazi legura s prisjetljivosti oblika [13]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Lijevanje CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika

Legura kemijskog sastava Cu - 12,8 Al – 4,1 Ni (mas. %) s prisjetljivosti oblika dobivena je taljenjem tehnički čistih elemenata (bakar, aluminij, nikal). Taljenje se provodilo u vakuum indukcijskoj peći u zaštitnoj atmosferi argona na Strojarskom fakultetu Sveučilišta u Mariboru, Slovenija. Peć za taljenje spojena je s uređajem za vertikalno kontinuirano lijevanje. Vakuum indukcijska peć i postupak kontinuiranog lijevanja prikazani su na slici 8 Temperatura taljenja legure iznosila je 1230˚C. Rastaljena talina skrućuje u kristalizatoru potom kroz valjke izlazi odljevak u obliku štapa debljine 8 mm (slika 9).

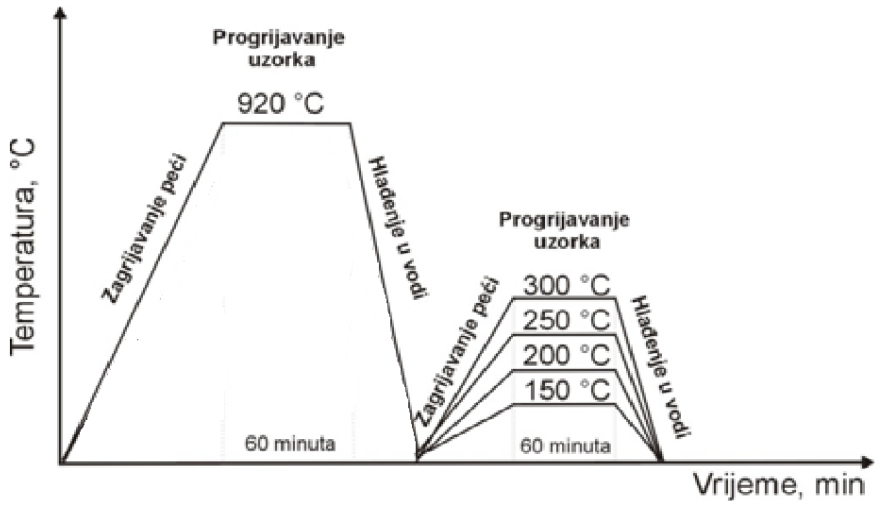


Slika 8. Shematski prikaz lijevanja CuAlNi legure tehnologijom vertikalnog lijevanja [12]

Slika 9. Fotografski snimak lijevane šipke CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika

3.2. Toplinska obrada CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika

Postupak kaljenja i popuštanja provoden je u komornim elektrootpornim pećima na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Legura je zagrijavana na temperaturu od 920 °C, zadržana na zadanoj temperauri 60 minuta i potom uronjena u vodu sobne temperature. Nakon žarenja slijedio je postupak popuštanja na četiri različite temperature 150 °C, 200 °C, 250 °C i 300 °C uz zadržavanje na zadanoj temperaturi u trajanju od 60 minuta uz naglo hlađenje u vodi sobne temperature. Shematski prikaz toplinske obrade CuAlNi legure prikazan je na slici 10. U tablici 2 prikazane su oznake uzoraka i pripadajući parametri toplinske obrade za svaki pojedini uzorak.



Slika 10. Shematski prikaz provedenog postupka toplinske obrade CuAlNi legura s prisjetljivosti oblika

Tablica 2. Oznake uzoraka i pripadajući parametri toplinske obrade ispitivane CuAlNi legure

Oznaka uzorka	Parametri toplinske obrade CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika
K-3	Kaljeno stanje (920 °C/60'/H_2O)
K-3-1	Kaljeno stanje (920 °C/60'/H_2O) i popušteno stanje (150 °C/60'/H_2O)
K-3-2	Kaljeno stanje (920 °C/60'/H_2O) i popušteno stanje (200 °C/60'/H_2O)
K-3-3	Kaljeno stanje (920 °C/60'/H_2O) i popušteno stanje (250 °C/60'/H_2O)
K-3-4	Kaljeno stanje (920 °C/60'/H_2O) i popušteno stanje (300 °C/60'/H_2O)

