

Praćenje faznih transformacija u metalnim legurama na bazi bakra

Dumenčić, Daniela

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:139763>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Daniela Dumenčić

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Daniela Dumenčić

PRAĆENJE FAZNIH TRANSFORMACIJA U METALNIM LEGURAMA
NA BAZI BAKRA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv.prof.dr.sc. Tamara Holjevac Grgurić

Članovi povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

1. prof.dr.sc. Stjepan Kožuh, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - predsjednik
2. izv.prof.dr.sc. Tamara Holjevac Grgurić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - članica
3. izv.prof.dr.sc. Ivan Brnardić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - član
4. doc.dr.sc. Ivana Ivanić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – zamjenska članica

Sisak, rujan 2020.

Zahvaljujem se svojoj voditeljici rada, izv.prof.dr.sc. Tamar Holjevac Grgurić koja mi je pružila priliku i omogućila izradu završnog rada, kao i na svim kvalitetnim i stručnim savjetima i prijedlozima te pomoći pri pronalasku odgovarajuće literature. Želim se zahvaliti i svim nastavnicima Metalurškog fakulteta na trudu, kvalitetnoj suradnji i stečenim znanjima.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na potpori i ohrabrirvanju tijekom života i dosadašnjeg studiranja. Veliko hvala i svim mojim prijateljima koji su uvijek vjerovali u mene i bili mi svakodnevna podrška.

Ovaj rad je vezan uz istraživanja u okviru institucijskog projekta *“Istraživanje inovativnih metalnih mikro-/nanomaterijala”*.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: Daniela
PREZIME: Dumenčić
MATIČNI BROJ: BE - 3646 | 17

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:

Pracjenje faznih transformacija u metalnim
legurama na bazi bakra

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

Sisak, 17. 09. 2020.

Daniela
(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.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

◆ FAKULTETSKO VIJEĆE ◆

KLASA: 602-04/20-04/14

URBROJ: 2176-78/20-04-107

Sisak, 15. srpnja 2020.

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 10. redovitoj sjednici od 15. srpnja 2020. 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.

Studentici preddiplomskog sveučilišnog studija *Metalurgija* smjer *Industrijska ekologija* **DANIELI DUMENČIĆ** (BE-3646/17) za voditeljicu završnog rada pod naslovom "Praćenje faznih transformacija u metalnim legurama na bazi bakra" ("Phase Transformations in Cu-based Alloys") imenuje se **izv.prof.dr.sc. Tamara Holjevac Grgurić**.

II.

Studentici 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. izv.prof.dr.sc. Tamara Holjevac Grgurić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – članica,
3. izv.prof.dr.sc. Ivan Brnardić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – član,
4. doc.dr.sc. Ivana Ivanić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – zamjenska članica.

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.

Obnašateljica dužnosti dekana
Metalurškog fakulteta

izv.prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac

Dostavljeno:

- 1 x Daniela Dumenčić
- 4 x voditelj, 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

SAŽETAK:

Legure s prisjetljivosti oblika (SMA) karakteriziraju dva bitna efekta, pseudoelastičnost i efekt prisjetljivosti oblika, koji su posljedica austenitno-martenzitne fazne transformacije. Općenito, efekt prisjetljivosti oblika označava sposobnost materijala da se uslijed djelovanja temperature ili mehaničkog naprezanja vraća u svoj prethodno definirani oblik. Temperatura transformacije SMA legura određuje područje primjene ovih materijala te se variranjem udjela komponenti u leguri može korigirati temperatura transformacije, kao i dizajnirati finalna svojstva materijala za specifična područja primjene. Mikrostrukturna ispitivanja, kojima se prati razvoj martenzita, provode se svjetlosnom mikroskopijom (OM) ili skenirajućom elektronskom mikroskopijom (SEM). Kako bi se ispitala toplinska svojstva SMA legura i odredile temperature transformacije, koriste se metode toplinske analize poput diferencijalne pretražne kalorimetrije (DSC), dilatometrije (DIL) te dinamičko-mehaničke analize (DMA).

Ključne riječi: legure s prisjetljivosti oblika, Cu-SMA legure, martenzitna transformacija, DSC analiza, mikrostruktura

SUMMARY:

PHASE TRANSFORMATIONS IN Cu-BASED ALLOYS

Shape memory alloys (SMA) show two unique effects, pseudoelasticity and shape memory effect, which are consequence of austenitic-martensitic phase transformations. Shape memory effect describes the effect of restoring the original shape under thermal changes or plastic deformation. Martensitic transformation temperatures define application area of SMA alloys, and it is strongly influenced by chemical composition of SMA alloys as well as final properties of material. Microstructure investigations and martensitic formation can be followed by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). Thermal properties and transformation temperatures can be determined by thermal analysis techniques, such as differential scanning calorimetry (DSC), dilatometry (DIL) and dynamic-mechanical analysis (DMA).

Keywords: shape memory alloys, Cu-SMA alloys, martensitic transformation, DSC analysis, microstructure

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Legure na bazi bakra.....	2
2.2. Legure s efektom prisjetljivosti oblika	4
2.2.1. Martenzitna transformacija	4
2.2.2. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra	8
2.3. Karakterizacija SMA legura	12
2.3.1. Mikrostrukturalna ispitivanja.....	12
2.3.1.1. Svjetlosna mikroskopija (OM)	12
2.3.1.2. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM).....	13
2.3.2. Ispitivanje toplinskih svojstava SMA legura	15
2.3.2.1. Diferencijalna pretražna kalorimetrija (DSC)	15
2.3.2.2. Dilatometrija (DIL)	16
2.3.2.3. Dinamičko – mehanička analiza (DMA).....	17
2.3.2.4. Ispitivanje tvrdoće SMA legura	19
3. ZAKLJUČAK	21
4. LITERATURA	22
POPIS SLIKA:	25
POPIS TABLICA:.....	26
POPIS OZNAKA:	27
ŽIVOTOPIS:	28

1. UVOD

Razvoj tehnologije intenzivno se kreće u smjeru pametnih sustava, uređaja s multifunkcionalnim svojstvima, što podrazumijeva razvoj inovativnih „pametnih“ materijala. Razvoj proizvoda, primjerice aktuatora, senzora, mikro-kontrolera i dr. zahtjeva primjenu materijala veće funkcionalnosti, uz istovremeno manju masu proizvoda, kraće vrijeme odziva, jednostavnije procesiranje te nisku cijenu koštanja [1]. Veliku primjenu u elektroničkim uređajima, avio i automobilske industriji, robotici i bioinženjerstvu imaju legure s prisjetljivosti oblika (SMA).

SMA legure karakteriziraju specifična i jedinstvena svojstva, efekt prisjetljivosti oblika (SE) i pseudoelastičnost (PE) [2]. Efekt prisjetljivosti oblika predstavlja sposobnost legura da se vraćaju u svoj prvobitni oblik pod utjecajem temperature ili mehaničkog naprezanja. Kako bi uopće došlo do efekta prisjetljivosti oblika, u legurama se odvija fazna transformacija između austenita i martenzita. Martenzitna transformacija je povratni kristalografski reorijentacijski proces između austenitne i martenzitne transformacije, pri čemu dolazi do transformacije iz uređene kubične kristalne strukture u manje uređenu heksagonalnu, ortorombičnu ili monoklitičku strukturu [1].

Danas postoji velik broj legura s prisjetljivosti oblika, a najvažnije od njih su legure na bazi nikla, zatim legure na bazi bakra, legure na bazi željeza te legure s prisjetljivosti oblika na bazi plemenitih metala [3]. Najšira uporaba je nitinol legure, NiTi, s obzirom na vrlo dobra mehanička svojstva te svojstvo biokompatibilnosti, što joj omogućuje primjenu kao stenta te u dentalnoj medicini. Legure na bazi bakra predstavljaju dobru zamjenu za nitinol, obzirom na izrazito visoku cijenu nitinola te se Cu-SMA legure sve više koriste u inženjerskoj primjeni, uslijed njihovih odličnih mehaničkih svojstava, visoke električne i toplinske vodljivosti te niske cijene proizvodnje [4]. Međutim, dio Cu-SMA legura pokazuju krtoš i lošu obradivost, primjerice Cu-Al-Ni i Cu-Zn-Al, koje se najduže komercijalno koriste. U posljednje vrijeme znatno više se istražuju Cu-Al-Mn i Cu-Al-Mn-Ni legure, kao i visokotemperaturne Cu-Al-Ag i Cu-Al-Be SMA legure [5].

Za područje primjene SMA materijala ključne su temperature martenzitne transformacije te je stoga bitno poznavati tehnike praćenja promjena u mikrostrukturi SMA legura, kao i tehnike određivanja toplinskih svojstava, odnosno određivanja temperatura martenzitne i austenitne transformacije u SMA legurama. Stoga je u ovom radu, uz pregled SMA legura, također dan i pregled osnovnih tehnika karakterizacije mikrostrukture materijala, svjetlosne mikroskopije (OM) i skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM), kao i tehnika toplinske analize: diferencijalne pretražne kalorimetrije (DSC), dilatometrije (DIL) i dinamičko-mehaničke analize (DMA).

