

Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na svojstva legura s prisjetljivosti oblika

Rajić, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:115:635063>

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

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



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](#)



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Iva Rajić

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Iva Rajić

UTJECAJ MIKROLEGIRAJUĆIH ELEMENATA NA SVOJSTVA LEGURA S PRISJETLJIVOSTI
OBLIKA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: doc. dr. sc. Ivana Ivanić

Članovi povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

1. prof. dr. sc. Mirko Gojić, predsjednik
2. doc. dr. sc. Ivana Ivanić
3. prof. dr. sc. Sjepan Kožuh

Zamjenski član: izv. prof. dr. sc. Ljerka Slokar Benić

Sisak, rujan 2021.

Zahvaljujem se svojoj voditeljici rada, doc. dr. sc. Ivani Ivanić koja mi je pružila priliku i omogućila izradu završnog rada. Želim se zahvaliti svim nastavnicima i kolegama Metalurškog fakulteta na trudu, suradnji i stečenim znanjima.

Zahvaljujem se svojoj majci i ocu na financijskoj podršci, braći na poticanju na rad tijekom školovanja, prijateljicama na podizanju morala dok sam padala na ispitima i dečku koji je bio tu uvijek uz mene.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: Iva
PREZIME: Rajić
MATIČNI BROJ: BM-3643/17

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:

UTJECAJ MIKROLEGIRAJUĆIH ELEMENATA NA SVOJSTVA LEGURA 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.

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

KLASA: 602-04/21-04/14

URBROJ: 2176-78/21-04- 120

Sisak, 8. rujna 2021.

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 11. redovitoj sjednici od 8. rujna 2021. 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 *Metalurško inženjerstvo* **IVI RAJIĆ** (BM-3643/17) za voditeljicu završnog rada pod naslovom "Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na svojstva legura s prisjetljivosti oblika" ("The influence of microalloying elements on shape memory alloys properties") imenuje se **doc.dr.sc. Ivana Ivanić**.

II.

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

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



Dekanica Metalurškog fakulteta
prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac

Dostavljeno:

- 1 x Iva Rajić
- 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

SAŽETAK

Legure s prisjetljivosti oblika (SMA) karakteriziraju specifična i jedinstvena svojstva, efekt prisjetljivosti oblika, pseudoelastičnost te superelastičnost. Efekt prisjetljivosti oblika predstavlja sposobnost legure da se vraća u svoj prvobitni oblik pod utjecajem temperaturnih ili mehaničkih naprezanja. Do efekta dolazi zbog fazne transformacije između austenita i martenzita. Danas postoji velik broj legura s prisjetljivosti oblika, a najvažnije su na bazi nikla, bakra i željeza. U svrhu poboljšanja primarne legure dodavaju joj se mikrolegirajući elementi. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na svojstva legura s prisjetljivosti oblika je različit s obzirom na vrstu legure. Dodatak mikrolegirajućih elemenata ima značajan utjecaj na proizvodnju, morfologiju, strukturu te svojstva metala.

Ključne riječi: legure s prisjetljivosti oblika, mikrolegirajući elementi, martenzitna transformacija, efekt prisjetljivosti oblika

ABSTRACT

Shape memory alloys (SMA) are characterized by specific and unique properties, shape memory effect, pseudoelasticity and superelasticity. The shape memory effect is alloys ability to return to its original shape under the influence of temperature or mechanical stresses. The effect is due to the phase transformation between austenite and martensite. Today, there are a large number of alloys with shape memory effect and the most important are based on nickel, copper, and iron. In order to improve the primary alloy, microalloying elements are added to it. The influence of microalloying elements on the properties of shape memory alloys is different depending on the type of the alloy. The addition of micro alloying elements has a significant impact on the production, morphology, structure and alloys properties.

Keywords: shape memory alloys, microalloying elements, martensitic transformation, shape memory effect

Sadržaj:

1. UVOD	1
2. LEGURE S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA.....	2
2.1. Svojstva legura s prisjetljivosti oblika.....	2
2.2. Proizvodnja legura s prisjetljivosti oblika	5
2.2.1. <i>Melt-spinning</i> lijevanje legura s prisjetljivosti oblika.....	6
2.2.2. Vakuumsko i kontinuirano lijevanje legura s prisjetljivosti oblika	7
3. MIKROLEGIRANJE	8
4. UTJECAJ MIKROLEGIRAJUĆIH ELEMENATA NA LEGURE S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA.....	9
4.1. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na legure s prisjetljivosti oblika na bazi nikla	9
4.1.1. Utjecaj cirkonija na NiTi leguru	10
4.1.2. Utjecaj hafnija na NiTi leguru	10
4.1.3. Utjecaj željeza na NiTi leguru	11
4.2. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra	11
4.2.1. Općenito o bakru i legurama bakra	11
4.2.2. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra	12
4.2.3. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na CuAlZn leguru	13
4.2.4. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na CuAlNi leguru.....	14
4.2.5. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na CuAlMn leguru	17
4.3. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na legure s prisjetljivosti oblika na bazi željeza ...	18
4.3.1. Legure na bazi željeza.....	18
4.3.2. Utjecaj silicija na FeMnSi leguru	18
4.3.3. Utjecaj kobalta i titana na FeNiCoTi leguru	19
5. PRIMJENA LEGURA S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA.....	19
6. ZAKLJUČAK	22
7. LITERATURA.....	23
POPIS SLIKA:	25
POPIS TABLICA:.....	26
POPIS KRATICA I OZNAKA:	27
Životopis.....	28

1. UVOD

U ovom radu objasniti će se utjecaj mikrolegirajućih elemenata na legure s prisjetljivosti oblika. Ovi materijali nazivaju se "prisjetljivi" materijali, što znači da imaju mogućnost "prisjećanja" termo-mehaničkih postupaka kojima su bili podvrgnuti. Naime, geometrijski oblik koji su imali, na visokim i niskim temperaturama, čine stavke kojih se "sjećaju". Prisjećanje oblika dobiva se putem treninga - tj. čestim ponavljanjem istog termomehaničkog procesa. Strukturna promjena zaslužna za promjenu oblika naziva se martenzitna transformacija, tj. faza pod nazivom austenit (A) prelazi u fazu nazvanu martenzit (M) [1].

U današnje vrijeme postoji velik broj legura s prisjetljivosti oblika, a najvažnije od njih su legure na bazi nikla, legure na bazi bakra, legure na bazi željeza te legure s prisjetljivosti oblika na bazi plemenitih metala. Najveću primjenu imaju nitinol legure (NiTi). Legure na bazi bakra predstavljaju dobru zamjenu za nitinol, s obzirom na visoku cijenu nitinola. Legure na bazi bakra se više koriste u inženjerskoj primjeni zbog njihovih zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, visoke toplinske i električne vodljivosti te niske cijene proizvodnje.

Kako bi se dobila bolja svojstva legura s prisjetljivosti oblika, često se provodi postupak mikrolegiranja osnovne legure. Cilj rada je sagledati i analizirati utjecaj mikrolegirajućih elemenata na legure s prisjetljivosti oblika i definirati na koji način oni djeluju na njih.

Rad donosi prije svega definicije i razvoj legura s prisjetljivosti oblika te nakon toga su definirani mikrolegirajući elementi i njihov povijesni razvoj. Nakon toga slijedi analiza glavnih legura s prisjetljivosti oblika i prikaz utjecaja mikrolegirajućih elemenata na njih.

2. LEGURE S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA

Legure s prisjetljivosti oblika (engl. Shape Memory Alloy, SMA) su legure kojima je glavna karakteristika da se "vrate" u prvobitno stanje ili oblik prilikom obrade na višim temperaturama. Plastično se deformiraju i na nižim temperaturama mijenjajući svoj oblik te izloženosti višim vraćaju se u povratno stanje. Zbog svojih jedinstvenih i superiornijih svojstava u odnosu na druge metale koji se koriste u različite komercijalne svrhe privukle su pozornost posljednjih godina [2]. Otkrićem martenzita u čeliku, Adolf Martenz je zaslužan za naknadna otkrića legura s prisjetljivosti oblika. On je tada eksperimentirao s brzinama hlađenja čelika strukture austenita te je pri izrazito brzom hlađenju uočio faznu transformaciju austenita u tvrdi paraeutektoid koji je po njemu nazvan martenzit. Švedski fizičar Ölander 1932. godine je otkrio da se legura zlata i kadmija hladnom plastičnom deformacijom vraća u prvobitno stanje [3].

Postoji velik broj legura koje posjeduju prisjetljivost oblika:

- legure na bazi nikla: NiTi (tzv. nitinol), NiMnGa;
- legure na bazi bakra: CuZnX (X = Al, Si, Sn, Ga, Mn), CuAlX (X = Ni, Be, Zn, Mn), CuZnAlX (X = Ni, Mn);
- legure na bazi željeza: FeMn, FePt, FeMnSi, FeCoNiTi itd.;
- legure na bazi plemenitih metala: AuCd, AuAg, PtAl, PtTi, PtGa;
- tzv. "egzotične" legure: InTe, InCd, VNb.

Do danas postoje dva sustava ovakvih legura koja su u upotrebi:

1. legura NiTi (Nitinol)
2. legura na bazi bakra [4].

U termoelastičnim transformacijama, transformacija iz početne faze u martenzitnu fazu i temperatura obrnute transformacije predstavljene su s M_s , M_f , A_s i A_f . Temperatura M_s (početak martenzita) označava početak stvaranja martenzita, a temperatura M_f (završetak martenzita) označava potpuno stvaranje martenzita. Temperatura A_s označava početak reakcije stvaranja austenita, a temperatura A_f označava kraj formiranja austenita [5].

2.1. Svojstva legura s prisjetljivosti oblika

Oblik prisjetljivosti legure pokazuje određena svojstva koja karakteriziraju njihovu jedinstvenost i ponašanje u određenim uvjetima. Ovi materijali imaju dvije osnovne faze: visoko-temperaturnu austenitnu fazu i nisko-temperaturnu martenzitnu fazu. Prijelaz između faza sustava kod ovih materijala je ono što je poznato kao prisjetljivost oblika. Pokretačka snaga ove transformacije je razlika u Gibbsovoj slobodnoj energiji faza i može biti inducirana temperaturom ili naprezanjem. Temperatura ili naprezanje uvelike utječu na svojstva legura s prisjetljivosti oblika [6].

Podjela legura s prisjetljivosti oblika može se prikazati tablicom 1.