3.3. Metalografska priprema CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika

Dobivena šipka promjera 8 mm odrezana je na duljinu od 10 mm te je uložena u provodljivu masu (Conductomet) postupkom vrućeg ulaganja uzoraka na uređaju SimpliMet 1000 tvrtke Buechler.
Nakon ulaganja u masu slijedi daljnji postupak pripreme koji se sastoji od brušenja uzoraka na brusnim papirima različite gradacije od 240 do 800, potom poliranja s vodenom otopinom

0,3 μm Al_2O_3 te nagrizanja u otopini koja se sastoji od 2,5 g $FeCl_3$, 10 ml HCl i 48 ml metanola, kako bi se istaknule granice zrna i pojedinih mikrostrukturnih konstituenata.

3.4. Mikroskopija CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika

Mikrostrukturna karakterizacija CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika provedena je metodama svjetlosne mikroskopije (SM) i pretražne elektronske mikroskopije (SEM).

3.4.1. Svjetlosna mikroskopija

Svjetlosna mikroskopija je istraživačka metoda koja za dobivanje povećane slike predmeta koristi vidljivom svjetlošću i sustavom leća. Svjetlosna mikroskopija provedena je na OLYMPUS GX 51 svjetlosnom mikroskopu s digitalnom kamerom pri povećanjima 50x, 100x, 200x i 500x koji je prikazan na slici 11.

Slika 11. Mikroskop Olympus GX 51

3.4.2. Pretražna elektronska mikroskopija

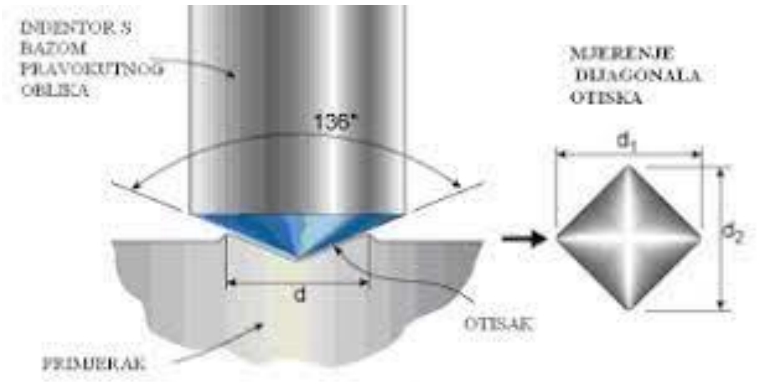
Nakon svjetlosne mikroskopije provedena je pretražna elektronska mikroskopija (SEM) na pretražnom elektronskom mikroskopu TESCAN VEGA TS 5136 MM (slika 12) pri povećanjima 500x, 1000x, 2000x, 3000x, 5000x i 10000x.

Slika 12. Pretražni elektronski mikroskop TESCAN VEGA 5136 MM

3.5. Ispitivanje tvrdoće CuAlNi legura

Tvrdoća je svojstvo protivljenja materijala zadiranju u njegovu površinu. Tvrdoću možemo još definirati i kao protivljenje materijala plastičnoj deformaciji [12].

Ispitivanje tvrdoće uzoraka provedeno je Vickersovom metodom (shematski prikazana na slici 13) pri sili utiskivanja indentora od 9,804 N u trajanju od 10 sekundi na tvrdomjeru Leica VHMT (slika 14). Na temelju tri mjerenja izračunata je srednja vrijednost tvrdoće ispitivanih uzoraka. Mjerenjem dijagonala otiska dobivena je vrijednost tvrdoće uzoraka prije i nakon toplinske obrade (kaljenja i popuštanja).