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Legure na bazi bakra

Bakar i njegove legure, općenito se odlikuju srednjom čvrstoćom, dobro se lijevaju, lako obrađuju toplom i hladnom deformacijom te su pogodne za proizvodnju raznih proizvoda poput limova, cijevi, šipki, traka, žica i dr. Hladnom deformacijom materijali postaju čvršći i tvrdi što je u većini slučajeva važan uvjet za gotovi proizvod. Legure bakra se odlično prerađuju toplom deformacijom, odnosno toplim valjanjem i kovanjem i zbog toga su važni inženjerski materijali odličnih mehaničkih svojstava.

Podjela bakra i njegovih legura dijeli se prema kemijskom sastavu, a to su tehnički bakar, bakar s manjim dodacima, legure bakar-cink (mesinzi), legure bakra bez cinka (bronce), aluminijske bronce, silicijske bronce, berilijske bronce te legure bakar-mangan. Postoji više od 400 bakrenih legura, gdje se svaka odlikuje svojim specifičnim karakteristikama i koristi u mnogim proizvodnim procesima. Na slici 1 prikazan je mnogobrojni raspon legura na bazi bakra [6,7].

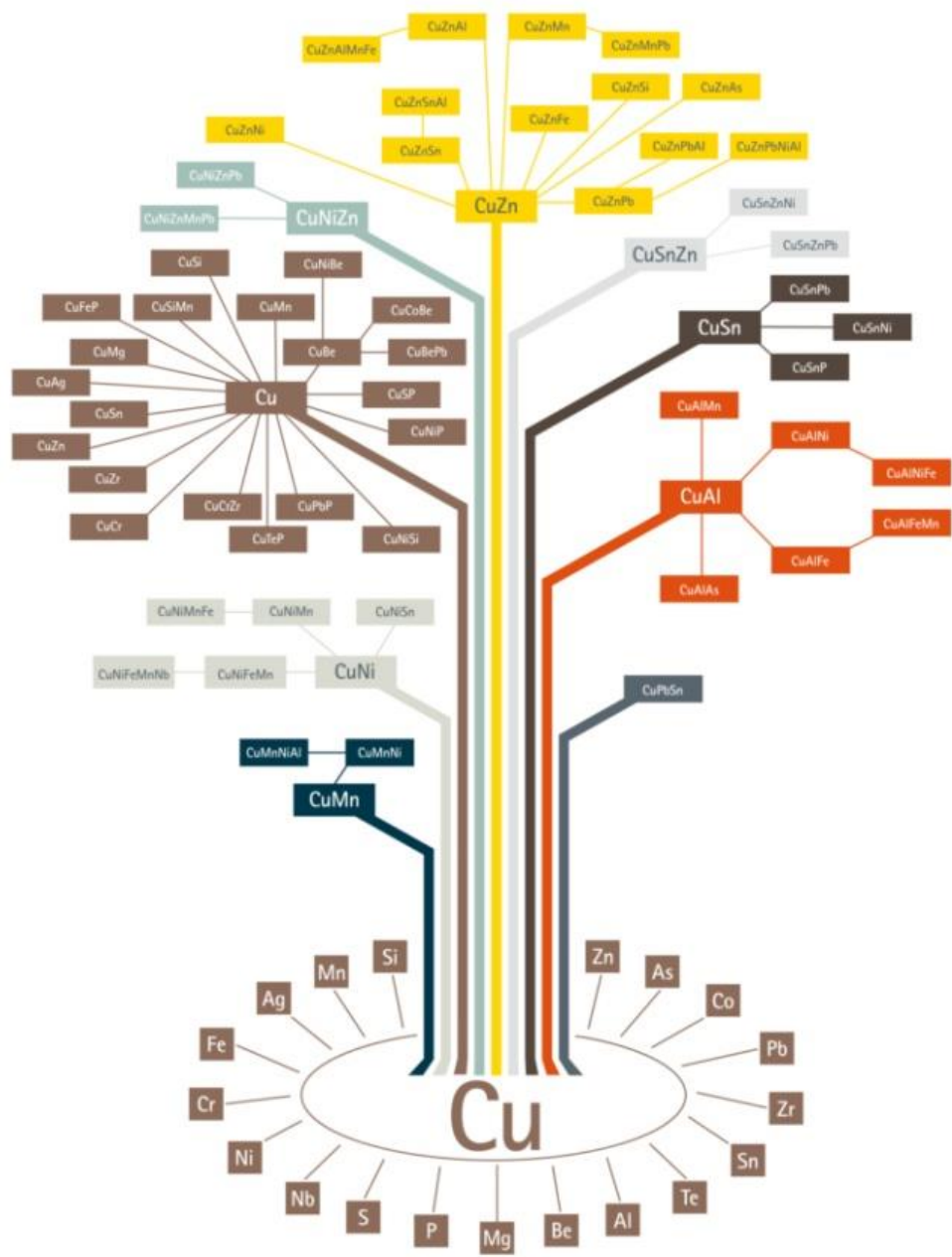
Bakar i njegove legure se prema klasifikaciji dijele na legure za gnječenje i legure za lijevanje [7].

Legure za gnječenje podijeljene su na [7]:

- C1xx – bakar s minimalno 99,3% ili više Cu te bakar sa sadržajem 96-99.3% Cu
- C2xx – legure bakar-cink (mesinzi)
- C3xx – legure bakar-cink-olovo
- C4xx – legure bakar-cink-kositar (kositar mesinzi)
- C5xx – legure bakar-kositar (fosforna bronca)
- C6xx – legure bakar-aluminij, legure bakar-silicij i razne legure bakar-cink
- C7xx – legure bakar-nikal i legure bakar-nikal-cink

Legure za lijevanje podijeljene su na [7]:

- C8xx – lijevani bakar, lijevani bakar visoke čistoće, lijevani mesinzi različitih vrsta, legure magnezij-bronca, legure bakar-cink-silicij
- C9xx – legure bakar-kositar, legure bakar-kositar-olovo, legure bakar-kositar-nikal, legure bakar-aluminij-željezo, legure bakar-nikal-željezo i legure bakar-nikal-cink



Slika 1. Podjela legura na bazi bakra [8]

2.2. Legure s efektom prisjetljivosti oblika

Zasebna grupa legura na bazi bakra sa specifičnim svojstvima su legure s prisjetljivosti oblika (SMA). Legure s prisjetljivosti oblika predstavljaju grupu materijala sa sposobnošću vraćanja u prethodni oblik, nakon izlaganja temperaturi ili mehaničkoj deformaciji [9]. Efekt prisjetljivosti oblika posljedica je promjene u kristalnoj strukturi uzrokovana internim naprezanjem na mikroskopskoj skali, ovisno o promjeni vanjskih uvjeta [10]. SMA materijali mogu se repetitivno vraćati u prethodni oblik unutar određenog temperaturnog intervala [11]. Karakterističnu transformaciju SMA legura karakteriziraju sljedeće temperature:

- A_s – temperatura početka austenitne fazne transformacije, °C
- A_f – temperatura završetka austenitne fazne transformacije, °C
- M_s – temperatura početka martenzitne fazne transformacije, °C
- M_f – temperatura završetka martenzitne fazne transformacije, °C

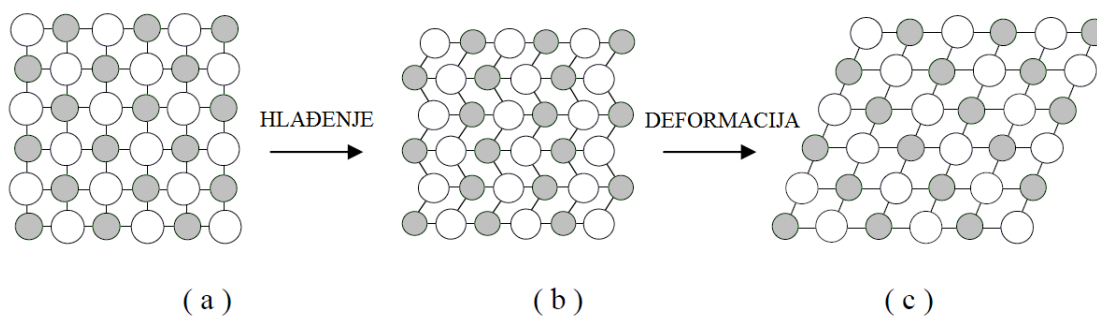
Legure s prisjetljivosti oblika mogu se podijeliti u nekoliko grupa, a to su [12]:

- legure na bazi nikla (Ni-Ti legure)
- legure na bazi bakra (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Mn, Cu-Al-Be, Cu-Al-Ag)
- legure na bazi željeza (Fe-Mn-Al, Fe-Mn-Si, Fe-Pt, Fe-Pd, Fe-Ni-C i Fe-Ni-Co-Ti)
- legure na bazi plemenitih metala (Pt-Fe, Pt-Al, Pt-Ga)
- ostale legure

Legura koja se najviše komercijalno koristi je legura Ni-Ti (nitinol), koja se ponajviše primjenjuje u biomedicini, uslijed svoje vrlo dobre biokompatibilnosti koja ju izdvaja u primjeni od ostalih SMA legura. Nitinol se također primjenjuje u elektroničkoj industriji, robotici itd. Nedostatak ove legure je izrazito visoka cijena proizvodnje te se stoga pokušavaju pronaći novi materijali, SMA legure koje bi ju mogle zamijeniti u određenim područjima primjene [12]. Bakar ima izvrsnu električnu i toplinsku provodljivost i te se Cu-SMA legure vrlo intenzivno istražuju u zadnjem desetljeću.