Tablica 1. Legure prisjetljivosti oblika [6]

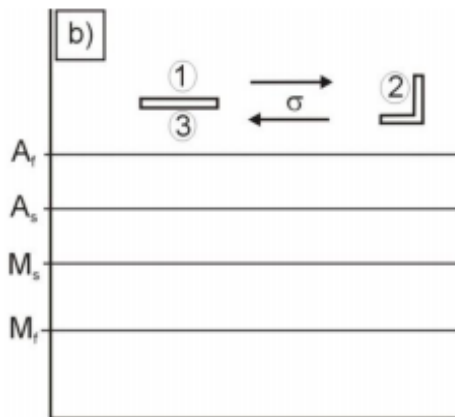
Legura	Sastav	Temperaturno područje transformacije [° C]
AgCd	44-49 at.% Cd	-190 - (-50)
AuCd	46,5/50 at. Cd	30 - 100
CuAlNi	14/14,5 mas. % Al, 3/4,5 mas.% Ni	-140 - 100
CuSn	~15 at.% Sn	-120 - 30
CuZn	38,5/41,5 mas.% (wt. %) Zn	-180 - (-10)
CuZnX (X=Si,Sn,Al)	nekoliko mas.% X a few mas.% of X	-180 - 200
InTi	18/23 at.% Ti	60 - 100
NiAl	36/38 at.% Al	-180 - 100
NiTi	49/51 at.% Ni	-50 - 110
FePt	~25 at.% Pt	~ -130
MnCu	5/35 at.%Cu	-250 - 180
FeMnSi	32 mas.% Mn, 6 mas.% Si	-200 - 150

Temeljna svojstva koja ove legure posjeduju su:

- a) pseudoelastičnost
- b) superelastičnost
- c) efekt prisjetljivosti oblika.

a) Pseudoelastičnost

Pseudoelastičnost je pojava kod legura s efektom prisjetljivosti oblika te je povezana s transformacijom austenita u naprezanjem inducirani martenzit pri konstantnoj temperaturi. Tijekom opterećenja dolazi do stvaranja naprezanja, a zatim nakon rasterećenja na temperaturama iznad A_f dolazi do oporavka. Shematski prikaz pseudoelastičnosti je prikazan na slici 1. Pseudoelastično termomehaničko opterećenje se odvija na visokim temperaturama gdje postoji stabilna faza austenita, a zatim se razvija pod primijenjenim opterećenjem u naprezanjem inducirani martenzit, te na kraju se opet vraća u autenitnu fazu gdje više nema naprezanja [7].

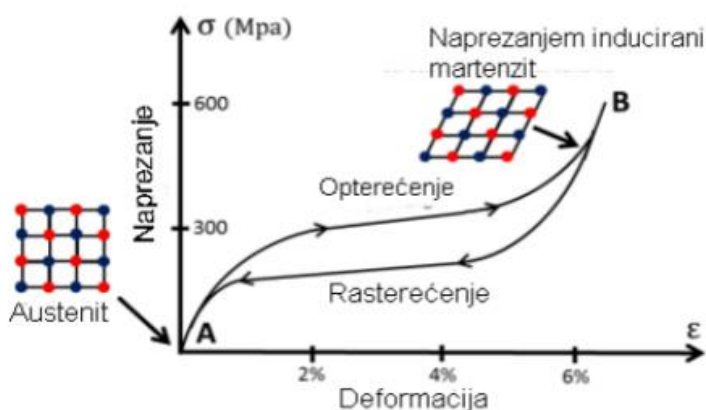


Slika 1. Shematski prikaz pseudoelastičnosti [6]

b) Superelastičnost

Ovi materijali imaju sposobnost velikog stupnja deformacije kada se opterećenje provodi na određenoj temperaturi i vraćaju se na svoj izvorni oblik kada se opterećenje uklanja. Transformacija je obično iznad temperature austenitne završnice, između A_f i M_d gdje M_d je maksimalna temperatura na kojoj martenzit može biti induciran naprezanjem [8].

Temperature iznad M_d potaknule bi trajnu deformaciju prije martenzitne transformacije. Martenzit formiran na ovoj temperaturi poznat je kao naprezanjem inducirani martenzit (SIM). Nakon uklanjanja primijenjenog naprezanja, materijal se vraća natrag u fazu austenita i vraća se u svoj prvobitni oblik. Za vrijeme ove transformacije materijal podliježe velikoj elastičnoj deformaciji što nije funkcija istezanja veza nego reverzibilnog gibanja granice dvojnika između različitih varijanta martenzita. Iz slike 2 je vidljivo superelastično ponašanje gdje se austenit pod utjecajem naprezanja transformira u naprezanjem inducirani martenzit, a prestankom naprezanja se vraća u austenit [9].



Slika 2. Superelastično ponašanje legura s efektom prisjetljivosti oblika prikazano na dijagramu naprezanje-deformacija [9]

c) Efekt prisjetljivosti oblika

Efekt prisjetljivosti oblika je iznimno važan oblik termomehaničkog ponašanja legura s prisjetljivosti oblika. U početku je termin za efekt prisjetljivosti oblika korišten za pojavu oporavka oblika koji je primijećen u nekim slitinama. Postupkom toplinske ili termomehaničke obrade (tzv. "treening" ili programiranje slitine) se dobiva trenutni oblik u svim materijalima s prisjetljivosti oblika [10].

Efekt prisjetljivosti oblika se prikazuje uz pomoć termoelastične martenzitne transformacije koja je nukleacijski neovisna. Reorijentaciju atoma unutar samog materijala moguće je uzrokovati utjecajem mehaničkog opterećenja na materijal sa strukturom samoprilagođavajućeg martenzita pri niskoj temperaturi (ispod M_f). Samim zagrijavanjem legure s prisjetljivosti oblika iznad A_f vraćamo početnu faznu strukturu (austenit) uzrokujući tako potpuni oporavak legure. Ponavljanjem postupka hlađenja materijala ispod M_f legura se vraća u postignuto martenzitno stanje bez promjene vanjskog oblika i dimenzije. Efekt prisjetljivosti oblika predstavlja nastala termoelastična martenzitna transformacija [11]. Na slici 3 je prikazan mehanizam efekta prisjetljivosti oblika.



Slika 3. Mehanizam efekta prisjetljivosti oblika [12]

2.2. Proizvodnja legura s prisjetljivosti oblika

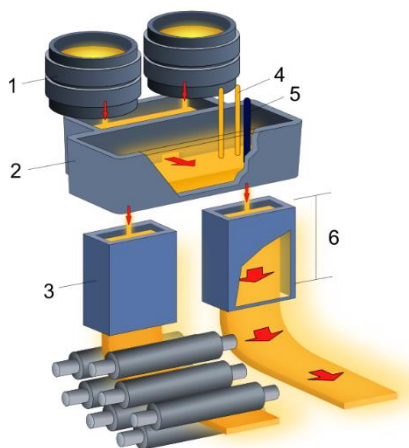
Lijevanje je među najstarijim i najdjelotvornijim postupcima poznatim u čovječanstvu za oblikovanje metala. Jedan je od najefikasnijih načina proizvodnje metalnih predmeta različitih veličina. Lijevanje je tehnologija oblikovanja predmeta od metala kojom se rastaljeni metal tj. taljevina oblikuje ulijevanjem u kalupe pod utjecajem gravitacije ili neke druge sile. Metal poprima dimenzije i oblik kalupe šupljine te zadržava ga nakon skrućivanja. Proizvodnja metala lijevanjem, odnosno proizvodnja metalnih odljevaka stari je postupak te se dugo zasnivala na empirijskim pravilima tj. na metodi pokusa i pogreške zbog nedovoljnog znanja o samom procesu koji se događa tijekom taljenja, lijevanja i skrućivanja odljevka u kalupu. Lijevanje je danas vrlo konkurentan, moderan te efikasan proizvodni proces za izradu metalnih predmeta različitih oblika, veličina i kompleksnosti čija kvaliteta udovoljava zahtjevima suvremenog tržišta [1].

Procesom lijevanja nam je omogućeno lijevanje pojedinih dijelova strojeva u jednom komadu, a ne iz više. Glavni cilj ljevača je postizanje vrhunske kvalitete i zahtjevnijih svojstava odljevaka uz što manje moguće proizvodne troškove. Lijevanje danas obuhvaća većinu industrije; automobilsku, zrakoplovnu. Osim industrije, odljevci se koriste u strojogradnji, medicini, naftnim bušotinama, cijevima, aparatima, nuklearnim postrojenjima, obrambenim proizvodima, igračkama i još mnogo toga. Lijevanje metala vrlo je kompleksan proces i često rezultira neočekivanim rezultatima jer obuhvaća vrlo velik broj varijabli koje se moraju strogo kontrolirati [1].

Kvaliteta uložnih materijala, proces taljenja i obrade taljevine, metalurško stanje taljevine, čistoća taljevine, temperatura i brzina lijevanja, kvaliteta kalupa, uljevni sustav i sustav napajanja odljevka samo su jedan dio iz velikog skupa varijabli koje utječu na konačnu kvalitetu i svojstva odljevaka. Većina grešaka na odljevcima potječe od nepravilnog konstruiranog i postavljenog uljevnog sustava i sustava napajanja. Prednosti lijevanja su što se može dobiti složena geometrija vanjskog i unutarnjeg dijela odljevka, moguće je dobiti dimenzijski točan oblik ili približno točan oblik, moguće proizvesti vrlo velike odljevke, može se lijevati bilo koji metal, moguća masovna proizvodnja, velik raspon dimenzija odljevka: od 1 gram do 250 tona [1].

Nedostaci lijevanja su ograničenja u mehaničkim svojstvima (često se javlja poroznost), često nedovoljna dimenzijska točnost i kvaliteta površine, opasnosti u proizvodnji te nepovoljan utjecaj na okoliš. Zato će se ljevarstvo razvijati ne samo u smjeru iskorištavanja mogućnosti masovne proizvodnje, nego i u smanjenju rizika u pojedinim fazama proizvodnje [13,14].

Kontinuirano lijevanje je postupak u kojem se tekući metal stvrdnjava tijekom odvijanja procesa sve dok ne postane poluproizvod koji se kasnije obrađuje (rezanje, bušenje, valjanje, brušenje i sl.) i postaje gotovi proizvod. Cijeli postupak kontinuiranog lijevanja precizno je promišljen postupak koji može donijeti zapanjujuće rezultate. Osnova kod kontinuiranog lijevanja je pretvorba tekućeg metala određenih svojstava u poluproizvod željenog oblika i veličine, koristeći skup procesa koji to omogućavaju. U kontinuiranom lijevanju se tekući metal kontinuirano ulijeva u kalup koji ima neodređenu duljinu. Proces kontinuiranog lijevanja je prikazan na slici 4. Kada tekući metal prolazi kroz kalup, on teče nizvodno te se s vremenom povećava po dužini. Rastaljeni metal kontinuirano prolazi kroz kalup brzinom koja odgovara procesu stvrdnjavanja metala. Prilikom kontinuiranog lijevanja tekući metal se izlijeva iz razdjelnika (engl. Tundish) u vodom hladjeni kalup iz kojeg se djelomično skrućen čelik izvlači s dna kalupa kroz vodene prskalice koje skrućuju materijal, što čini proces kontinuiranog lijevanja metala. Ovaj proces kao rezultat ima odljev dugačkih odlomaka metala. Kontinuirano lijevanje koristi se kod lijevanja metala neprekinutih dužina, a cjelokupni proces mora biti precizno promišljen proces koji daje vrlo dobre rezultate [13].