Slika 13. Vickersova metoda određivanja tvrdoće [17]

Slika 14. Tvrdomjer Leica VHMT

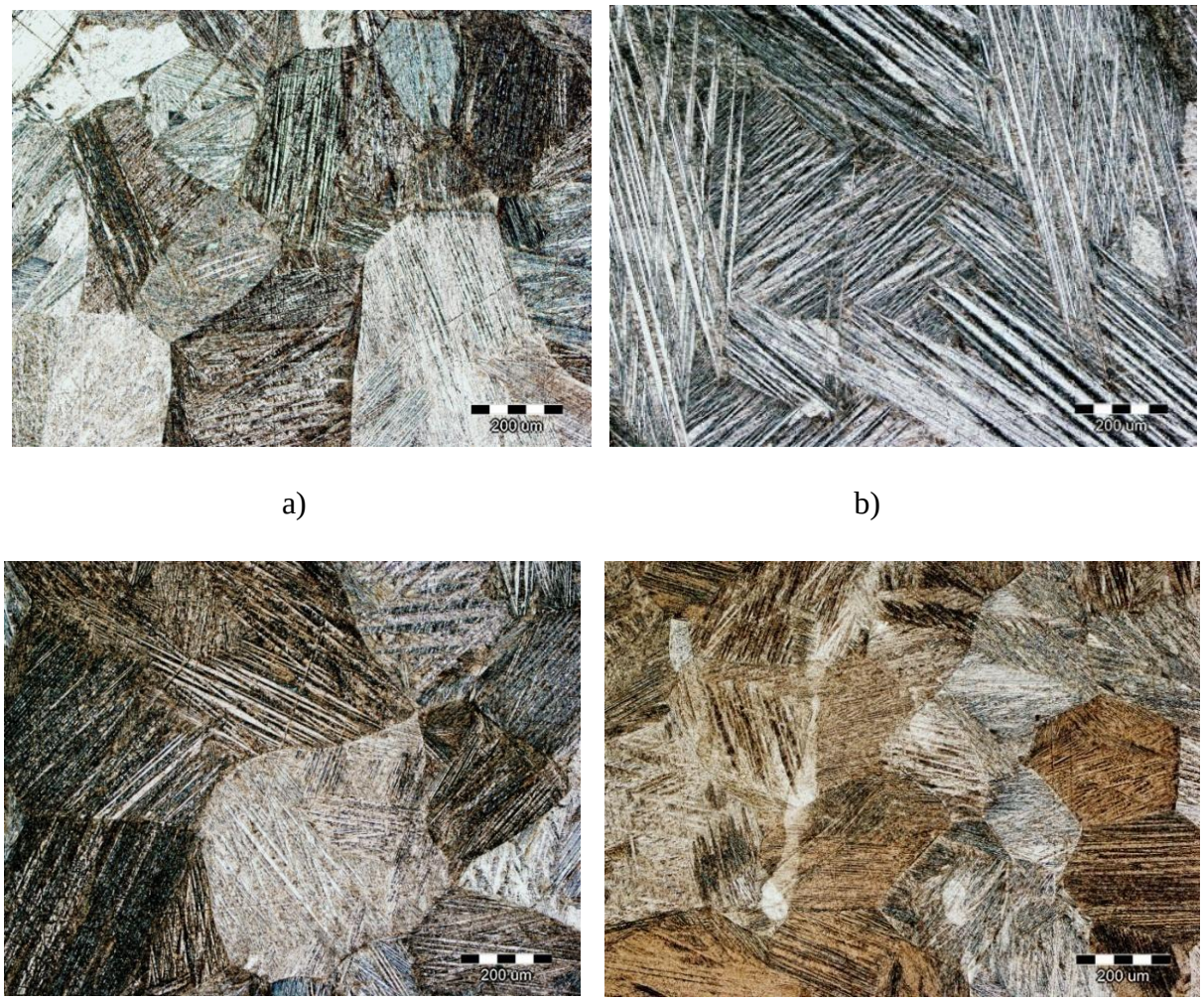
4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Utjecaj temperature popuštanja na mikrostrukturu CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika

Mikrostrukturna karakterizacija ispitivane CuAlNi legura s prisjetljivosti oblika provedena je svjetlosnom mikroskopijom (slika 15 i 16) te pretražnom elektronskom mikroskopijom (slike 17 i 18).

Svjetlosnom mikroskopijom utvrđena je postojanost martenzitne mikrostrukture na svim ispitivanim uzorcima (slike 15 i 16). Budući da je martenzitna faza odgovorna za prisustvo efekta prisjetljivosti oblika kod ovih legura, iznimno je važno provesti provesti odgovarajući postupak toplinske obrade. Poznato je da je otapajuće žarenje u β-faznom području te kaljenje u vodi neizbježan postupak toplinske obrade za ove legure [15]. No nedostatak koji se javlja tijekom toplinske obrade je porast zrna koji je zamjećen nakon popuštanja, posebice na temperaturama 200 °C i 250 °C (slike 16b i 16c). Porast zrna nepovoljno utječe na svojstva legure, uzrokujući krhkost i povećavajući sklonost prema interkristalnom lomu. Ujedno, otežava plastičnu obradu legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra [18].