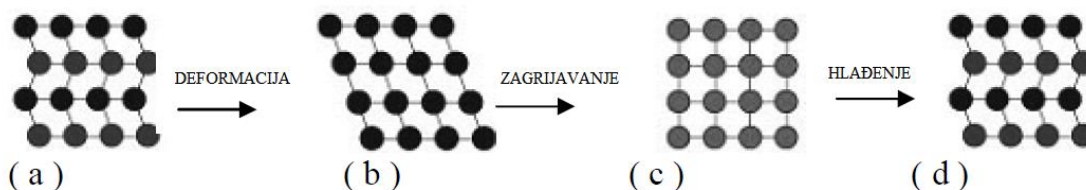
2.2.1. Martenzitna transformacija

Martenzitna transformacija je bezdifuzijska transformacija 1. reda, koja podrazumijeva povratni reorijentacijski proces između uređene kristalne strukture, austenita, i manje uređene kristalne strukture, martenzita [13]. Martenzitna struktura može postojati u različitim varijantama. Promjenom temperature tj. hlađenjem visokotemperaturna uređena faza prelazi u samoprilagođavajući martenzit, koji se uslijed deformacije reformira u naprezanjem induciran martenzit (slika 2) [10].

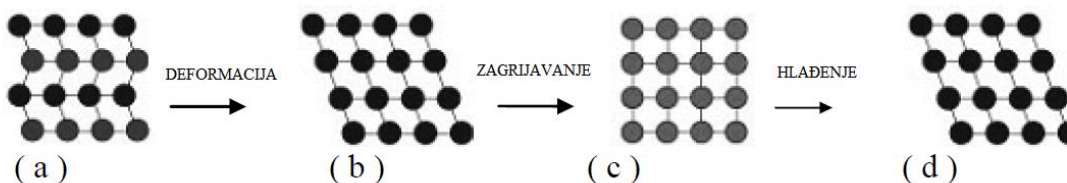


Slika 2. Shematski prikaz efekta prisjetljivosti oblika: a) struktura austenitne faze, b) samoprilagođavajući martenzit induciran promjenom temperature, c) martenzit induciran naprezanjem [10]

Jednosmjerni i dvosmjerni efekt prisjetljivosti oblika prikazani su na slikama 3 i 4. Kod jednosmjernog efekta prisjetljivosti oblika nakon hlađenja iz austenitne faze, martenzit se vraća u samoprilagođavajući martenzit (slika 3), dok se kod dvosmjernog efekta vraća u oblik naprezanjem induciranog martenzita (slika 4).



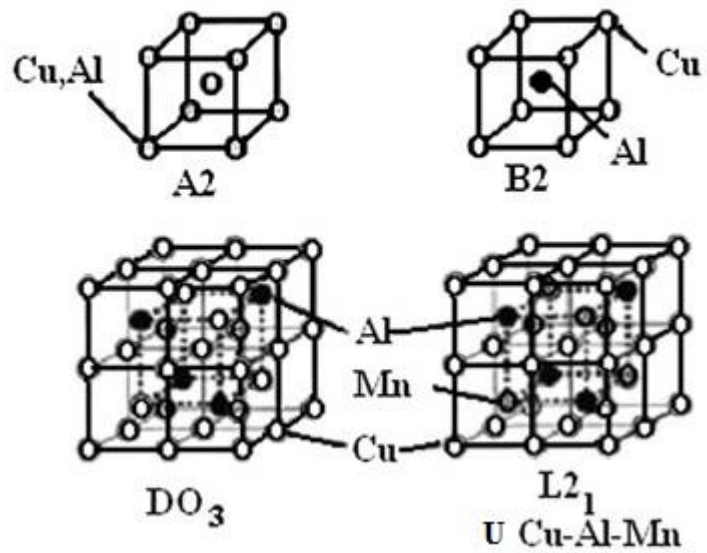
Slika 3. Prikaz jednosmjernog efekta prisjetljivosti oblika [10]



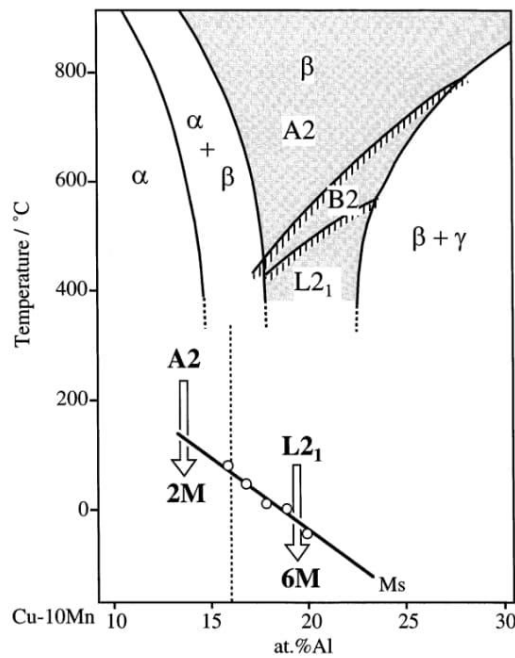
Slika 4. Prikaz dvosmjernog efekta prisjetljivosti oblika [10]

Hlađenjem iz austenitne faze, veće simetrije moguće je formirati različite varijante martenzita, odnosno martenzit ima identičnu kristalnu strukturu, ali različitu orijentaciju. Moguće su 24 varijante martenzita.

U legurama na bazi bakra, austenitna faza je β -faza, prostorno centrirane kubične strukture bcc. β -faza s A2 bcc strukturom prolazi kroz reakcije uređenja β (A2/bcc Cu) \rightarrow β_2 (B2/CuAl) \rightarrow β_1 (DO₃ (Cu₃Al) ili L2₁ (Cu₂MnAl)) (slika 5 i 6) [14]. Hlađenjem u ravnotežnim uvjetima, β -faza prolazi kroz eutektoidnu reakciju $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$, što se može spriječiti brzim hlađenjem. Pri tome β -faza prelazi u metastabilnu β' -fazu, 2M ili 6M kristalne strukture, ovisno o polaznoj strukturi.

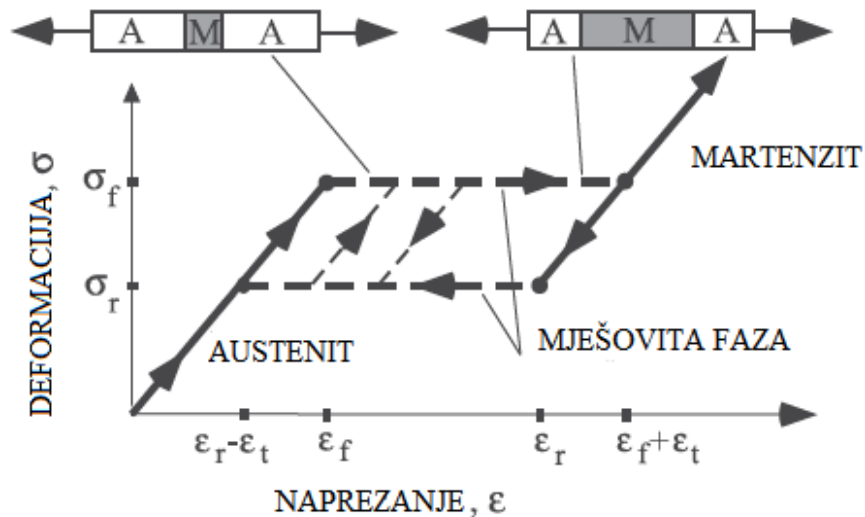


Slika 5. Kristalne strukture Cu-SMA legura [14]



Slika 6. Vertikalni presjek Cu-Al-Mn pri 10 at.% Mn [15]

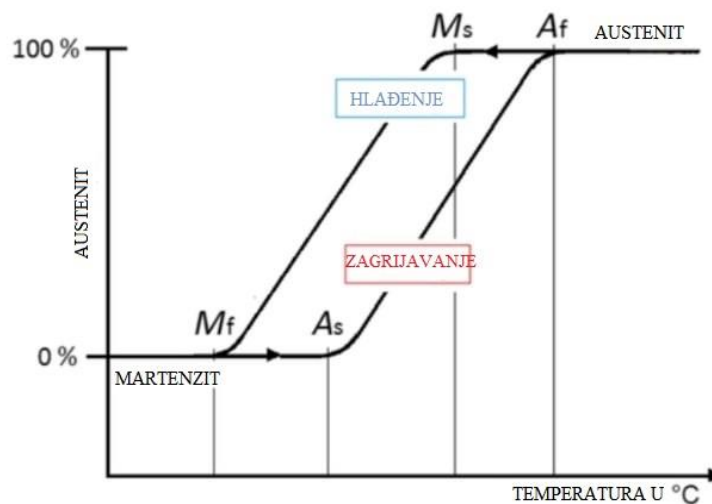
Pseudoelastičnost je izotermalni odgovor SMA legura deformiranju mehaničkom naprežanju, odnosno dolazi do nastajanja naprežanjem induciranog martenzita iz austenitne faze. Odvija se na temperaturama većim od temperature završetka austenitne transformacije (A_f) i maksimalne temperature na kojoj postoji naprežanjem inducirani martenzit.



Slika 7. Pseudoelastičnost SMA legura [16]

Prije napreznja SMA legura je u austenitnoj fazi, na temperaturi iznad A_f (slika 7). Povećanjem napreznja iznad kritične vrijednosti (σ_f), dolazi do formiranja martenzita. Ispod određenog napreznja (σ_r) dolazi do nukleacije austenita.