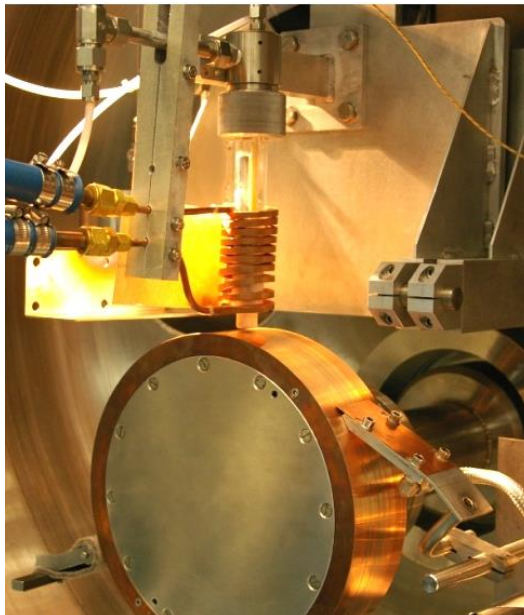
Slika 4. Prikaz kontinuiranog lijevanja [15]

Tehnologije za proizvodnju slitina s prisjetljivosti oblika su indukcijsko taljenje, vakuumsko indukcijsko taljenje, brzo očvršćivanje (engl. *melt-spinning*), kontinuirano vertikalno lijevanje, taljenje elektronskim snopom, plazmatsko lučno taljenje. Nakon toga slijedi obrada slitina vrućom deformacijom (kovanje, valjanje) i hladnom deformacijom (vučenje i valjanje) itd. Kombinacijom ovih tehnika i toplinske obrade nastaje konačni proizvod [3].

2.2.1. *Melt-spinning* lijevanje legura s prisjetljivosti oblika

Lijevanje brzim očvršćavanjem (engl. *melt-spinning*) je tehnika oblikovanja legura s prisjetljivosti oblika koja se obično koristi za oblikovanje tankih vrpca od metala ili slitina s određenom atomskom strukturom. Uvijek se proizvode tanke (oko 50 μm) i vrlo dugačke vrpce (nekih mm- nekoliko cm širine) stvari. Tipični postupak očvršćavanja u talini uključuje lijevanje rastopljenog metala mlazom na rotacijski kotač ili bubanj, koji se interno hladi, obično vodom ili tekućim dušikom. Rastopljeni materijal brzo se skrutne u dodiru s velikom, hladnom površinom bubnja.

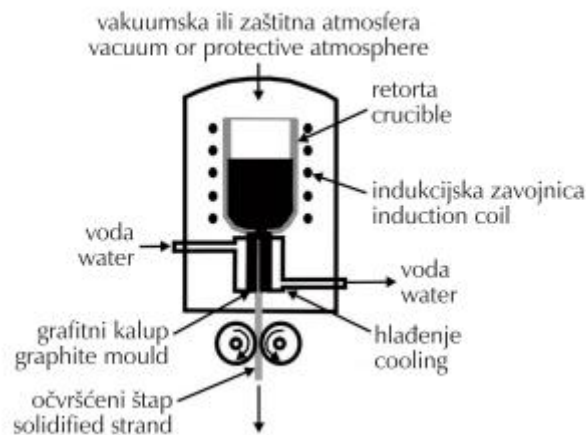
Rotacijom bubnja konstantno se uklanja skrućeni proizvod, dok se nova površina izlaže struji rastaljenog metala, što omogućava kontinuiranu proizvodnju. Rezultirajuća vrpca se zatim usmjerava duž proizvodne linije da se pakira ili obradi u daljnje proizvode. Na slici 5 prikazan je stroj koji radi na Fraunhofer institutu za proizvodnu tehnologiju i napredne materijale u Dresdenu, Njemačka [16].



Slika 5. Prikaz *melt-spinning* postupka [16]

2.2.2. Vakuumsko i kontinuirano lijevanje legura s prisjetljivosti oblika

Vakuumsko indukcijsko taljenje se često koristi kao prva tehnika u pripremi taline. U osnovi, to je tipična tehnologija taljenja za proizvodnju različitih legura na bazi NiTi. To se posebno cijeni za NiTi leguru zbog snažnog utjecaja kemijskog sastava na reaktivnost s kisikom i drugim elementima, što dovodi do oksidacija NiTi taline. U drugom koraku pripremljena talina koja omogućuje izlijevanje rastopljene tvari metala u kalup željenog oblika. Kada se rastopljeni metal ulije u kalup, hladni kristali jezgre na hladnim stijenkama kalupa rastu prema unutra. Konvencionalno lijevanje je postupak koji proizvodi velike ingote koji zahtijevaju značajnu naknadnu obradu. Ti problemi mogu biti riješeni korištenjem kontinuiranog vertikalnog lijevanja. Kontinuiranim vertikalnim lijevanjem sirovina se stavlja u visokoindukcijsku peć za taljenje, u kojoj se materijal tali. Nakon taljenja, talina je, na temelju gravitacijske sile, pomaknuta prema mlaznici, koja podešava brzinu i smjer protoka taline. Talina teče kroz mlaznicu u kalup hlađen vodom, gdje se talina skrutne i dobije konačni oblik štapa određenog promjera. Na slici 6 shematski je prikazan proces vakuumskog kontinuiranog lijevanja [17].



Slika 6. Prikaz vakuumskog kontinuiranog lijevanja [3]

3. MIKROLEGIRANJE

Mikrolegirajući elementi prvi puta se pojavljuju u čelicima niskog udjela ugljika 30-ih godina prošlog stoljeća. Prvi mikrolegirajući elementi bili su vanadij (0,005%) i titan (0,010%) koji su u početku dodavani svaki za sebe da bi im se na kraju povećavala čvrstoća međusobnim kombiniranjem, a time su nastajali i bolji metalurški procesi. Čelici su se tada lijevali u ingote a izrađeni su od polusmirenih čelika u Siemens-Martin pećima. Današnji HSLA čelici izrađuju se od posebno smirenih čelika sa vrlo niskim, udjelom ugljika (manje od 0,2%) kontinuirano lijevani u čelične ploče te termo mehanički obrađeni. Mikrolegiranje je upotrebljavano pri izradi čelika za brodske oplate, čelike za mostove, čelične grede, a u čelike za cjevovode mikrolegiranje se uvodi od 50-ih godina prošlog stoljeća [18].

Vanadij kao mikrolegirajući element spominje se oko 50-ih godina prošlog stoljeća u njemačkoj literaturi dok je utjecaj niobija na povećanje čvrstoće toplo valjanih C-Mn čelika opisan u patentima i literaturi 40-ih godina prošlog stoljeća. Očvršćivanje kao takvo, nije tada bilo poznato, ali je zamjetan bio učinak vanadijevih i niobijevih karbida i nitrida na smanjenje veličine zrna. Poslije je također otkriveno da očvršnuće precipitacijom vanadijevih i niobijevih karbida u nekim slučajevima uzrokuje smanjenje čvrstoće [19].

4. UTJECAJ MIKROLEGIRAJUĆIH ELEMENATA NA LEGURE S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA

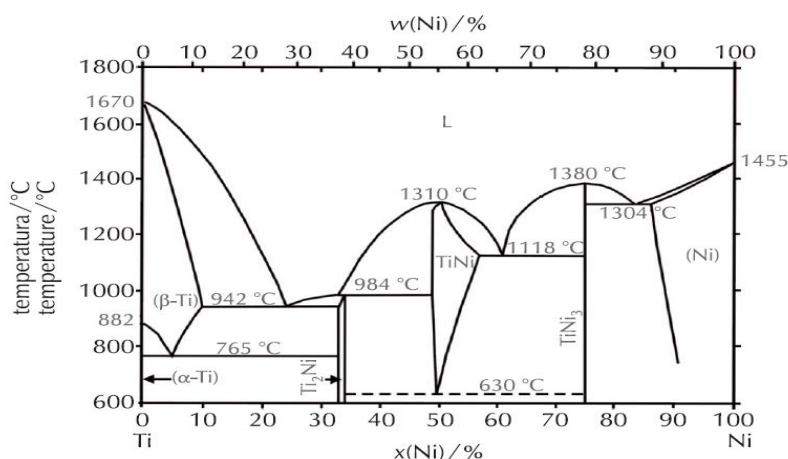
Mikrolegirajući elementi se dodaju u svrhu poboljšanja svojstava primarne legure. U nastavku će biti objašnjen utjecaj pojedinih mikrolegirajućih elemenata na svojstva legura na bazi nikla, bakra i željeza.

4.1. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na legure s prisjetljivosti oblika na bazi nikla

Nikal u elementarnom obliku ili legiran s drugim metalima i materijalima daje značajan doprinos našem današnjem društvu i obećava da će nastaviti isporučivati materijale za još zahtjevniju budućnost. Nikal je oduvijek bio vitalni metal za širok spektar industrija iz jednostavnog razloga što je vrlo svestran materijal koji će se legirati s većinom drugih metala. Legure nikla su legure s niklom kao glavnim elementom. Potpuna topivost u krutom stanju postoji između nikla i bakra. Široki rasponi topljivosti između željeza, kroma i nikla omogućuju mnoge kombinacije legura. Njegova velika svestranost u kombinaciji s izvanrednom otpornošću na toplinu i koroziju dovela je do njegove primjene u raznim područjima kao što su zrakoplovne plinske turbine, parne turbine u elektranama i njihova široka upotreba na tržištima energije i nuklearne energije [20].

Legure s prisjetljivosti oblika na bazi nikla (Nitinol) otkrivene su 60.-ih godina 20. stoljeća, kada je znanstvenik Buechler sa svojim suradnicima otkrio efekt prisjetljivosti oblika na leguri nikal-titan (NiTi) u laboratoriju (Naval Ordnance Laboratory) prema kojem je legura dobila ime NiTiNOL. Najpoznatija među legurama NiTi je Ni50Ti50. Temperature faznih transformacija legure NiTi značajno ovise o kemijskom sastavu, pogotovo sadržaju nikla u leguri, te uglavnom iznose od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. Na slici 7 prikazan je fazni dijagram legure NiTi s prisjetljivosti oblika.

Visokotemperaturna austenitna faza ima kubičnu strukturu B2. Faza TiNi s tipom strukture B2 nastaje sporim hlađenjem na sobnu temperaturu. U faznom dijagramu značajan je središnji dio između faza Ti_2Ni i TiNi_3 . Faza Ti_2Ni je kubične strukture, dok faza TiNi_3 ima heksagonsku strukturu D_{024} [3].



Slika 7. Fazni dijagram legure NiTi [10]

Brzim hlađenjem legura se transformira u martenzit. Niskotemperaturna martenzitna faza je monoklinske strukture. Fazni dijagram još uvijek je predmet brojnih rasprava zbog prisutnosti ili odsutnosti eutektoidnog raspada $TiNi \rightarrow Ti_2Ni_3 \rightarrow TiNi_3$ na temperaturi 630 °C. Ono što je važno kod NiTi legure je i povoljan Youngov modul elastičnosti koji je znatno veći od Youngova modula, međutim manji od mnogih ostalih legura [3].