Slika 15. Svjetlosna mikrografija kaljene CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika, 920 °C/60'/H_2O, povećanje 100x



a) b)

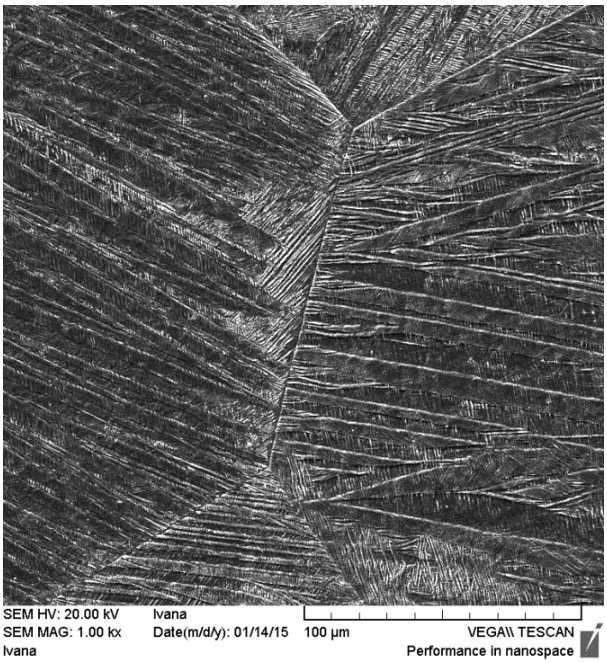
c) d)

Slika 16. Svjetlosna mikrografije CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika nakon kaljenja na 920 °C/60'/voda i popuštanja: 150 °C/60'/ H_2O (a), 200 °C/60'/ H_2O (b), 250 °C/60'/ H_2O (c) i 300 °C/60'/ H_2O (d); povećanje 100x

Primarno samoprilagođavajuća igličasta morfologija martenzita može se zamijetiti na mikrografijama dobivenim pretražnom elektronskom mikroskopijom. Na pojedinim uzorcima slika 17 i 18 nakon provedene toplinske obrade kaljenjem (slika 17) i popuštanjem (slika 18c) može se zamijetiti V-oblik martenzita. Dobivena morfologija zamijećenog martenzita karakteristična je za β_1' martenzit u CuAlNi leguri s prisjetljivosti oblika [18].

Iz literature [19] je poznato da CuAlNi legura prolazi određene transformacije iz austenitne β-faze u martenzitnu β_1' ili γ_1' fazu. Koja će martenzitna faza nastati ovisi prije svega o kemijskom sastavu legure te o primjenjenom postupku toplinske obrade.

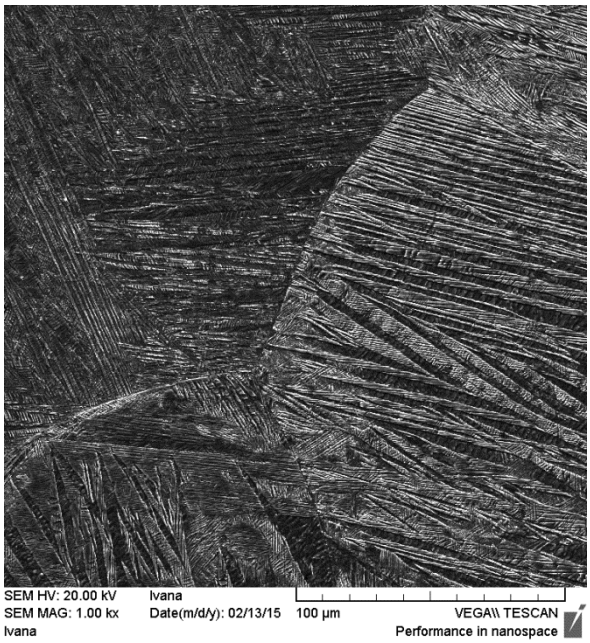
Povećanjem sadržaja aluminija (iznad 13 mas. %) u mikrostrukturi se pretežno može zamijetiti γ_1'martenzit. Pri sadržaju aluminija između 11 – 13 mas. % prevladava β_1'martenzit u mikrostrukturi [20].