Prilikom austenitno-martenzitne transformacije dolazi do temperaturne histereze, a glavni razlog tomu je što temperature nisu iste pri zagrijavanju i hlađenju legure s prisjetljivosti oblika (slika 8) [11].



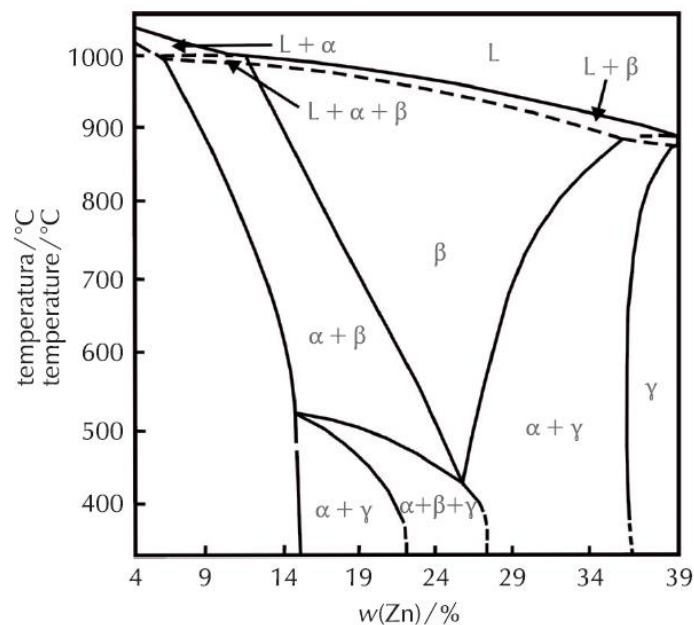
Slika 8. Temperaturna histereza [17]

2.2.2. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra

Osnovne Cu-SMA legure su na bazi binarnih sustava Cu-Al i Cu-Zn, koji u određenim sastavima formiraju visokotemperaturnu β -fazu [18]. Dodavanje treće komponente omogućuje kontrolu temperaturu transformacije te modifikaciju finalnih svojstava Cu-legura za određeno područje primjene [19]. Temperature transformacija A_s, A_f, M_s, M_f vrlo su osjetljive na promjene udjela pojedinih komponenti te je variranjem i odabirom komponenti moguće dizajnirati SMA materijal za specifično područje primjene.

Cu-Zn-Al legure

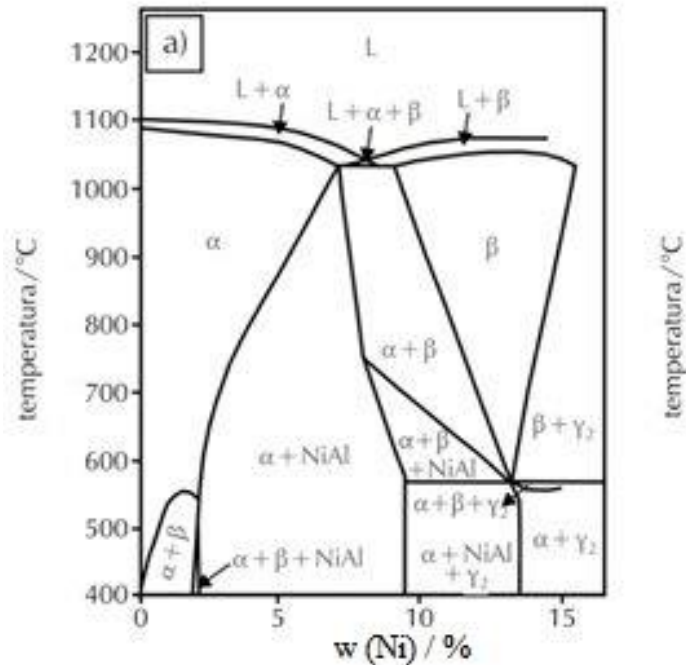
Cu-Zn-Al legura s efektom prisjetljivosti oblika je komercijalno vrlo dugo korištena, no njeni nedostaci su velika krtost te lošija mehanička svojstva. Legirajućim elementima poput Ti, Zr, V, Co, Fe, Be i dr. mogu se dodatno poboljšati funkcionalna svojstva, primjerice dodavanjem cirkonija dolazi do sniženja temperatura fazne transformacije (M_s, M_f, A_s, A_f), dok se dodavanjem bora i titana može utjecati na smanjenje veličine zrna. Sastavi komponenti koji omogućuju formiranje β -faze mogu se vidjeti na faznom dijagramu na slici 9, pri vertikalnom presjeku od 6 % mas. aluminija.



Slika 9. Fazni dijagram Cu-Zn-Al legure pri vertikalnom presjeku 6 % Al [20]

Cu-Al-Ni legure

Cu-Al-Ni legure, kao i Cu-Zn-Al legura, pokazuju krtost i lošu hladnu obradivost što ograničava područje primjene ovih legura. Temperature martenzitnih transformacija mogu biti i u rasponu od 100 do 400 °C, ovisno o sastavu komponenata. Na slici 10 prikazan je fazni dijagram Cu-Al-Ni SMA legure pri vertikalnom presjeku kod 3% sadržaja nikla. Pri udjelima većim od 11 %mas. aluminija, bcc struktura reakcijama uređenja prelazi u DO3 strukturu, Cu_3Al [20]. U legurama sa sadržajem aluminija od 1 do 13 %mas., uglavnom naglim hlađenjem nastaje martenzit $18R_1$ strukture, dok pri udjelima višim od 13 %mas. nastaje martenzit $2H$ strukture [20].



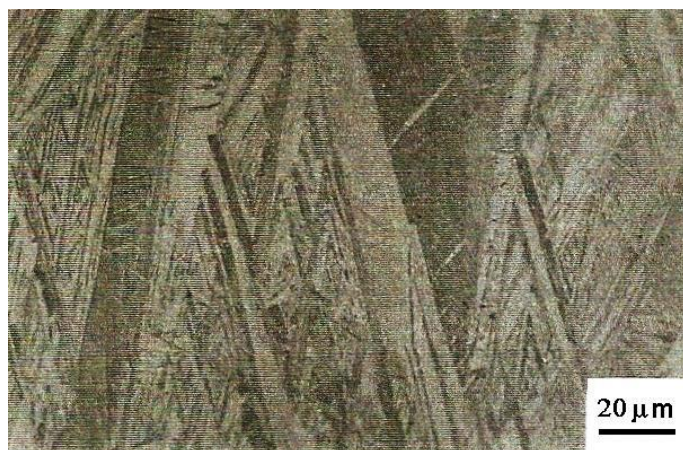
Slika 10. Fazni dijagram Cu-Al-Ni legure s vertikalnim presjekom pri $w(\text{Ni}) = 3\%$ [20]

Cu-Al-Be legure

Cu-Al-Be legura s prisjetljivosti oblika počela se intenzivnije proučavati 1982. godine pri čemu su Higuchi i njegovi suradnici istraživali svojstva i fazne transformacije. Prilikom istraživanja proučavao se utjecaj toplinske stabilnosti Cu-Al-Be legure koja ima gotovo eutektoidni sastav gdje se prilikom temperaturne transformacije uočilo da se faza austenita nije razgradila do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cu-Al-Be pri udjelu od 11.2 % aluminija, uz mali udio berilija, 0.5 - 0.6 % pokazuje vrlo dobra svojstva, visoku superelastičnost. Nitinol legura superelastičnost gubi pri -25°C , dok Cu-Al-Be zadržava superelastičnost u području od -80°C do iznad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [21].

Cu-Al-Ag legure

Cu-Al-Ag legure su visokotemperaturne SMA legure (HTSMA), s temperaturama transformacije iznad $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ te pokazuju dobra svojstva superelastičnosti. Legure s udjelom od 11-12% mas. aluminija te 6-8 % mas. srebra pokazuju intenzivno stvaranje martenzita nakon kaljenja te s temperaturama transformacije oko $350\text{-}400^{\circ}\text{C}$ (slika 11) [22].



Slika 11. Martenzitna transformacija $\text{Cu}_{81.2}\text{Al}_{12.8}\text{Ag}_{6.0}$ legure [22]

Usporedba nekih od Cu-SMA legura dana je u tablici 1 [19].