4.1.1. Utjecaj cirkonija na NiTi leguru

O blagotvornim učincima dodavanja cirkonija na NiTi leguru prvi su izvijestili Eckelmeyer i suradnici 1976. godine. Kasnije su proširili Adu Judom, Hsieh i suradnici kako bi dobili veći atomski postotak, a da se i dalje održava karakteristična fazna transformacija austenita u martenzit i to u slučaju kada 25 at. % Zr zamjenjuje Ti, a zajednički udio Ti i Zr iznosi iznad 51 at. % [21].

Da bi se poboljšala otpornost na koroziju NiTi legure i da se procjene njezina svojstva prisjetljivošću oblika, u postojeći NiTi sustav dodaju se male količine cirkonija, tj. 5 i 10 mas. %. Također, dodavanje cirkonija u NiTi leguru ima značajan utjecaj na mikrostrukturu, svojstva prisjetljivosti oblika, temperature transformacije i vrijednosti tvrdoće legure [22].

Međutim, temperature pretvorbe NiTi legura kreću se od -100 °C do 100 °C, stoga njihova primjena može biti ograničena u industrijskim svrhama. Dodaje se treći element za povećanje temperature pretvorbe legura koje sadrže nikal i titan. Opcija da treći element tvori leguru NiTiX je hafnij ili cirkonij, obično u rasponu od 5 do 20 %. Ovi su elementi su jeftiniji od Pd, Pt ili Au, a mogu povećati temperaturu pretvorbe Ni-Ti legura. Prethodne studije izvijestile su o porastu karakterističnih temperatura pretvorbe (M_s , M_f , A_s , A_f) s povećanim sadržajem Hf ili Zr u tim legurama.

Dodatak cirkonija može osigurati temperature pretvorbe do 200 °C, moguću primjenu u plinskim turbinama, raketnim motorima, automobilskim motorima i nuklearnim reaktorima. U većini studija u čvrstu otopinu dodaje se cirkonij koji zamjenjuje Ti, čime se povećavaju temperature pretvorbe, povećava tvrdoća i otpornost na koroziju. Međutim, studije o mehaničkom, korozivnom i funkcionalnom ponašanju legura NiTiZr i dalje su vrlo ograničene. Dodatak cirkonija također može dovesti do pojave nepoznatih sekundarnih faza koje izravno utječu na svojstva tih legura.

Prema istraživanju Alane Pereira Ramos i suradnika, povećanje postotka cirkonija pogodovalo je povećanju otpornosti na koroziju s 520,23 KΩ na 1007,30KΩ, a mikrotvrdoće s 346 HV na 543 HV. Povećanje sadržaja Zr u leguri uzrokovalo je promjenu njezine mikrostrukture, a time i sučelja elektrolita, što je pogodovalo stvaranju cirkonijeva oksida što je povećalo otpornost na koroziju nastale legure [23].

4.1.2. Utjecaj hafnija na NiTi leguru

Legure s prisjetljivosti oblika na bazi NiTiHf zanimljive su za istraživanje i upotrebu zbog visokih temperatura faznih transformacija, visoke čvrstoće i dvosmjernog efekta prisjetljivosti oblika. Imaju ili posjeduju temperature faznih transformacija iznad 100 °C, efekt prisjetljivosti oblika pod visokim naprezanjem (iznad 500 MPa) i superelastičnost iznad 100 °C.

Međutim, legure na bazi NiTiHf imaju neke nedostatke kao što su niska duktilnost. Kako bi se prevladala ta ograničenja, istraživanja su usmjerena na mikrostrukturno inženjerstvo starenjem i legiranjem. Otkriveno je da je mikrostrukturna kontrola ključna za upravljanje svojstvima prisjetljivosti oblika [24].

Cirkonij i hafnij kao legirajući elementi utječu na povećanje temperaturne pretvorbe NiTi. Naročito je zabilježeno da supstitucija od 20 % hafnija (zamjenjujući Ti) povećava martenzitu pretvorbu do 400 °C [25].

4.1.3. Utjecaj željeza na NiTi leguru

Sadržaj željeza ima važan utjecaj na mehanička svojstva NiTiFe legure. Povećanjem sadržaja željeza dolazi do znatnog povećanja čvrstoće NiTiFe legure, međutim plastičnost naglo opada [26].

Dodatak željeza NiTi leguri rezultira smanjenjem temperatura faznih transformacija u ternarnim legurama. Zaključeno je da temperaturna fazna transformacija legura s prisjetljivosti oblika mogla bi biti snižena dodatkom željeza jer željezo ima afinitet zamjene za nikel. Ako atomi željeza samo zamjenjuju mjesto atoma nikla i pokazuju slična kemijska svojstva kao nikel, temperature njihove fazne transformacije trebale bi se približiti temperaturama binarnih NiTi legura s prisjetljivosti oblika. Međutim, utvrđeno je da temperature faznih transformacija svih NiTiFe legura značajno niža od onih u binarnim NiTi legura s prisjetljivosti oblika [27].

4.2. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra

Mikrolegirajući elementi različito se odražavaju na legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra. Kako utječu, odnosno na koji način se mijenjaju svojstva pojedine legure bit će prikazano biti u narednim potpoglavljima.

4.2.1. Općenito o bakru i legurama bakra

Bakar je mekani crvenkasto-smeđi metal s vrlo visokom toplinskom i električnom vodljivošću. Bakar se široko koristi za proizvodnju električnih vodiča i općenito u elektronici. Zbog malih rezervi i velikih primjena, bakar je materijal od velike važnosti. Bakar je osnovni metal za proizvodnju legura poput bronce i mesinga. Također se miješa sa srebrom i zlatom, što značajno poboljšava njihova mehanička svojstva. U građevinarstvu se bakar koristi kao krovni pokrov i za izradu oluka, a odnedavno i kao materijal za oblaganje fasada. Ugodna i nježna zelena boja njegove patine, kao i velika trajnost, čine ga gotovo idealnim, iako skupim, građevinskim materijalom. Ne otapa se u razrijeđenim kiselinama [28].

U prirodi ga rijetko pronalazimo u svom elementarnom stanju. Može ga se naći u stijenama u obliku sitnih zrnaca, pločica, grančica ili mahovitih isprepletenih niti. Poznato je oko 240 bakrenih ruda. Bakar, obojeni metal koji potječe od latinskog izraza cuprum (Cu) je jedan od najprisutnijih metala u Zemljinoj kori te drugi po upotrebi nakon srebra. Iako je elementaran bakar rijetko zastupljen u prirodi možemo ga pronaći u obliku sulfidnih, oksidnih i karbonatnih ruda [29].

Bakar se u periodnom sustavu elemenata nalazi u četvrtoj periodi i u jedanaestom stupcu. Njegov atomski broj je 29, relativne atomske mase 63,54. Taj crvenkast i mekan teški metal s gustoćom od $8,92 \text{ g/cm}^3$. Talištem na $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ je najbolji vodič toplinske i električne energije nakon srebra. Otporan je prema koroziji, no nakon dugotrajnog stajanja na vanjskim uvjetima se na površini stvara zeleni oksidacijski sloj (patina) [28].

Zbog visoke tehnologije i modernizacije primjene bakra trebaju mu se poboljšati svojstva. To se postiže postupkom legiranja, spajanjem dvaju ili više metala u jedno. Bakar u kombinaciji s drugim metalima pruža legure koje nam služe gotovo za svaku primjenu. Postoji više od 400 bakrenih legura, svaka s jedinstvenom kombinacijom svojstava koja odgovaraju mnogim primjenama, proizvodnim procesima i okruženjima.

Danas bakar i legure bakra daju značajan doprinos najnovijim dostignućima u obnovljivoj energiji, informacijskoj i komunikacijskoj tehnologiji, zdravstvu i sanitarnim uvjetima. Proizvodnja i uporaba bakra također su vitalni dijelovi našeg gospodarstva. Bakar je jednostavno neophodan za život. Legure bakra dijelimo na: legure bakra i cinka tzv. mjedi te legure bakra bez cinka većinom tzv. bronce.

Mjed je slitina bakra i cinka. Ujedno je i najprimjenjivija legura bakra. Sadrži do 40 % cinka i mali postotak olova. U sebi može sadržavati ostale elemente poput Al, Sn, Ni, Fe, Mn i S te se takve mjedi nazivaju specijalnim mesinzima te im daju određene karakteristike. Mjed je mekši od bronce, tvrdi od bakra i cinka te izrazito otporan na koroziju ako sadrži više od 85 % bakra zbog čega se lakše obrađuju izvlačenjem, valjanjem i savijanjem. Mjed svoju ulogu ima od pretpovijesnih vremena sve do danas. Njegova upotreba spominje se u Bibliji te se proteže sve do danas gdje se koristi u proizvodnji vodovodnih komponenti (slavina), glazbenoj industriji (žice), građevinarstvu te izradi nakita.

Bronca je legura koja pretežno sadrži do 60 % bakra s dodatkom raznih legirajućih elementima (fosfor, cink, silicij, aluminij i najčešće kositar). Što se tiče podjele prema primjenama i sastavu možemo razlikovati nekoliko vrsta: kositrena, bakrova, fosforna, silicijeva, aluminijeva, niklova, manganska, strojarska i bronca za lijevanje. Po primjenama se bronca znatno razlikuje po njezinim svojstvima. Ključna razlika između bakra i bronce je ta da, kao prvo broncu možemo prepoznati po njezinoj zamućeno zlatnoj boji te na njezinoj površini nizove malog prstenja koji se njome protežu što može ukazivati da može biti centrifugalno lijevan.

Broncu se najčešće koristi u izradi brojnih likovnih djela kao što su skulpture, a sa industrijske perspektive se može koristiti u izradi ležajeva zbog njezinog niskog trenja s drugim metalima. Također, bronca se primjenjuje u brojnim nautičkim primjenama zbog njezine otpornosti prema koroziji [30].

4.2.2. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra

Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra specifične su po visoko temperaturno stabilnoj β -fazi, s povišenim temperaturama martenzitne fazne transformacije (ponajprije temperature početka nastanka martenzita, M_s) iznad $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura M_s ima tendenciju porasta s porastom sadržaja aluminija. Dodatak male količine srebra leguri CuAl povećava tvrdoću legure i poboljšava otpornost na naponsku koroziju. Malim dodatkom berilija u leguru CuAl blizu eutektoidnog sastava dolazi do stabilizacije β -faze i snižavanja M_s , dok se sama priroda martenzitne transformacije ne mijenja [3].

Legure na bazi bakra komercijalno su privlačne za primjenu ponajprije kao zamjena za skupe legure NiTi u nemedicinskim uvjetima primjene. Ipak, one imaju ograničavajuće faktore za industrijsku primjenu legura s prisjetljivosti oblika na bazi bakra, a to su: niska toplinska stabilnost, krhkost i nezadovoljavajuća čvrstoća [31].

Legure s prisjetljivosti oblika dijele se na dvije velike skupine: bakreni materijali CuAl (Be, Zn itd.). Fazna transformacija između početne faze pod nazivom austenit (A) i završne faze nazvane martenzit (M) je zadužena za pojavu prisjetljivosti oblika kod ovih legura [32]. Takva transformacija je opisana kao termoelastična [3].