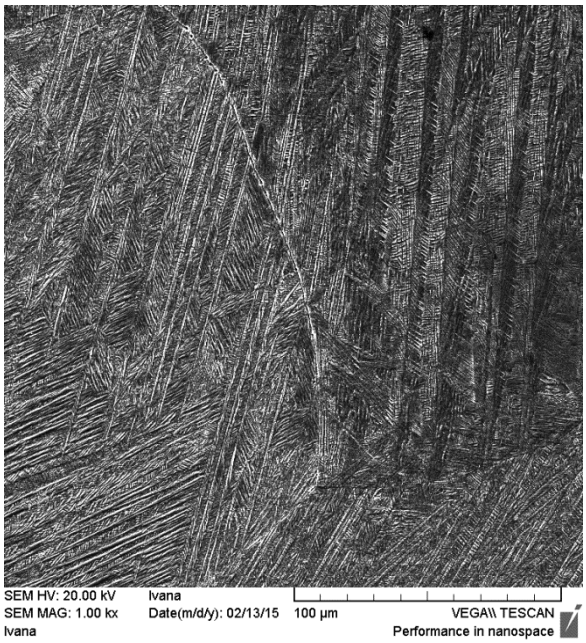
Slika 17. SEM mikrografija kaljene CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika, 920 °C/60'/H_2O

a)

b)



c)



d)

Slika 18. SEM mikrografije CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika nakon kaljenja na 920 °C/60'/voda i popuštanja: 150 °C/60'/ H_2O (a), 200 °C/60'/ H_2O (b), 250 °C/60'/ H_2O (c) i 300 °C/60'/ H_2O (d)

4.2. Utjecaj temperature popuštanja na tvrdoću CuAlNi legura s prisjetljivosti oblika

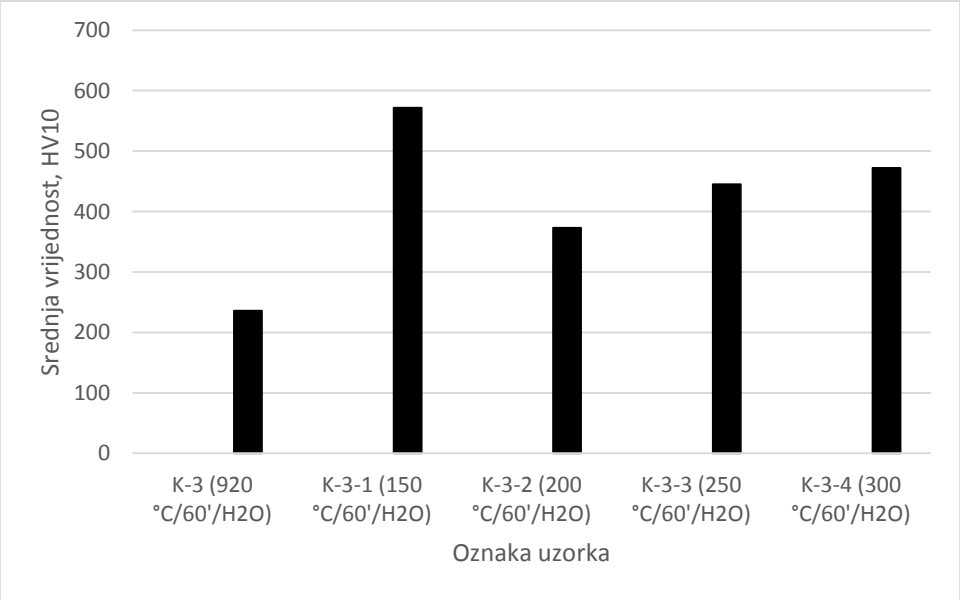
U tablici 3 prikazane su izmjerene vrijednosti uz izračunatu srednju vrijednosti tvrdoće za ispitivane CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika nakon kaljenja i popuštanja, a na slici 19 prikazana je ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće u odnosu na postupak toplinske obrade. Iz dobivenih rezulata može se zamijeniti značajan porast tvrdoće uzorka nakon popuštanja, tj. vrijednosti HV10 s porastom temperature popuštanja iznose redom 571,7 HV10 (za 150 °C); 373,3 HV10 (za 200 °C); 445,0 HV10 (za 250 °C) i 472,1 HV10 (za 300 °C)) u odnosu na uzorak kaljenog stanja (235,7 HV10).