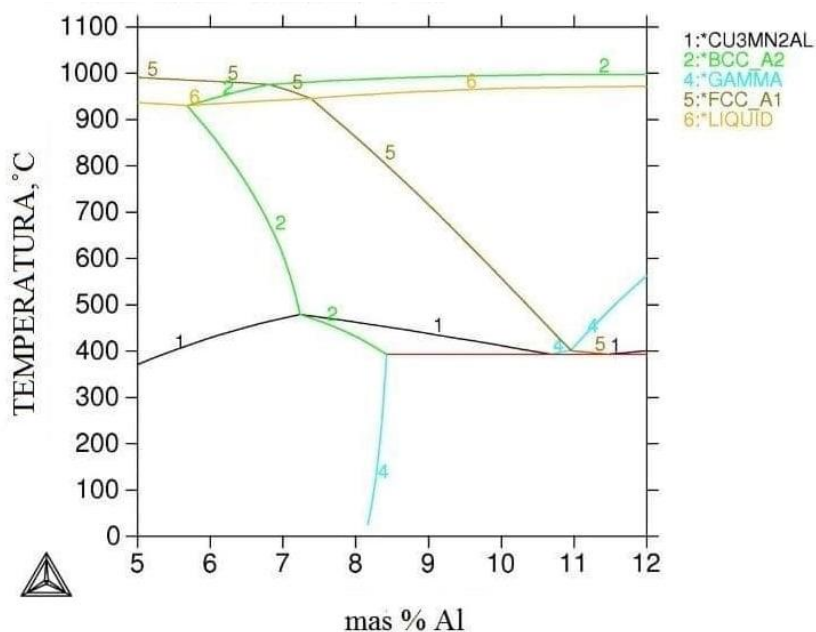
Tablica 1. Usporedba legura s prisjetljivosti oblika na bazi bakra [19]

Grupa	Br.	Sastav legure	Temperatura transformacije (°C)	Histereza (°C)	Vlačno naprezanje (%)	Oporavak naprezanja (%)	Značajke
Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra	1.	Cu-Al-Ni	100-400	21.5	3-5	60-90	- niska cijena - relativno dobar SE efekt - dobra pseudoelastičnost - krtost
	2.	Cu-Zn-Al	120	15-25	4	70-85	-visoka toplinska vodljivost -umjerni SE efekt -niska cijena -krtost
	3.	Cu-Al-Be	150-200	20-25	3-5	80-90	- umjereni SE efekt - visoka temperatura transformacija - visoka otpornost na koroziju
	4.	Cu-Al-Ni-Mn	230-280	15-20	3-4	90-100	-visoki SE efekt -umjereni troškovi proizvodnje -visoka temperatura transformacije -dobra otpornost na koroziju
	5.	Cu-Al-Ni-Ti	120-260	12-20	2.5-4	90-100	-visoki SE efekt -umjereni troškovi proizvodnje

							-visoka temperatura transformacije -visoka otpornost na koroziju
6.	Cu-Al-Ni-Fe	210-250	12-15	9	40		- nizak SE efekt - visoka duktilnost - umjereni troškovi materijala - visoka temperatura transformacija - visoka otpornost na koroziju

Cu-Al-Mn legure

U posljednje vrijeme najviše se istražuju legure Cu-Al-Mn koje pokazuju prednost pred ostalim Cu-SMA legurama, s obzirom na veliku duktilnost i sposobnost hladne obradivosti [4]. Dodavanjem mangana binarnoj Cu-Al leguri proširuje se područje stabilnosti β -faze te se smanjuje stupanj uređenosti β -faze. Cu-Al-Mn legura s većim sadržajem mangana, iznad 8 at. %, i udjelom aluminija ispod 18 at.% pokazuju vrlo dobru sposobnost hladne obradivosti, bez smanjenja efekta prisjetljivosti oblika i pseudoelastičnosti. Dodavanjem Zn, Au i Si leguri Cu-Al-Mn povećava se temperatura početka formiranja martenzita, dok se dodavanjem Ti, Cr, Co, Fe, Ni, Sn i Ag ona smanjuje. Efekt prisjetljivosti se povećava s dodavanjem Ti, Au, Zn, Ni a hladna obradivost smanjuje s dodatkom Ti, Co, Cr, Si. Dodatkom srebra također se povećava otpornost na koroziju i tvrdoća materijala. Na slici 12 je dan prikaz faznog dijagrama ternarne legure s 8 mas.% Mn [4].



Slika 12. Izračun vertikalne sekcije za CuMn_{0.8}-Al leguru [4]

Usporedba legure Cu-Al-Mn s drugim SMA legurama prikazana je u tablici 2 [18].

Tablica 2. Usporedba svojstava Cu-Al-Mn s drugim legurama [18]

	Temperaturna transformacija (°C)	Maksimalna hladna obradivost %	Superelastično istežanje %	Jednosmjerni efekt memorije oblika %	Dvosmjerni efekt memorije oblika	Temperaturna ovisnost superelastičnog naprezanja (Mpa/°C)
Cu-Al-Mn	-200 do 150	>60	7,5	10	3-2	2,4
Ni-Ti	-40 do 100	30	8	8	5	5,7
Cu-Al-Ni	-200 do 170	10	2	5	2	-
Cu-Zn-Al	-200 do 120	30	2	5	2	-

2.3. Karakterizacija SMA legura

2.3.1. Mikrostrukturalna ispitivanja

Mikrostruktura opisuje veličinu i oblik kristalnih zrna u legurama s efektom prisjetljivosti oblika te njihovu orijentaciju i raspodjelu. Ispitivanje mikrostrukture provodi se na pripremljenim površinama uzoraka. Općenito, priprema uzoraka sastoji se od tri glavna postupka, a to su brušenje, poliranje i nagrivanje. Brušenje se najčešće provodi s brusnim papirima te priprema za postupak poliranja kako bi se uklonile sve moguće nečistoće i neravnine s površine uzorka. Na taj način se uklanjaju i sve ogrebotine i risevi koji mogu negativno utjecati na ispitivanje mikrostrukture i preciznost mjerenja. Zadnji korak pripreme uzorka je nagrivanje koje se provodi u određenim kiselinama prilikom čega se ističu granice zrna, odnosno mikrostruktura legure nakon poliranja. Ispitivanje mikrostrukture može se provoditi pomoću sljedeća dva postupka, a to su [2]:

- Svjetlosna mikroskopija (OM)
- Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM)

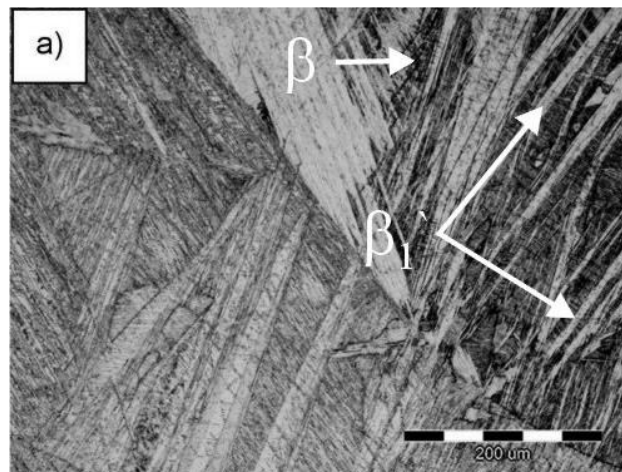
2.3.1.1. Svjetlosna mikroskopija (OM)

Svjetlosna mikroskopija je tehnika koja se koristi za precizno gledanje uzoraka prilikom čega se mogu odrediti višefazne polikristalne nesavršenosti u leguri koja se proučava. Optički ili svjetlosni mikroskop (slika 13) koristi jednu ili više serija leća za uvećanje slike vrlo malih uzoraka i to pomoću svjetlosti. Leće se postavljaju između ispitivanog uzorka i oka promatrača. Postoje nekoliko vrsta optičkih mikroskopa koji se razlikuju po razlučivosti i kontrastu, a neki od njih su jednostavni mikroskop koji koristi jednu leću za uvećanje slike, zatim složeni mikroskop koji koristi više leća, digitalni mikroskop koji se služi računalom za vizualizaciju slike te stereo mikroskop koji pruža stereoskopsku sliku.



Slika 13. Svjetlosni mikroskop [23]

Kako bi njegovo korištenje bilo učinkovito, potrebno ga je postaviti na pravilan način gdje objektivnu leću treba približiti ispitanom uzorku, a slika se prati kroz okular mikroskopa. Tijekom ispitivanja mikrostrukture pomoću optičkog mikroskopa mogu se proučavati granice faza, greške u strukturi, nečistoće, faze tijekom skrućivanja i sl. [2, 23].



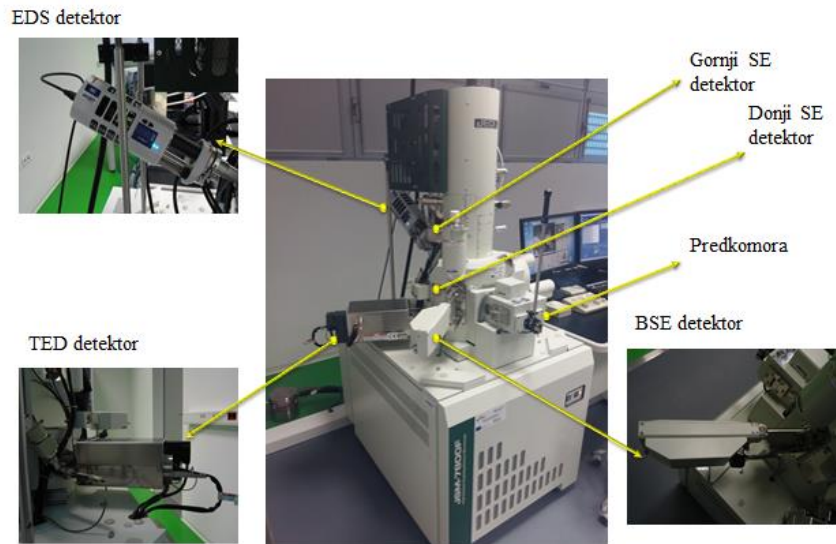
Slika 14. Primjer OM mikrofotografije martenzitne strukture u Cu-Al-Mn leguri [24]

2.3.1.2. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM)

Ispitivanje mikrostrukture legura s prisjetljivosti oblika moguće je proučavati i metodom SEM-a, odnosno skenirajućeg elektronskog mikroskopa koji se sastoji od skeniranja površine ispitanog uzorka preciznim fokusiranim snopom elektrona. Izvor elektrona je katoda koja se nalazi u emisijskoj komori i promatrani uzorak je smješten na nosaču komore mikroskopa. Tijekom udaraca elektrona na površinu ispitanog uzorka, dolazi do pojave određenih efekata pomoću kojih se dobiva slika i analiza SEM-a [25].