Legure s prisjetljivost oblika na bazi bakra su pokazale svoj potencijal zbog dobrog oporavka oblika, jedinstvene izrade, izvrsne toplinske i električne vodljivosti. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra se mogu proizvesti kovencionalnim metalurškim postupcima poput hidrometalurgije te metalurgija praha. Zbog male razine reaktivnosti ne zahtijevaju posebni zaštitu okoliša. Visok koeficijent prigušenja, mala histereza, veliki superelastični efekt i širok raspon temperatura transformacije samo su neke od potencijalnih prednosti primjene legura s prisjetljivosti oblika na bazi bakra. Osnovna podjela legura s prisjetljivosti oblika na bazi bakra je na legure sastava CuSn, CuZn i CuAl koje se mogu dodatno modificirati s još jednim ili dva elementa čineći pri tome trokomponente ili četverokomponentne legure [33].

4.2.3. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na CuAlZn leguru

CuAlZn legura je druga legura po proizvodnji odmah nakon NiTi. Jeftinija je i jednostavnija u usporedbi s NiTi, ima bolju toplinsku i električnu vodljivost te veću duktilnost [3].

Cink se kod ove legure koristi zbog niskih troškova i široke dostupnosti na tržištu. Tipični sastav legure je 15-30 % Zn, 3-7 % Al i Cu je ostatak. Dodatak malih količina (obično manje od 1 %) bora, cerija, kobalta, željeza, titana, vanadija i cirkonija obično se dodaje za kontrolu veličine zrna. Upotreba legirajućih elemenata za kontrolu rasta zrna smanjuje veličinu zrna i prevladava probleme krhkosti. Međutim, mikrolegirajuće elemente treba dodavati pažljivo jer mogu narušiti stabilnost konstrukcije, utječući tako na karakteristike prisjetljivosti oblika. CuAlZn legura se može transformirati u martenzitnu fazu na temperaturi ispod sobne temperature, te dodatkom aluminija leguri se znatno povećava temperatura transformacije. Proces proizvodnje CuAlZn legura je strogo kontroliran jer su temperature transformacija vrlo osjetljive na promjenu kemijskog sastava, a postoji i mogućnost za gubitak cinka tijekom procesa taljenja. CuAlZn legura odlično podnosi maksimalno mehaničko opterećenje do 200 MPa, zbog relativno niskog kritičnog naprezanja tijekom klizanja. Ove legure imaju odlična svojstva pseudoelastičnosti i efekta prisjetljivosti te im oporavak istezanja nakon deformacije iznosi oko 3-4 % [3, 34].

Legure CuZnAl s prisjetljivosti oblika značajno su osjetljive na prisjetljivosti oblika u određenom području kemijskog sastava. One imaju β -faznu prostorno centriranu kubičnu strukturu, (engl. bcc, body-centered cubic) koja je stabilna na visokim temperaturama. Tipičan proces za ovakve legure je da se toplinski obrađuju kako bi opstale u toj β -fazi. Nakon toga se rashlađuju u vodi kako bi iz β -faze prešle u martenzit [10]. Legure CuZnAl imaju vrlo veliku tendenciju raspada na ravnotežne faze tijekom pregrijavanja pa je potrebna stabilizacija martenzita.

Visokotemperaturna β -faza je neuređene prostorno centrirane kubične strukture. Nakon brzog hlađenja na sobnu temperaturu nastaje složena struktura B2 i D03 (ili L21) koja se zatim transformira u martenzit 9R (6M) ili 18R (6M) daljnjim hlađenjem ili bez njega, ovisno o

sastavu legure. Povećanjem sadržaja aluminijske β -faze je podložna raspadu na α -fazu (primarnu čvrstu otopinu Cu, fcc (engl. fcc, face centered cubic) i γ -fazu (Cu_5Zn_8 , kubična struktura) pri 427 °C [27]. Prisutnost elemenata poput kobalta, cirkonija, bora ili titana nužna je za dobivanje zrna od 50 do 100 μm . Bor se dodaje kako bi se poboljšala duktilnost legure s prisjetljivosti oblika [35].

Za legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra korišteno je nekoliko mikroelemenata. Wang i suradnici potvrdili su utjecaj cirkonija, titana, bora i željeza na smanjenje i stabilizaciju zrna u leguri CuZnAl. Morriset potvrdio je utjecaj istodobne upotrebe mangana i bora na termoelastične učinke i tematska svojstva CuAlNi sustava [36].

Učinci sekundarne rekristalizacije veći su u leguri s dodatkom željeza nego u leguri s dodavanjem bora. Energija aktiviranja rasta zrna smanjuje se 60 % u leguri s dodatkom željeza, naspram 54 % u leguri s borom. Rezultati dobiveni TiB pokazali su da titan povezan s borom nije toliko učinkovit kao bor koji se koristi zasebno. Rezultat od 80 kJ/mol, procijenjen na aktiviranje energije zrna, opravdava nužnost novih pokusa, jer parametre skrućivanja treba bolje kontrolirati [36].

4.2.4. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na CuAlNi leguru

CuAlNi legure s prisjetljivosti oblika su vrlo popularne legure zbog svog širokog raspona radnih temperatura transformacije i male histereze. CuAlNi su ujedno i jedine legure s prisjetljivosti oblika koje se mogu koristiti na temperaturama blizu 200 °C, što im čini veliku prednost u odnosu na legure poput CuZnAl i TiNi čije su maksimalne radne temperature oko 100 °C. Iako CuAlNi ima bolju toplinsku stabilnost i višu radnu temperaturu, praktična primjena je ograničena zbog visoke elastične anizotropije i veličine zrna [37]. Dodatkom legirajućih elemenata poput Ti, Mn, Fe, Zr i B u leguri se poboljšavaju duktilnost, smanjuje veličina zrna te osobito dodatkom Mn termoelastičnost i pseudoelastičnost [38].

Za leguru CuAlNi najčešći je mikrolegirajući element titan, koji stvara precipitate γ -faze ($(\text{Cu,Ni})_2\text{TiAl}$) koji sprječavaju porast zrna. Mangan se kao legirajući element dodaje zbog povećanja duktilnosti legura CuAlNi, te je odgovoran za proširenje β -faznog područja i poboljšanje termomehaničkih svojstva legura s prisjetljivosti oblika [26].

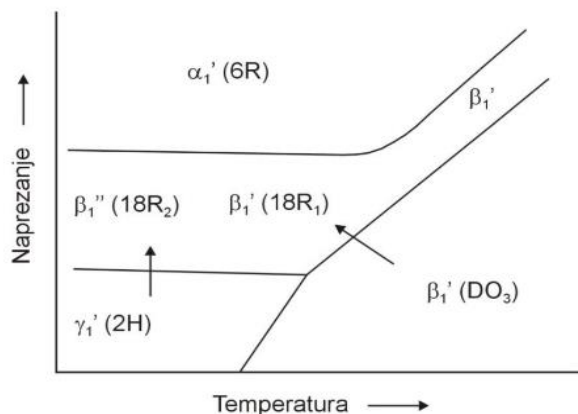
CuAlNi legura u praktičnoj primjeni je ograničena jer ima slabu obradivost i osjetljiva je na interkristalni lom. Visoka elastična anizotropija i precipitacija krhke γ_2 faze (Cu_9Al_4) proizlazi iz hipereutektoidnog sastava legure i povećanja zrna kada je legura otapajuće žarena na visokim temperaturama u β -faznom području. Rezultat žarenja je smanjenje duktilnosti i obradivosti legura. Područje β -faze uvelike ovisi o kemijskom sastavu legure na što veliki utjecaj ima omjer elektron/atom (e/a). Pri tom je β -fazno područje najstabilnije kada je omjer $e/a = 1,48$. Kod CuAlNi legura omjer e/a je uvijek $>1,48$ (3-5 % Ni, 11-14 % Al) pa se precipitacija vrlo krhke γ_2 faze ne može izbjeći [26]. Porast zrna i prisutnost krhke γ_2 faze u polikristalnoj CuAlNi leguri uzrokuje krhkost i povećava sklonost prema interkristalnom lomu tijekom obrade.

Dodatak legirajućih elemenata, kao npr. mangana u količini od 2 %, zamjenjujući udio aluminijske, otežava eutektoidnu reakciju $\beta_1 \rightarrow \alpha + \gamma_2$ uz održavanje potrebnih transformacijskih temperatura. Količina titana od 1 % utječe na smanjenje veličine zrna i smanjuje interkristalni lom. Nikal u ternarnoj leguri omogućuje usporavanje difuzije bakra i aluminijske, stoga tijekom hlađenja dolazi do zadržavanja jednofaznih uvjeta dok se ne dosegne M_s temperatura.

Veća količina nikla s druge strane utječe na krhkost legure i pod tim utjecajem se povećava i eutektoidna točka koja se pomiče prema većem udjelu aluminija. Većom sadržajnom strukturom aluminija povećava se stabilnost martenzita, ali i pada temperatura faznih transformacija, pa je optimalni sastav legure Cu-(11-14)Al-(3-4,5) Ni /(mas.%) [35].

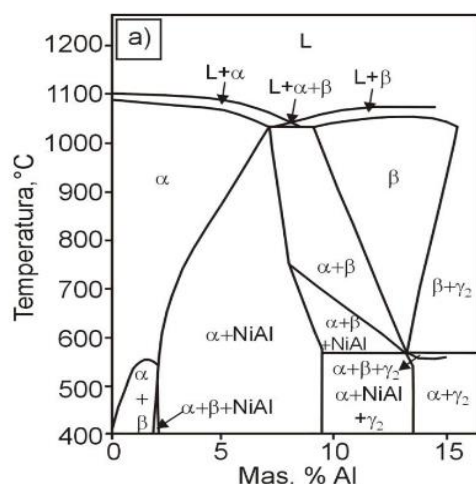
Ovakve legure imaju bolju toplinsku stabilnost i više radne temperature od drugih legura s prisjetljivošću oblika jer specifične temperature martenzitnih transformacija su od -200 °C do 200 °C i ovise o udjelu aluminija i nikla, gdje aluminij igra znatno važniju ulogu i ima veći utjecaj. Pojava toplinski induciranog martenzita isključivo ovisi o kemijskom sastavu. Martenzit induciran naprezanjem, odnosno deformacijom ovisi isključivo o kristalografskoj orijentaciji, temperaturi ispitivanja i vrsti naprezanja. Proces stabilizacije svodi se na homogenizacijsko žarenje u β -faznom području i nužan je, kako bi se inducirala reverzibilna martenzitna transformacija [3].

Kod CuAlNi legura s prisjetljivošću oblika iz početne austenitne β faze mogu nastati dva tipa toplinski induciranog martenzita 18R (β_1') i 2H (γ_1'), što ovisi o kemijskom sastavu legure, toplinskoj obradi i uvjetima naprezanja. Kod legura s niskim sadržajem aluminija (11-13 mas. %), hlađenjem nastaje 18R martenzit. Viši sadržaj aluminija (>13 mas. %) osigurava nastajanje 2H martenzita. Ukoliko je kemijski sastav takav da je na granici između nastanka oba martenzita, tada oba mogu postojati u mikrostrukturi. S druge strane, oba martenzita pokazuju različite transformacijske karakteristike [3]. Uz ove dvije navedene vrste martenzita postoje i druge (α_1' i β_1'') prikazane na slici 8.