Može se zaključiti da kaljenje na 920 °C/60′ voda povoljno utječe na tvrdoću legure, no negativan utjecaj ima postupak popuštanja nakon kaljenja.

Vidljivi značajan porast tvrdoće nakon popuštanja može se objasniti izrazitim porastom zrna unutar mikrostrukture. Ujedno prema lieraturi [18, 19] legure s prisjetljivosti oblika imaju tendenciju porasta tvrdoće nakon toplinske obrade.

Tablica 3. Tvrdoća ispitanih uzoraka CuAlNi legure s prisjetljivosti

Oznaka uzorka	Izmjerene vrijednosti, HV10	Srednja vrijednost, HV10
K-3 (920 °C/60'/H_2O)	253	235,7
	229	
	225	
K-3-1 (150 °C/60'/H_2O)	610	571,7
	580	
	525	
K-3-2 (200 °C/60'/H_2O)	375	373,3
	367	
	378	
K-3-3 (250 °C/60'/H_2O)	434	445,0
	443	
	458	
K-3-4 (300 °C/60'/H_2O)	490	472,1
	466	
	459	



Slika 19. Grafički prikaz promjene tvrdoće u ovisnosti o postupku toplinske obrade

5. ZAKLJUČAK

Provedena su ispitivanja utjecaja temperature popuštanja na mikrostrukturu i tvrdoću CuAlNi kemijskog sastava Cu - 12,8 Al – 4,1 Ni (mas. %) legure s prisjetljivosti oblika te se može zaključiti sljedeće:

- Postupkom vertikalnog kontinuiranog lijevanja dobivena je Cu - 12,8 Al – 4,1 mas. % Ni legura s prisjetljivosti oblika u obliku štapa debljine 8 mm.

- Mikrostrukturnom karakterizacijom svjetlosnim mikroskopom zamijećena je martenzitna mikrostruktura u svim ispitivanim uzorcima. Ujedno je vidljiv značajan porast zrna u mikrostrukturi na temperaturama popuštanja 200 °C i 250 °C koji ima utjecaj na svojstva legure povećavajući njezinu krhkost te sklonost prema interkristalnom lomu.

- Pretražnim elektronskim mikroskopom utvrđeno je postojanje samoprilagođavajućeg martenzita pretežno igličaste morfologije u mikrostrukturi. Na pojedinim mjestima vidljiv je i V oblik martenzita koji je karakterističan za β_1' martenzit.

- Tvrdoća CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika uvelike ovisi o postupku toplinske obrade. Može se zaključiti da tvrdoća legure nakon popuštanja značajno raste u odnosu na kaljeno stanje za koje je iznosila 235,7 HV10. Nakon popuštanja na 150 °C/60'/voda tvrdoća legure iznosila je 571,7 HV10; na 200 °C/60'/voda iznosila je 373,3 HV10; na 250 °C/60'/voda iznosila je 445,0 HV10 i na 300 C/60'/voda iznosila je 472,1 HV10.