Skenirajući elektronski mikroskop u svom radu može koristiti sljedeća tri glavna tipa detektora (slika 15) [2]:

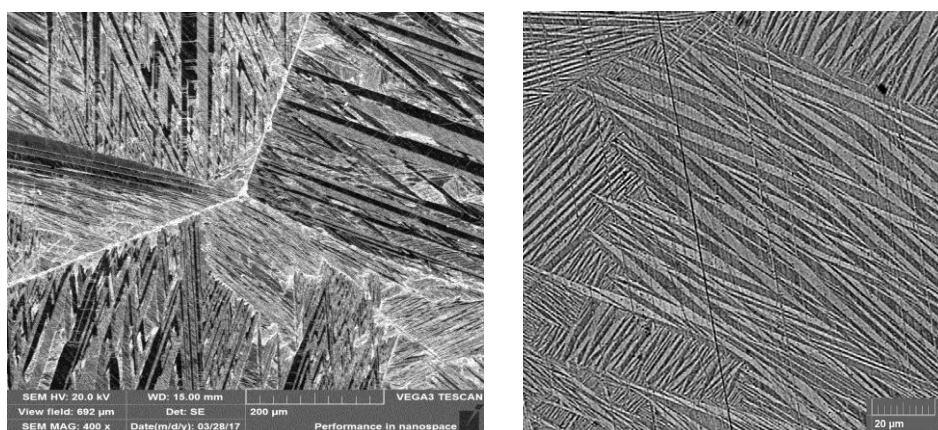
- SE (engl. Scondary Electron) – detektor sekundarnih elektrona
- BSE (engl. Back Scatter Electron) – detektor povratnog raspršenja
- EDS (eng. Energy Dispersive Spectrometer) – energijsko disperzivni spektrometar



Slika 15. Skenirajući elektronski mikroskop s prikazanim detektorima [26]

BSE detektor služi za detektiranje elektrona povratnog raspršenja koji nastaju tijekom sudara s atomskom jezgrom i njegovi rezultati su prikazani u sivoj boji te se pomoću njega mogu snimiti uzorci koji nemaju svojstvo električne vodljivosti. Također, tijekom sudara elektrona, dolazi do pojave važnog efekta prilikom kojeg nastaju sekundarni elektroni prikazani na SE detektoru. EDS detektor se koristi kako bi se odredio kemijski sastav ispitivanog uzorka na temelju X-zraka emitirane elektronskim snopom.

Na slici 16 prikazana je mikrostruktura martenzita u Cu-Al-Mn leguri.



(a) Cu-Al-Mn

(b) Cu-Zn-Al

Slika 16. SEM mikrofotografije martenzitne strukture u (a) Cu-Al-Mn i (b) Cu-Zn-Al legurama [4, 27]

2.3.2. Ispitivanje toplinskih svojstava SMA legura

Ispitivanje toplinskih svojstava legura s efektom prisjetljivosti oblika sastoji se od fizikalno – kemijskih metoda koje prate promjene u svojstvima materijala koji se tijekom obrade izlažu određenim temperaturama. Odabir tehnike ili metode koja će se koristiti ovisi o temperaturnom području u kojem se provodi eksperimentalno ispitivanje toplinskih svojstava SMA legura (slika 17) [28].



Slika 17. Podjela tehnika ispitivanja toplinskih svojstava legura [28]

2.3.2.1. Diferencijalna pretražna kalorimetrija (DSC)

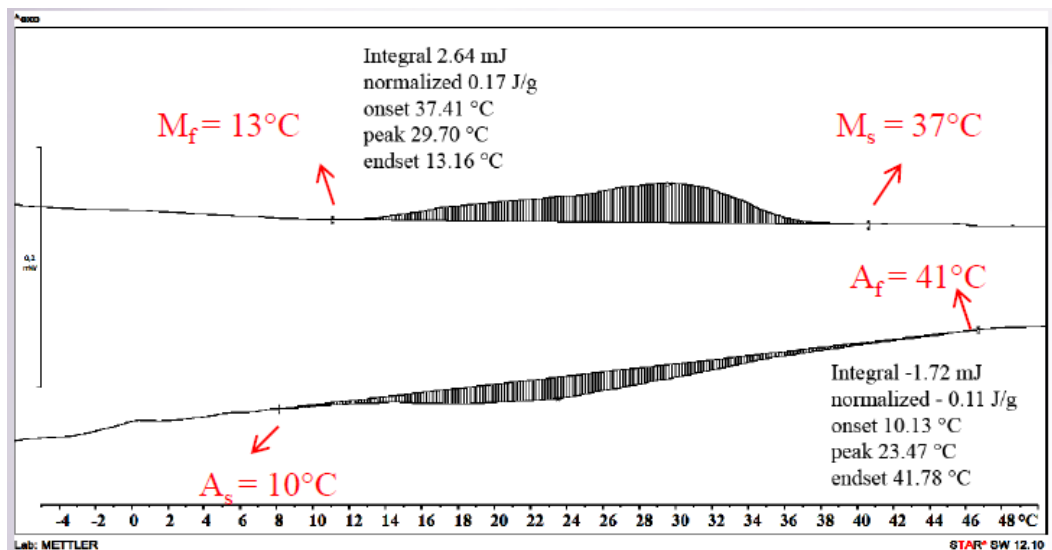
DSC je tehnika u kojoj se mjeri razlika toplinskog toka između ispitivanog i referentnog uzorka tijekom njegovog izlaganja promjeni temperature u inertnoj ili reaktivnoj atmosferi. Ovom tehnikom mogu se pratiti temperature i entalpije faznih transformacija, stupanj kristalnosti, mehanizam skrućivanja, toplinska razgradnja materijala i dr. Velika prednost primjene ove tehnike je što se može koristiti za ispitivanje svih tipova materijala, za metale, keramiku, polimere, staklo, kompozite i dr. Također, ono što ju čini jednom od najboljih tehnika ispitivanja toplinskih svojstava je što se mogu koristiti uzorci male mase te brzina analize [28]. S obzirom na princip rada razlikujemo sljedeće uređaje:

- kompenzacijski diferencijalni pretražni kalorimetar
- diferencijalni pretražni kalorimetar s toplinskim tokom
- visokorezolucijski kompenzacijski diferencijalni pretražni kalorimetar



Slika 18. Simultani toplinski analizator STA DSC/TG [28]

Rezultat DSC analize je termogram, koji pokazuje promjenu toplinskog toka na ordinati, s promjenom temperature ili vremena mjerenja na apscisi (slika 19). Za legure s efektom prisjetljivosti oblika važno je odrediti austenitnu i martenzitnu transformaciju DSC analizom. Austenitna transformacija javlja se kao endotermni pik na krivulji zagrijavanja, te se početak i završetak austenitne transformacije određuje sjecištem tangenti na interval pika. Martenzitna transformacija očitava se iz egzotermnog pika na krivulji hlađenja. Pripadajuće entalpije mogu se odrediti integriranjem površine ispod pika transformacije [4].



Slika 19. Primjer DSC analize CuAlMn legure [4]

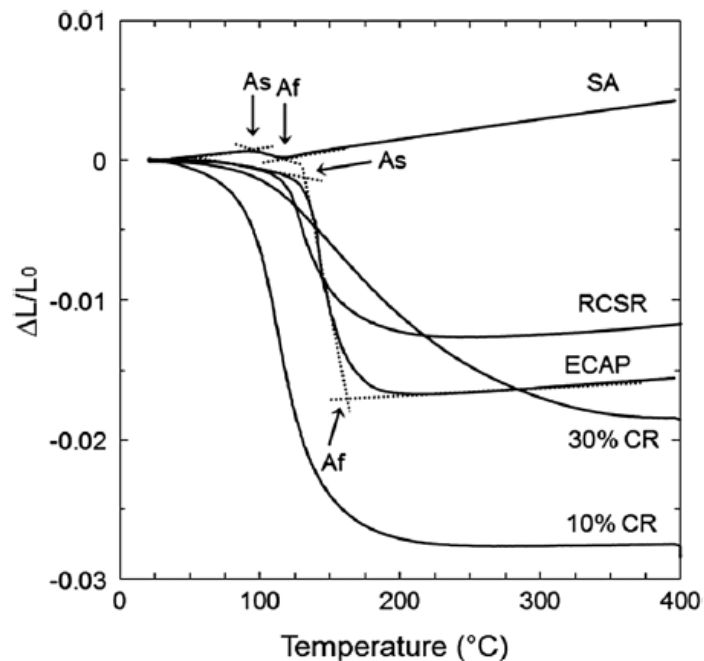
2.3.2.2. Dilatometrija (DIL)

Tehnika koja se bavi praćenjem promjena duljine ili volumena nastalih prilikom faznih transformacija naziva se dilatometrija. S obzirom na veliko temperaturno područje istraživanja, čak do 2800 °C, uređaji imaju široku primjenu u ispitivanju toplinskih svojstava SMA legura. Dilatometrija je uz DSC, najbolja i najčešća metoda kojom se prate fazne transformacije u

metalnim legurama. Prednost ove tehnike što je korištenje uređaja, odnosno dilatometra vrlo jednostavan gdje se uzorak nalazi između dviju šipki, jedna je fiksna, a druga pomična i povezana s transformatorom (slika 20) [28].