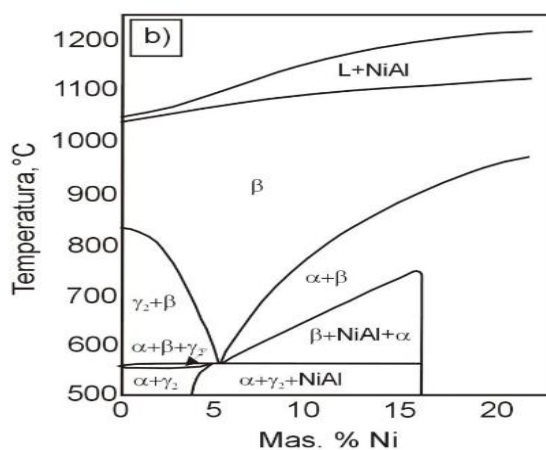


Slika 8. Vrste martenzita koji se pojavljuje u CuAlNi leguri s prisjetljivosti oblika [10]

Slika 9 prikazuje fazni dijagram legure CuAlNi pri vertikalnom presjeku kod 3 % Ni, dok je na slici 10 prikazan fazni dijagram CuAlNi legure pri vertikalnom presjeku kod 14 % Al.



Slika 9. Vertikalni presjek faznog dijagrama CuAlNi legure pri 3 mas. % Ni [3]

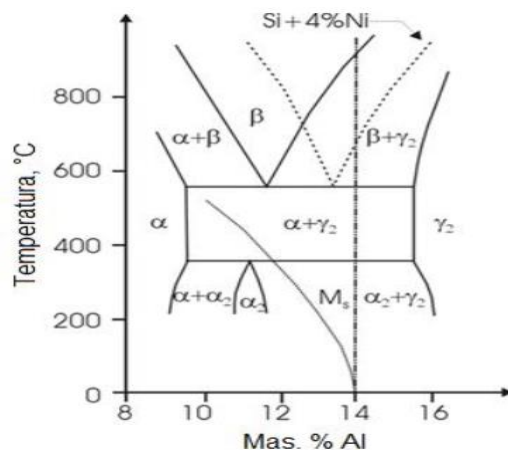


Slika 10. Vertikalni presjek faznog dijagrama CuAlNi legure pri 14 mas. % Ni [3]

U ravnotežnom stanju pri temperaturi 565 °C i 11,8 mas. % aluminija β faza s volumno-centriranom kubičnom rešetkom raspada se na α fazu (primarna čvrsta otopina aluminija i nikla u bakru, fcc strukture) i γ_2 fazu. Krhke faze kao što su γ_2 faza (kubična intermetalna faza Cu_9Al_4) i NiAl (bcc strukture) počinju precipitirati tijekom izlaganja legure ispod eutektoidne temperature. Brzim hlađenjem iz β faznog područja eutektoidni raspad je zaustavljen i odvija se martenzitna transformacija [3].

Na slici 11 isprekidanom krivuljom prikazan je položaj za CuAl legure s 4 mas. % nikla. Povećanjem sadržaja aluminija na 14 mas. %, smanjuje se M_s temperatura na oko 50 °C. Iznad ove koncentracije od 14 mas. % Al, martenzit nastaje u obliku 2H kristalne rešetke (umjesto 9R, kao što je slučaj sa CuZnAl koja je previše bogata aluminijem) te legure postaju krhke.

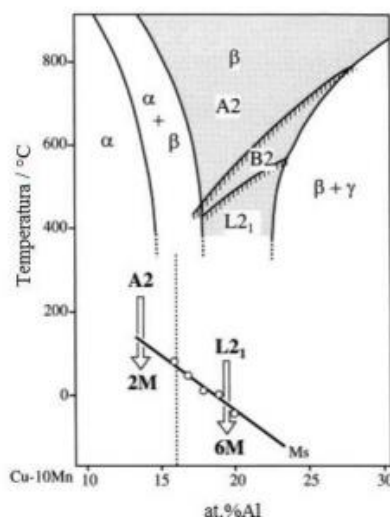
Gledajući u praktičnom smislu, kod legura CuAlNi M_s temperatura smije biti niža od 50 °C, ali opet s druge strane te legure imaju dobru otpornost i na visoke temperature do oko 200 °C. Stoga su dobro prilagođene za područja primjene gdje je nužno da efekt prisjetljivosti oblika može podnesti visoke temperature, ali uz napomenu da je uvijek iznad 50 °C [3].



Slika 11. Vertikalni presjek faznog dijagrama CuAl legure s 4 mas. % Ni [10]

4.2.5. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na CuAlMn leguru

CuAlMn legure s prisjetljivosti oblika su poznate po povećanoj duktilnosti i deformabilnosti s udjelom aluminija u kemijskom sastavu manjim od 18 %. Na slici 12 je prikazan vertikalni presjek CuAlMn legure.



Slika 12. Vertikalni presjek faznog dijagrama CuAlMn legure pri 10 at.% Mn [39]

Pri nižem udjelu aluminija, zbog početne austenitne faze koja posjeduje nizak stupanj pravilne raspoređenosti, oporavak od deformacije je lakši i pridonosi u korist martenzitnoj transformaciji [40]. Dodatkom legirajućih elemenata CuAlMn leguri se povećavaju osnovne karakteristike prisjetljivosti kao što su: superelastičnost, efekt prisjetljivosti oblika te dvosmjerni efekt prisjetljivosti oblika [41]. Pri temperaturi od 300 °C CuAlMn leguri se povećavaju krutost i čvrstoća tijekom umjetnog starenja [5]. Optimalan sastav legure CuAlMn je Cu-17 at.% Al-Mn (Mn je 10 – 13 at.%).

Dodatkom nikla CuAlMn leguri učinkovito se postiže sitnozrnata struktura i superelastičnost kod određenih temperaturnih područja [5]. Temperature faznih transformacija CuAlMn legura također se snižavaju dodavanjem Sn, Ni, Ag, Co, Ti, a povišuju se dodavanjem Au, Zn i Si [42]. Dodavanje cirkonija u CuAlMn legure nema značajan utjecaj na temperature faznih transformacija, već utječe na smanjenje veličine zrna [43].

Uslijed termoelastične martenzitne transformacije CuAlMn legure s prisjetljivosti oblika pokazuju veliku sposobnost prigušenja vibracija kada je omjer ili količina Cu/Mn konstantan [44].

4.3. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na legure s prisjetljivosti oblika na bazi željeza

4.3.1. Legure na bazi željeza

Legure s prisjetljivosti oblika na bazi željeza predstavljaju grupu legura koje imaju najmanje istaknut efekt prisjetljivosti oblika u odnosu na legure na bazi bakra ili nikla. Ove legure ekonomičnije su za izradu (niže su cijene) u odnosu na NiTi legure. Postoji velika mogućnost njihove primjene u određenim uvjetima kao zamjena za leguru NiTi [31].

Kod legura s prisjetljivosti oblika na bazi željeza također dolazi do martenzitne fazne transformacije, tj. plošno centrirana kubična rešetka transformira se u prostorno centriranu tetragonsku strukturu odnosno plošno centrirana kubična rešetka transformira se u heksagonsku. Jedna od najpoznatijih legura na bazi željeza je FeMnSi legura. Kod ove legure se odvija netermoelastična martenzitna transformacija, a ona dovodi do nepotpunog jednosmjernog efekta prisjetljivosti oblika. Uz FeMnSi leguru postoje još i druge legure na bazi željeza, a to su: FePt, FePd, FeMnSi, FeMnAl, FeNiC i FeNiCoTi.

Glavna prednost legura na bazi željeza je dobra obradivost, međutim nedostatak je slaba pseudoelastičnost. Poboljšanjem korozijske otpornosti dodatkom kroma i nikla umanjuje se efekt prisjetljivosti oblika. U legurama na bazi željeza efekt prisjetljivosti oblika može nastati jednostavnim promjenom kristalne strukture i promjenom volumena. Poboljšanje efekta prisjetljivosti oblika u legurama FeMnSi može se postići mikrolegiranjem ugljikom i dušikom. Utjecaj ugljika može se objasniti povećanjem granice razvlačenja zbog usporavanja kretanja dislokacijskih ravnina. Poboljšanje čvrstoće legura na bazi željeza, može se postići precipitacijskim očvršćivanjem [3].

Ove legure pokazuju veliku transformacijsku histerezu koja ograničava njihovu primjenu u različitim područjima. Legure s prisjetljivosti oblika na bazi željeza podvrgavaju se i termoelastičnoj i termoneelastičnoj transformaciji iz austenitne strukture u martenzitnu strukturu zavisno o sastavnim elementima legure [5].

4.3.2. Utjecaj silicija na FeMnSi leguru

FeMnSi legure pokazuju veći potencijal u komercijalnoj primjeni [34]. Silicij se primarno dodaje zbog toga što povećava efekt prisjetljivosti oblika te povećava iznos kritičnog naprezanja u austenitu. Kada su podvrgnute ponavljajućim termomehaničkim obradama, ove legure imaju potpun efekt prisjetljivosti oblika. Deformacije prilikom transformacije faza iznose između 2,5 % i 4,5 %. Ova legura je postala najistraživijom legurom na bazi željeza unatoč širokoj toplinskoj histerezi, uglavnom zbog niskih troškova i lakoće u proizvodnji i povezivanju s drugim materijalima [5]. Kapacitet prisjetljivosti oblika varira ovisno o

temperaturama žarenja. Visoke temperature pospješuju transformaciju austenita u epsilon martenzit zbog smanjivanja gustoće dislokacija u strukturi, dok niske temperature žarenja degradiraju transformaciju. FeMnSiCr i FeMnSiCrNi legure su učestale legure ove grupe te imaju povećan postotak oporavka od deformacije. FeMnSi legure pokazuju poboljšani oporavak od deformacije ukoliko se podvrgnu odgovarajućem toplinskom treningu, legiranju i obradi. Međutim ova legura ne pokazuje svojstvo superelastičnosti zbog toga što prilikom martenzitne transformacije austenit prelazi u epsilon martenzit.

4.3.3. Utjecaj kobalta i titana na FeNiCoTi leguru

FeNiCoTi legure efekt prisjetljivosti oblika u ovoj leguri se promatra nakon toplinske obrade (starenja) u austenitnoj fazi kako bi nastale dvije fazne strukture austenita te koherentnih uključaka $(\text{Ni}, \text{Co})_3\text{Ti}$ [5]. Precipitacija finih čestica $(\text{Ni}, \text{Co})_3\text{Ti}$ je uvjet za pojavu efekta prisjetljivosti oblika kod ove legure. Rezultat toga je smanjenje toplinske histereze, a smicanjem ovih čestica nastaje tetragonalna martenzitna struktura. Veći udio kobalta u kemijskom sastavu ove legure osiromašuje leguru od nikla i sprječava precipitaciju $(\text{Ni}, \text{Co})_3\text{Ti}$. Toplinski obrađena FeNiCoTi legura ima tendenciju da bude krhka zbog taloženja precipitata na granicama zrna te se na taj način smanjuje deformabilnost legure.