LITERATURA

[1] O. Kastner, First Principles Modelling of Shape Memory Alloys Molecular Dynamics Simulations, Springer, Bochum, Germany, 2012.
[2] S. Miyazaki, Y. Qing Fu, W. Min Huang, Thin Film Shape Memory Alloys Fundamentals and Device Applications, Cambridge University Press, UK, 2009.
[3] J. Mohd Jani, M. Leary, A. Subic, Mark A. Gibson, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, Materials and Design 56 (2014), 1078 – 1113.
[4] C. Lexcellent, Shape–memory Alloys Handbook, John Wiley&Sons Inc., Hobogen, 2013, 11 – 47.
[5] K. K. Alaneme, E. A. Okotete, Reconciling viability and cost–effective shape memory alloy options – A review of copper and iron based shape memory metallic systems, Engineering Science and Technology, an International Journal 19 (2016), 3; 1582 – 1592.
[6] I. Ivanić, M. Gojić, S. Kožuh, Legure s prisjetljivosti oblika (II. dio): podjela, proizvodnja i primjena, Kemija u industriji 63 (2014), 9 – 10; 331 – 344.
[7] D. C. Lagoudas, Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications, Springer, Texas, USA, 2008.
[8] K. Yamauchi, I. Ohkata, K. Tsuchiya, S. Miyazaki, Shape Memory and Superelastic Alloys Technologies and Applications, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2011.
[9] M. Gojić, Legure s efektom memorije oblika, Metalurgija 31 (1992) 2/3; 77 – 82.
[10] I. Ivanić, M. Gojić, S. Kožuh, Legure s prisjetljivosti oblika (I. dio): najznačajnija svojstva, Kemija u industriji 63 (2014), 9 – 10; 323 – 329.
[11] http://www.issp.ac.ru/ebooks/books/open/Shape_Memory_Alloys.pdf (19.07.2022.)
[12] I. Ivanić, Utjecaj tolinske obrade na mikrostrukturu i svojstva CuAlMn legure s prisjetljivosti oblika, doktorski rad, Metalurški fakultet, Sisak, 2017.
[13] Y.Q. Jiao, Y.H. Wen, N. Li, J.Q. He, J. Teng, Effect of solution treatment on damping capacity and shape memory effect of a CuAlMn alloy, Journal of Alloys and Compounds 491 (2010), 627 – 630.
[14] I. Škrinjarić, Utjecaj toplinske obrade na mehanička svojstva CuAlMn legure s prisjetljivosti oblika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški Fakultet, Sisak, 2017.
[15] Y. Sutou, N. Koeda, T. Omori, R. Kainuma, K. Ishida, Effects of aging on stress–induced martensitic transformation in ductile CuAlMn – based shape memory alloys, Acta Materialia 57 (2009), 19; 5759 – 5770.
[16] U.S. Mallik, V. Sampath, Effect of composition and ageing on damping characteristics of Cu – Al – Mn shape memory alloys, Materials Science and Engineering 478 (2008), 1 – 2; 48 – 55.
[17] E. Patoor, D. C. Lagoudas, P. B. Entchev, L. C. Brinson, X. Gao, Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals, Mechanics of Materials 38 (2006) 391-429.
[18] W. H. Zou, H. Y. Peng, R.Wang, J. Gui, D. Z. Yang, Heating effects on fine structure of a Cu-Al-Ni-Mn-Ti shape memory alloy, Acta Metallurgia Materialia 43 (1995) 8, 3009-3016.
[19] U.S. Mallik, V. Sampath, Influence of aluminum and manganese concentration on the shape memory characteristics of Cu – Al – Mn shape memory alloys, Journal of Alloys and Compounds 459 (2008), 1 – 2; 142 – 147.
[20] U.S. Mallik, V. Sampath, Effect of alloying on microstructure and shape memory characteristics of Cu-Al-Mn shape memory alloys, Materials Science and Engineering A 481-482 (2008), 680-683.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI
Ime i prezime: Tomislav Polak
Datum i mjesto rođenja: 18.03.2000., Sisak
Adresa: Šartovačko brdo 19, Šartovac, Kutina 44320
Telefon: 095-521-4296
E-mail: tomo.polakk@gmail.com

OBRAZOVANJE
2006. - 2010. Područna škola Mate Lovraka Kutinska Slatina
2011. – 2014. Osnova škola Mate Lovraka Kutina
2014. – 2018. Nadbijskupska klasična gimnazija s pravom javnosti, Voćarska 103, 10000 Zagreb
2018. – 2022. Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgije, smijer Metalurški inženjerstvo

OSOBNE VJEŠTINE
Poznavanje i rad na računalu
Strani jezici: Engleski jezik – razina B1
Njemački jezik – razina A2
Vozački ispit B-kategorije

RADNO ISKUSTVO
2019. - rad u ljevaonici Almos u trajanju od 4 mjeseca
2021.-2022. - rad u pomoćnom skladištu Pevex Kutina u trajanju od 8 mjeseci