Slika 20. Dilatometar za praćenje faznih transformacija [29]

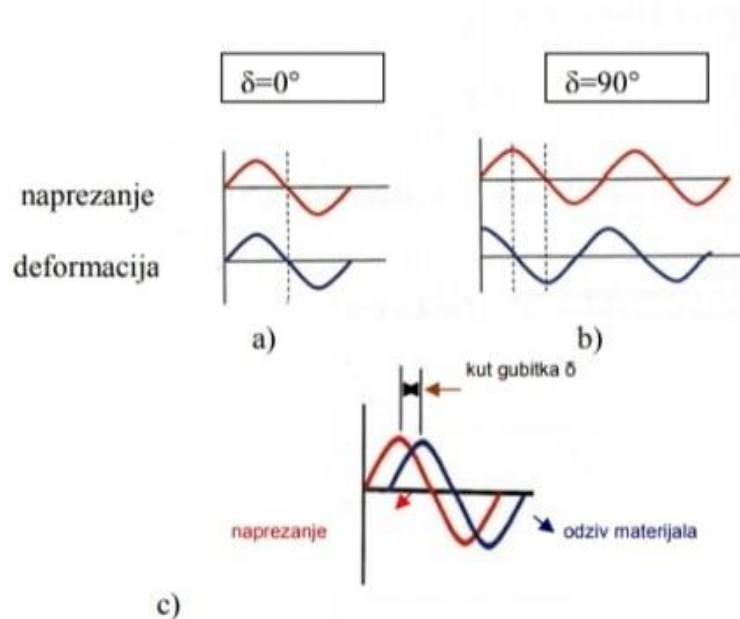


Slika 21. Određivanje faznih transformacija dilatometrijom za NiTi leguru [30]

2.3.2.3. Dinamičko – mehanička analiza (DMA)

Dinamičko-mehanička analiza (DMA) je tehnika kojom se prati odziv materijala na cikličko naprezanje uz kontrolirano zagrijavanje materijala u inertnoj atmosferi. Dinamičko-mehaničkom analizom prate se promjene modula pohrane (E'), modula gubitka (E'') i kuta gubitka ($\tan \delta$) [28].

Viskoelastični materijali pokazuju zaostanje deformacije za naprežanjem i to za kut δ , ($0 < \delta < 90^\circ$). Na slici 22 prikazana je pojava viskoelastičnog ponašanja materijala, ovisno o kutu.



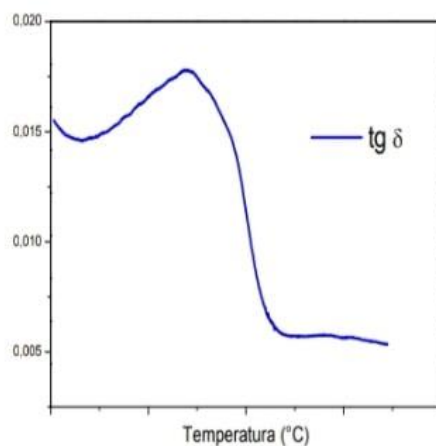
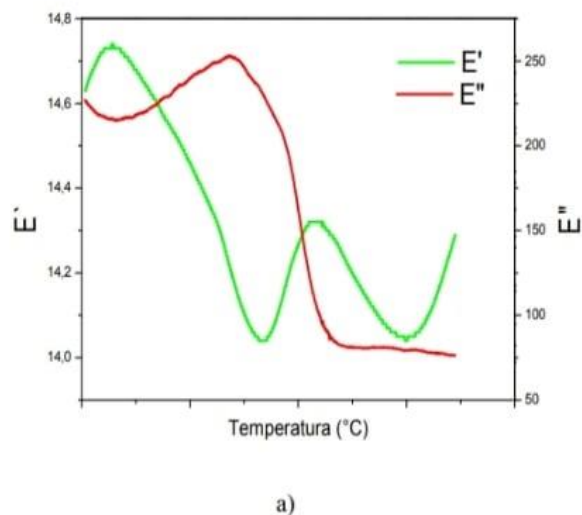
Slika 22. Odziv elastičnih (a), viskoznih (b) i viskoelastičnih (c) materijala na dinamičko-mehanička ispitivanja [28]

Prilikom ispitivanja legura dinamičko-mehaničkom analizom, naprežanje je određeno realnom (E') i imaginarnom komponentom modula (E''). Modul pohrane (E') posjeduje svojstva elastične komponente te je proporcionalan energiji koja se pohranjuje pri deformaciji i vraća u obliku mehaničke energije. Modul gubitka (E'') je proporcionalan izgubljenoj mehaničkoj energiji i to u obliku topline.

Kut faznog pomaka (δ) izračunava se omjerom modula gubitka i modula pohrane te predstavlja mjeru gubitka energije u materijalu prilikom viskoznog trenja.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E''}{E'}$$

Ovom analizom daju se podaci o promjeni modula pohrane i modula gubitka s promjenom temperature. Na slici 23 dan je primjer dinamičko-mehaničke analize za Cu-Al-Mn leguru [28].



Slika 23. a) Promjena modula pohrane (E') i modula gubitka (E'') s temperaturom za leguru Cu-Al-Mn, b) promjena kuta gubitka ($\text{tg } \delta$) [28]

2.3.2.4. Ispitivanje tvrdoće SMA legura

Tvrdoća je fizikalno svojstvo materijala, odnosno predstavlja otpor prema nekom tijelu koje prodire kroz ispitivani materijal. Parametri koji mogu utjecati na samo ispitivanje tvrdoće materijala su kemijski sastav i struktura legure, temperatura, brzina hlađenja te toplinska obrada koja se vrši na ispitivani uzorak. Postoje razne metode za mjerenje tvrdoće legura, kao što su Brinellova metoda, Rockwellova metoda te Vickersova metoda koja je najčešća metoda za mjerenje tvrdoće SMA legura. Prilikom mjerenja tvrdoće na Vickersovom tvrdomjeru (slika 24) gleda se omjer sile i otiska dijamantne četverostrane piramide na ispitivani uzorak. Tvrdoća je po Vickersu bezdimenzionalna veličina te se označava simbolom HV [31].



Slika 24. Vickersov tvrdomjer za mjerenje SMA legura [32]

Ispitivanje počinje s pripremom uzorka te njegovim postavljanjem na tvrdomjer. Treba postaviti potrebno opterećenje te vrijeme trajanja opterećenja, 10-15 s. Kako bi mjerenje bilo što preciznije, uzorak bi trebao biti prethodno brušen i poliran, bez vanjskih pukotina i oštećenja. Prilikom opterećenja sile, na uzorku ostaje oblik piramide te zadnji korak mjerenja je izračun prema određenim formulama koje se primjenjuju. Prednost primjene ove metode u odnosu na ostale je taj što je penetrator na tvrdomjeru napravljen od dijamanta koji je prema Moshovoj ljestvici najtvrdi materijal i samim time mogu se mjeriti i najtvrdi materijali [31].

3. ZAKLJUČAK

Na temelju pregleda literature o legurama s efektom prisjetljivosti oblika, posebice na bazi bakra, može se zaključiti kako je njihova primjena vrlo velika, posebice u biomedicini i bioinženjerstvu, zatim u robotici, elektronskoj i elektroničkoj industriji, automobilskoj i avio industriji te u drugim granama. Ono što karakterizira SMA legure je efekt prisjetljivosti oblika i pseudoelastičnost, što ovisi o faznoj transformaciji između dvije strukture, austenita i martenzita. Austenit predstavlja visokotemperaturnu fazu, dok je martenzit niskotemperaturna faza. Za primjenu SMA legura ključne su temperature njihovih transformacija, koje ovise o sastavu komponenata legura. Mikrolegiranjem s dodatnim elementima mogu se dizajnirati željena svojstva materijala. Legure Nitinol su komercijalno najviše korištene legure, koje se izdvajaju od ostalih legura po svojoj biokompatibilnosti. Sve se više koriste kao zamjena za nitinol i legure na bazi bakra, osobito u elektroničkim uređajima, s obzirom na jednostavnu proizvodnju i nisku cijenu.