Nedavno provedena istraživanja su potvrdila visoku superelastičnost kod novih legura na bazi željeza [18]. Superelastičnost veća od 13 % zapažena je kod legure Fe - 28Ni - 17Co - 11,5Ti - 0,05B, te veća od 6 % kod legure Fe - 34Mn - 15Al - 7,5Ni [10]. Međutim, slab oporavak od deformacije je prisutan kod svih legura s prisjetljivosti oblika na bazi željeza. To je uzrokovano interakcijama između naprezanjem nastalog martenzita i velikog broja dvojnika. Smanjenje gustoće dvojnika može pomoći povećanju postotka oporavka od deformacije.

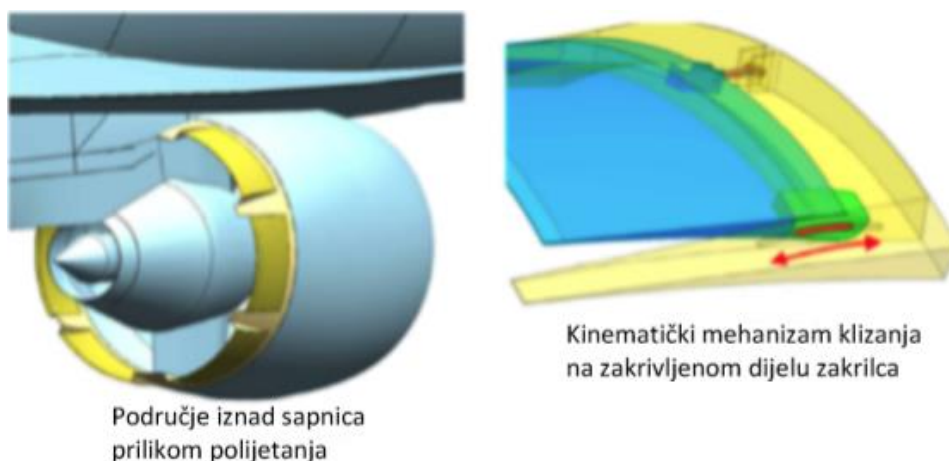
5. PRIMJENA LEGURA S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA

Legure s prisjetljivosti oblika su vrlo rasprostranjene u različitim granama industrije i gospodarstva. Tako se legure s prisjetljivosti oblika primjenjuju u strojarскоj i automobilskoj industriji, za izradu različitih osjetila u kontrolnim sustavima te ponajviše u medicini za izradu različitih implantata i proteza [45].

Sve je veća primjena legura s prisjetljivosti oblika i u invazivnoj kirurgiji, posebice u proizvodnji medicinskih uređaja poput stenta, žica vodiča i uređaja za filtraciju. Karakteristike efekta prisjetljivosti oblika i superelastičnosti čine ove legure pogodnim za navedene primjene. Unatoč razvoju različitih materijala u medicini korištenje metalnih implantata je još uvijek jedno od najvažnijih komercijalnih primjena. Legure s prisjetljivosti oblika su pogodne za širok raspon biomedicinskih uređaja te su našle primjenu u stomatologiji, koštanoj zamjeni, urologiji i kardiologiji [45].

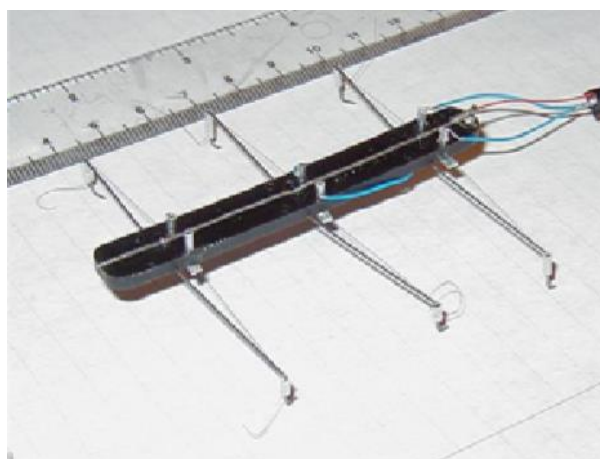
Legure s prisjetljivosti oblika svoju komercijalnu primjenu ponajprije nalaze u inženjerstvu i medicini. U inženjerstvu ove legure svoju primjenu nalaze ponajprije u aeronautičkoj i svemirskoj industriji, automobilskoj industriji, robotici, građevinarstvu te u području vodne i mjerne tehnike. U medicini se ove legure koriste najviše u području ortopedskih pomagala te u dentalnoj kirurgiji, dok dobar dio otpada i na oftalmologiju, tj. područje optike [46].

Kod industrijske primjene može se posebice istaknuti otkriće geometrijski varijabilnog usisnika kod mlaznih motora koji je prikazan na slici 13 [46].



Slika 13. Velika pomična zakrilca s VAFN konceptom [47]

Korištenje legura s prisjetljivosti oblika u robotici je još uvijek u eksperimentalnom razvoju i eventualno je interes raznih hobista kao što je primjerice robot “Stiquito” (slika 14). To je inače "hexapod" koji služi za edukativne svrhe kojeg koriste edukacijske ustanove od srednjih škola do sveučilišta od 1992. godine. Njegove “noge” tj. kraci izrađeni su od “nitinol” legure [46].



Slika 14. Stiquito robot čije su “noge” izrađene od NiTi legure s prisjetljivosti oblika [48]

Građevinarska industrija je našla dosta kvalitetnu primjenu legura s prisjetljivosti oblika i to u obliku inteligentnog pojačivača betona tj. betonske konstrukcije koja poprima oblik naprezanja kojemu je podvrgnuta (engl. IRC “Intelligent Reinforced Concrete”). Armatura napravljena od legure s prisjetljivosti oblika ima sposobnost za “osjećaj” tj. reakciju na mjestima gdje se pojavi pukotina. Eksperimenti su pokazali da takva betonska konstrukcija smanjuje makropukotine tj. ima sposobnost da povрати prvobitni oblik kakav je imala prije nastanka pukotine. Sljedeća primjena je u mostogradnji gdje se koristi efekt prigušenja vibracija koji je jedna od glavnih značajki legura s prisjetljivosti oblika. U industriji cijevi legure s prisjetljivosti oblika našle su primjenu u naftnoj industriji, u vodnoj infrastrukturi kao i u kućanstvima [46].

Telekomunikacijska industrija koristi legure s prisjetljivosti oblika u proizvodnji pametnih mobitela koji za autofokusiranje koriste mehanizam temeljen na tehnologiji ovih legura, te je još nekoliko svjetski poznatih kompanija uzelo u razmatranje njihovo korištenje u području tehnologije stabilizacije snimanja tzv. OIS modula [46].

Medicina je doživjela pravu revoluciju pojavom legura s prisjetljivosti oblika pa se tako one koriste kao fiksatori kod osteotomijskog operativnog zahvata, zatim kod zubnih proteza kako bi preuzele otpor kojeg stvara često pomicanje čeljusti i tako omogućile protezi gotovo prirodne pomake, u kardiovaskularnoj kirurgiji kao stentovi (uređaji koji proširuju krvne žile začepljene plakom) itd. Posebno se kod stentova (slika 15) pokazala izuzetno korisna mogućnost termalne ekspanzije takvih legura s prisjetljivosti oblika iz razloga što temperatura tijela regulira potrebnu ekspanziju stenta, a sposobnost prilagodbe oblika omogućuje savršeno prijanjanje na stijenku krvne žile. Isto tako, stentovi su se pokazali vrlo korisni kod karcinoma jednjaka gdje pacijentima omogućuju normalan unos hrane unatoč leziji koja je blokirala jednjak i to na način da proširuju suženje jednjaka pa tako omogućuju pacijentu bolju kvalitetu života [46].



Slika 15. Primjer medicinskog stenta izrađenog od NiTi legure s prisjetljivosti oblika [48]

Više od 50 % svih ugrađenih stentova temelje se na NiTi leguri s prisjetljivosti oblika, s time da će ova vrsta legure postati gotovo jedini izbor medicine u godinama koje dolaze [46]. Kada se govori o oftalmologiji tj. o grani oftalmologije koja se bavi izradom pomagala kao što je optika, tu prednjače okviri za naočale isto tako izrađeni od legure s prisjetljivosti oblika na bazi nikla i titana. Ovo omogućuje visoku zaštitu stakala kojeg pružaju sami okviri u slučaju da naočale padnu s određene visine [46].

Može se spomenuti i uporaba legura s prisjetljivosti oblika kod esencijalnog tremora uzrokovanog neurodegenerativnim bolestima kao što je Parkinsonova bolest. Za pacijente kojima je bio problem držati čač i žlicu u ruci razvijena je tzv. “Liftweare” žlica koja radi na principu detekcije tremora pomoću akcelerometra čiji odaziv omogućuje aktivator izrađen od legure s prisjetljivosti oblika. To znači da uporabom takvog materijala, unatoč tremoru tj. izuzetno drhtavim rukama, pacijent može bez prevelikih poteškoća držati žlicu uspravno [46].

6. ZAKLJUČAK

Legure s prisjetljivosti oblika počinju se intenzivno proučavati u 60-tim godinama 20. stoljeća. Temelj ovih legura je fazna transformacija visoko temperaturne faze austenita u toku hlađenja u niskotemperaturnu fazu tzv. termoelastični martenzit. Osnovno njegovo svojstvo je visoka elastičnost. Zagrijavanjem legura se ponovo vraća u visokotemperaturnu fazu, austenit, i u prvobitan oblik.

Zamijećeno je da kod legura s prisjetljivosti oblika na bazi nikla dodatkom cirkonija u NiTi leguru dolazi do poboljšanja otpornosti na koroziju, značajnog utjecaja na mikrostrukturu, svojstva prisjetljivosti oblika te vrijednosti tvrdoće legure. Također dodatkom hafnija ili cirkonija dolazi do porasta karakterističnih temperatura pretvorbe. Dodatak željeza NiTi leguri povećava čvrstoću, te smanjuje nagli pad plastičnosti.

Utjecaj malih količina srebra na legure s prisjetljivosti oblika na bazi bakra povećava tvrdoću legura i poboljšava otpornost na naponsku koroziju, također malim dodatkom berilija u CuAl blizu eutektoidnog sustava dolazi do stabilizacije beta faze i snižavanja M_s .

Kod CuAlZn legure mali dodatak bora, cerija, kobalta, željeza, titana, vanadija i cirkonija se dodaje za kontrolu zrna te njihova upotreba smanjuje samu veličinu zrna u prevladava probleme krhkosti. Leguri CuAlNi dodatak Ti, Mn, Fe, Zr i B poboljšava duktilnost, smanjuje veličinu zrna te osobito Mn termoelastičnost i pseudoelastičnost.

Kod legura s prisjetljivosti oblika na bazi željeza je zamijećeno da dodatak legirajućih elemenata povećava superelastičnost, efekt prisjetljivosti oblika te dvosmjerni efekt prisjetljivosti oblika.

Silicij u FeMnSi leguri se dodaje zbog povećanja efekta prisjetljivosti oblika te povećanja iznosa kritičnog naprezanja u austenitu. Veći udio kobalta u kemijskom sastavu FeNiCoTi legure osiromašuje leguru niklom i sprječava precipitaciju.

7. LITERATURA

- [1] C. Lexcellent, Shape-memory Alloys Handbook, John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [2] J. Mohd Jani , M. Leary, A. Subic, M. A. Gibson, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, Materials and Design 56 (2014), 1078–1113
- [3] I. Ivanić, M. Gojić, S. Kožuh: Slitine s prisjetljivosti oblika (II. dio): podjela, proizvodnja i primjena, Kemija u industriji, 63 (2014) 9-10, 331–344.
- [4] D. Achitei, P. Vizureanu, N. Cimpoeșu, D. Dană, Thermo-mechanical fatigue of Cu-Zn-Al shape memory alloys, The 44th International Conference on Mining and Metallurgy, Bor, Serbia, 2012.,401–404.
- [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] D. Čubela, Legure koje pamte svoj oblik, Mašinstvo 2 (2002) (6), 83 – 92
- [7] A. Vračan, Analiza prijelomnih površina CuAlNi legura s prisjetljivosti oblika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2017.
- [8] A.C. Kneissl, E. Unterweger, M. Bruncko, G. Lojen, K. Mehrabi, H. Scherngell, Microstructure and properties of Ni–Ti and CuAlNi shape memory alloys, J. Metall. 14 (2008), 89–100.
- [9] D. Bajutti, Mikrostrukturna karakterizacija lijevanog ingota CuAlMn legure, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2019.
- [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] D. C. Lagoudas, Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications, Springer, Texas, USA, 2008.
- [12] J. Pranjic, Mikrostrukturna analiza Cu-Al-Mn-(Ti) traka s efektom prisjetljivosti oblika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2018.
- [13] B. Iličić, Lijevanje osovine od aluminijske legure, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [14] F. Unkić, Z. Glavaš, Osnove lijevanja metala-zbirka riješenih zadataka, Metalurški fakultet, Sisak, 2009
- [15] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Lijevanje> (10.06.2021.)
- [16] https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_8/advanced/a8_4_1.html (06.07.2021.)
- [17] A. Stambolić, I. Anžel, G. Lojen, A. Kocijan, M. Jenko, R. Rudolf, Continuous vertical casting of a NiTi alloy, Materiali in Tehnologije, 50 (2016) 981-988.
- [18] J. Malcolm Gray, F. Siciliano; High Strength Microalloyed Linepipe: Half a Century of Evolution; Microalloyed Steel Institute; Houston TX, 2009.
- [19] D. Rašić, Analiza makro i mikrostrukture zavara čelika API 5L X80, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [20] <https://www.nickel-alloys.net/> (20.04.2021.)
- [21] M. Carl, J.D.Smith, B. Van Doren, M.L. Young, Effect of Ni-Content on the Transformation Temperatures in NiTi-20 at. % Zr High Temperature Shape Memory Alloys, Metals, 2017, 511.
- [22] <https://link.springer.com/article/10.3103/S1067821217050078> (10.06.2021.)
- [23] <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0604> (06.07.2021.)
- [24] https://www.researchgate.net/publication/272251247_NiTiHfbased_shape_memory_allos (10.06.2021.)
- [25] http://metalling.ir/article_35765.html (10.06.2021.)
- [26] https://www.researchgate.net/publication/316443179_Influence_of_Fe_Addition_on_Phase_Transformation_Microstructure_and_Mechanical_Property_of_Equiatomic_NiTi_Shape_Memory_Alloy (12.06.2021.)

- [27] ZHANG Yan-qiu, JIANG Shu-yong, ZHU Xiao-ming, ZHAO Ya-nan, LIANG Yu-long, SUN Dong, Influence of Fe addition on phase transformation behavior of NiTi shape memory alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 27(2017) 1580-1587.
- [28] <https://www.neotehnika.rs/blog/item/7-bakar-bronza-mesing-legure?fbclid=IwAR0f7WijQLJfYslyW5QeHL51RGlgfZ05pYcEKbQBUuVt1bTSTN8eYsyUpg> (12.06.2021.)
- [29] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=5344&fbclid=IwAR0fSLzus-CmT3DEReMmPaFBWioH0KamTtVjldroIOqA4R7x2QeXJVUmyPg> (12.06.2021.)
- [30] <https://www.metalsupermarkets.com/difference-between-copper-brass-bronze/> (13.06.2021.)
- [31] U. Sari, T. Kirindi Effects of deformation on microstructure and mechanical properties of a Cu-Al-Ni shape memory alloy, Materials Characterization 59 (2008) 920-929.
- [32] C. LExcellent, Shape-memory Alloys Handbook, Wiley, London, UK, 2013.
- [33] Y. Sutou, T. Omori, J. Wang, R. Kainuma and K. Ishida. Characteristics of Cu–Al–Mn-based shape memory alloys and their applications. Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing 378 (2004) 278-282.
- [34] D. C. Lagoudas, Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications, Springer, Texas, USA, 2008.
- [35] 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, Mechanical Materials, 38 (2006) 391–4297.
- [36] R.A. Sanguinetti Ferreira, E.P. Rocha Lima, A. Aquino Filho, N.F. de Quadros, O. Olimpio de Araújo, Y.P. Yadava, Microstructural evolution in a CuZnAl shape memory alloy: Kinetics and morphological aspects, Materials Research 3 (2000) 119-123.
- [37] J.I. Pérez-Landazábal, V. Recarte, V. Sánchez-Alarcos, M.L. Nó, J. San Juan, Study of the stability and decomposition process of the β phase in Cu–Al–Ni shape memory alloys, Materials Science and Engineering: A, 438–440 (2006), 734-737.
- [38] U.Sari, T. Kirindi, F. Ozcan, Effects of aging on the microstructure of a CuAlNiMn shape memory alloy. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials 18 (2011), 430.
- [39] 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 23 Engineering, Tohoku University, Materials Science and Engineering 273–275 (1999), 375 – 379.
- [40] V. Džomba, Utjecaj žarenja na svojstva kontinuirano lijevane Cu - Al legure, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2018.
- [41] I. Škrinjarić, Utjecaj toplinske obrade na mehanička svojstva CuAlMn legure s prisjetljivosti oblika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2017.
- [42] T. Holjevac Grgurić, D. Manasijević, D. Živković, Lj. Balanović, S. Kožuh, R. Pezer, I. Ivanić, I. Anžel, B. Kosec, L. Vrsalović, M. Gojić, Thermodynamic Calculation of Phase Equilibria of the Cu-AlMn Alloys, Proceedings on Metallic and Non-metallic Materials, Zenica, 2016, 83-90.
- [43] M. Storić, Utjecaj koncentracije kloridnih iona na koroziju CuAlMn legure, Završni rad, Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2017.
- [44] 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.
- [45] M. Selanec, Utjecaj valjanja i toplinske obrade na svojstva Cu-Al-Mn legure s prisjetljivosti oblika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2017.
- [46] https://en.wikipedia.org/wiki/Shape-memory_alloy (12.06.2021.)
- [47] <http://www.medicalexpo.com/prod/ella-cs/product-78568-489956.html> (12.06.2021.)
- [48] <https://en.wikipedia.org/wiki/Stiquito> (12.06.2021.)

POPIS SLIKA:

Slika 1. Shematski prikaz pseudoelastičnosti

Slika 2. Superelastično ponašanje legura s efektom prisjetljivosti oblika prikazano na dijagramu naprezanje-deformacija

Slika 3. Mehanizam efekta prisjetljivosti oblika

Slika 4. Prikaz kontinuiranog lijevanja

Slika 5. Prikaz Melt-spinning postupka

Slika 6. Prikaz vakuumske kontinuiranog lijevanja

Slika 7. Fazni dijagram legure NiTi

Slika 8. Vrste martenzita koji se pojavljuje u CuAlNi leguri s prisjetljivosti oblika

Slika 9. Vertikalni presjek faznog dijagrama CuAlNi legure pri 3 mas. % Ni

Slika 10. Vertikalni presjek faznog dijagrama CuAlNi legure pri 14 mas. % Ni

Slika 11. Vertikalni presjek faznog dijagrama CuAl legure s 4 mas. % Ni

Slika 12. Vertikalni presjek faznog dijagrama CuAlMn legure pri 10 at.% Mn

Slika 13. Velika pomična zakrilca s VAFN konceptom

Slika 14. Stiquito robot čije su “noge” izrađene od NiTi legure s prisjetljivosti oblika

Slika 15. Primjer medicinskog stenta izrađenog od NiTi legure s prisjetljivosti oblika

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Legure prisjetljivosti oblika

POPIS KRATICA I OZNAKA:

A – austenit

A_s – temperatura početka austenitne transformacije, °C

A_f – temperatura završetka austenitne transformacije, °C.

B2 – kubična kristalna struktura

bcc – prostorno centrirana kubična rešetka

DO3 - kristalna struktura

D024 – heksagonska kristalna struktura

fcc – plošno centrirana kubična rešetka

M_d - najviša temperatura pri kojoj martenzit više ne može biti induciran naprežanjem, °C

M_f – temperatura završetka martenzitne transformacije, °C

M_s – temperatura početka martenzitne transformacije, °C

SMA – legure s prisjetljivosti oblika

2H - oblik kristalne strukture poznate uređenosti

6M - oblik kristalne strukture poznate uređenosti

9R - oblik kristalne strukture poznate uređenosti

18R - oblik kristalne strukture poznate uređenosti

α - faza, primarna čvrsta otopina Al i Ni u bakru, fcc strukture

α_1 - koeficijent prijenosa

α_1' - martenzitna faza

β – austenitna faza

β_1 - austenitna faza

β_1' - martenzitna faza (kristalna struktura 18R)

β_1'' - martenzitna faza

γ_1' – martenzitna faza (kristalna struktura 2H)

γ_2 - kompleksna faza Cu_9Al_4 , kubične strukture

Životopis

Osobni podaci

Ime i prezime: Iva Rajić

Adresa: Tarno 8, 10310 Ivanić-Grad

Datum/mjesto rođenja: 26.03.1998., 10000 Zagreb

Mobitel: 097/964-8777

E-mail: rajiciva2603@gmail.com

Obrazovanje:

2005.-2013. Osnovna škola Đure Deželića

2008.-2013 Osnovna glazbena škola Milke Trnine, instrument: Flauta

2013.-2017. SŠ Ivan Švear, Naftno-rudarski tehničar

2017. – 2021. Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija

Znanja i vještine:

Materinski jezik: hrvatski

Ostali jezici: engleski

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

- pouzdana, odgovorna, samostalna

Radno iskustvo:

2021. – trenutno: Ministarstvo kulture, Runjaninova 2 , Zagreb.