4. LITERATURA

- [1] M. Knežević, Termodinamičko modeliranje Cu-Al-Mn legura, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Diplomski rad, Sisak, 2017.
- [2] I. Škrinjarić, Utjecaj toplinske obrade na mehanička svojstva CuAlMn legure s prisjetljivosti oblika, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Diplomski rad, Sisak, 2017.
- [3] N. Zárubova, V. Novák, Phase stability of CuAlMn shape memory alloys, Institute of Physics AS CR, Materials Science and Engineering A378, 216-221, Czech Republic, 2004.
- [4] T. Holjevac Grgurić, D. Manasijević, S. Kožuh, I. Ivanić, I. Anžel, B. Kosec, M. Bizjak, E. Govorčin Bajsić, Lj. Balanović, M. Gojić, The effect of the processing parameters on the martensitic transformation of Cu-Al-Mn shape memory alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 765, 664-676, 2018.
- [5] V. H. C. de Albuquerque, T. A. de Melo, R. M. Gomes, S. J. G. de Lima, J. M. R. S. Tavares, Grain Size and Temperature Influence on the Toughness of CuAlBe Shape Memory Alloys, *Materials Science and Engineering A*, 2010.
- [6] Z. Lenhard, Metalurgija obojenih metala I, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [7] http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matscienceii/lectures2017/04_Copper%20and%20copper%20alloys.pdf (09.05.2020.)
- [8] <https://copperalliance.org.uk/about-copper/copper-alloys/> (25.05.2020.)
- [9] C. A. Canbay, M. Ali Cicek, O. Karaduman, I. Özkul, M. Sekerci, Investigation of Thermoelastic Martensitic Transformations and Structure in New Composition of CuAlMnTi Shape Memory Alloy, *Journal of Materials and Electronic Devices* 1, 60-64, 2019.
- [10] O. Adiguzel, Martensitic Transformation and Microstructural Characteristics in Copper Based Shape Memory Alloys, *Firat University, Department of Physics, Key Engineering Materials Vols 510-511*, 105-110, 2012.
- [11] I. Ivanić, M. Gojić, S. Kožuh, Legure s prisjetljivosti oblika (I. dio): najznačajnija svojstva, *Kemija u industriji* 63 (2014) 9 – 10, 323 – 329.
- [12] D. C. Lagoudas, *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*, Springer, Texas, USA, 2008.
- [13] X. Zhang, D. Huang, X. Yan, X. Zhou, Modeling functional fatigue of SMA using a more accurate subdivision of martensite volume fractions, *Mechanics of Materials* 96, 12-29, 2016.
- [14] M. Sasmaz, A. Bayri, Y. Aydogdu, *The Magnetic Behavior and Physical Characterization of Cu-Mn-Al Ferromagnetic Shape Memory Alloy*, 2010.
- [15] Y. Sutou, R. Kainuma, K. Ishida, Effect of alloying elements on the shape memory properties of ductile Cu–Al–Mn alloys, Department of Materials Science, Graduate School of

Engineering, Tohoku University, Materials Science and Engineering A273–275, Japan, 375 – 379, 1999.

[16] PS Rama Sreekanth, Shape memory alloys, Reference Module in Materials Engineering, 2017.

[17] J. Zupanc, N. Vahdat-Pajouh, E. Schafer, New thermomechanically treated NiTi alloys – a review, *International Endodontic Journal*, 51, Germany, 1088–1103, 2018.

[18] Y. Sutou, T. Omori, R. Kainuma, K. Ishida, Ductile Cu-Al-Mn based shape memory alloys: general properties and applications, *Materials Science and Technology* 24 (2008) 8, 896-901.

[19] S. N. S. Al-Humairi, Cu-Based Shape Memory Alloys: Modified Structures and Their Related Properties, Faculty of Information Sciences and Engineering, Recent Advances in Engineering Materials and Metallurgy, 2019.

[20] 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.

[21] <https://www.intechopen.com/books/shape-memory-alloys-processing-characterization-and-applications/micromechanical-behavior-of-cualbe-shape-memory-alloy-undergoing-3-point-bending-analyzed-by-digital>

[22] J. Fernandez, A. Isalgue, R. Franch, Effect of thermal cycling on CuAlAg shape memory alloys, *International Conference on Martensitic Transformations, Materials Today: Proceedings* 2S S805-S808, 2015.

[23] <https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Optical-Microscopy.aspx> (03.08.2020.)

[24] S. Kožuh., M. Gojić, I. Ivanić, T. Holjevac Grgurić, B. Kosec, I. Anžel, The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu-Al-Mn Shape Memory Alloy, *Kem.Ind* 67 (1-2), 11-17, 2018.

[25] L. Šimeg, Primjena elektronske mikroskopije u karakterizaciji prirodnih materijala, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

[26] <https://www.phy.uniri.hr/hr/ustroj/29-hr/ustroj/laboratoriji/800-pretrazni-elektronski-mikroskop.html> (05.08.2020.)

[27] Z. Stošić, D. Manasijević, LJ. Balanović, T. Holjevac Grgurić, U. Stamenković, M. Premović, D. Minić, M. Gorgievski, R. Todorović, Effects of Composition and Thermal Treatment of Cu-Al-Zn Alloys with Low Content of Al on their Shape-memory Properties, *Materials Research* 2017; 20(5): 1425-1431

[28] T. H. Grgurić, Eksperimentalne tehnike u termodinamici materijala, Nastavni materijali, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak

[29] <https://www.indiamart.com/proddetail/dilatometry-dil-16049610212.html> (06.08.2020.)

[30] H. Shahmir, M. Nili-Ahmadabadi, A. Razzaghi, M. Mohammadi, C. Ting Wang, J. Myun Jung, H. Seop Kim, T.G. Langdon, Using dilatometry to study martensitic stabilization and recrystallization kinetics in a severely deformed NiTi alloy, Journal of Materials Science, 2015.

[31] S. Rešković, Ispitivanje materijala, Nastavni materijali, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet

[32]<https://www.laboratuar.com/hr/testler/malzeme-testleri/dinamik-mekanik-analiz/>
(07.08.2020.)

POPIS SLIKA:

Slika 1. Podjela legura na bazi bakra

Slika 2. Shematski prikaz efekta prisjetljivosti oblika: a) struktura austenitne faze, b) samoprilagođavajući martenzit induciran promjenom temperature, c) martenzit induciran naprežanjem

Slika 3. Prikaz jednosmjernog efekta prisjetljivosti oblika

Slika 4. Prikaz dvosmjernog efekta prisjetljivosti oblika

Slika 5. Kristalne strukture Cu-SMA legura

Slika 6. Vertikalni presjek Cu-Al-Mn pri 10 at.% Mn

Slika 7. Pseudoelastičnost SMA legura

Slika 8. Temperaturna histereza

Slika 9. Fazni dijagram Cu-Zn-Al legure pri vertikalnom presjeku 6% Al

Slika 10. Fazni dijagram Cu-Al-Ni legure s vertikalnim presjekom pri $w(\text{Ni}) = 3\%$

Slika 11. Martenzitna transformacija $\text{Cu}_{81,2}\text{Al}_{12,8}\text{Ag}_{6,0}$ legure

Slika 12. Izračun vertikalne sekcije za $\text{CuMn}_{0,8}$ -Al leguru

Slika 13. Svjetlosni mikroskop

Slika 14. Primjer OM mikrofotografije martenzitne strukture u Cu-Al-Mn leguri

Slika 15. Skenirajući elektronski mikroskop s prikazanim detektorima

Slika 16. SEM mikrofotografije martenzitne strukture u (a) Cu-Al-Mn i (b) Cu-Zn-Al legurama

Slika 17. Podjela tehnika ispitivanja toplinskih svojstava legura

Slika 18. Simultani toplinski analizator STA DSC/TG

Slika 19. Primjer DSC analize CuAlMn legure

Slika 20. Dilatometar za praćenje faznih transformacija

Slika 21. Određivanje faznih transformacija dilatometrijom za NiTi leguru

Slika 22. Odziv elastičnih (a), viskoznih (b) i viskoelastičnih (c) materijala na dinamičko-mehanička ispitivanja

Slika 23. a) Promjena modula pohrane (E') i modula gubitka (E'') s temperaturom za leguru Cu-Al-Mn, b) promjena kuta gubitka ($\text{tg } \delta$)

Slika 24. Vickersov tvrdomjer za mjerenje SMA legura

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Usporedba legura s prisjetljivosti oblika na bazi bakra

Tablica 2. Usporedba svojstava Cu-Al-Mn s drugim legurama

POPIS OZNAKA:

SMA – legure s prisjetljivosti oblika

M_s – temperatura početka martenzitne transformacije, °C

M_f – temperatura završetka martenzitne transformacije, °C

A_s – temperatura početka austenitne transformacije, °C

A_f – temperatura završetka austenitne transformacije, °C.

PE – pseudoelastičnost

DSC – diferencijalna pretražna kalorimetrija

OM – svjetlosna mikroskopija

SEM – skenirajuća elektronska mikroskopija

DIL – dilatometrija

DMA – dinamičko-mehanička analiza

ŽIVOTOPIS:

Osobni podaci:

Ime i prezime: Daniela Dumenčić

Adresa: Ivana Bakrana 1, 44000 Sisak

Datum/mjesto rođenja: 30.04.1995., 10000 Zagreb

Mobitel: 098/994-3064

E-mail: daniela.basketball95@gmail.com

Obrazovanje:

2002.-2010. Osnovna škola Braća Ribar

2010.-2014. Ekonomska škola Sisak

2017. – 2020. Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija

Znanja i vještine:

Materinski jezik: hrvatski

Ostali jezici: engleski

Računalne vještine: MS Office (Word, Excel); SolidWorks, Autocade

- pouzdana, odgovorna, samostalna, željna usavršavanja znanja i iskustva

Radno iskustvo:

2014. „VAVA“ obrt, prodajni savjetnik računalne opreme

2015. - 2016. Ministarstvo za demografiju, obitelj, mlade i socijalnu politiku, stručna referentica

2017. – trenutno: Studio Moderna, prodajni savjetnik (studentski posao)

Članstva:

2019. – trenutno: Član Studenskog zbora Metalurškog fakulteta

2019. – trenutno: Član Povjerenstva za nastavu Metalurškog fakulteta

- sudjelovanje na sportskim natjecanjima na Tehnologijadi