



HITRO STRJENA ZLITINA S SPOMINOM NA OSNOVI BAKRA

Področje: **strojništvo**

Vrsta naloge: **raziskovalna naloga**

Dijaki:

Anže DEMŠAR, 2.F

Anej OKORN, 2.E

Anžej ŽAGAR, 3.D

Mentorica: **dr. Sonja KITAK** – Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana

Somentor: **prof. dr. Borut KOSEC** - Naravoslovnotehniška fakulteta

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

KAZALO

1 UVOD

2 TEORIJA

2.1 Zlitina Cu-Al-Ni-Mn

2.2 Fazne spremembe

2.2.1 Martenzitna transformacija

2.2.2 Percipitacijsko strjevanje

2.2.3 Razpad β -faze

2.3 Psevdoelastičnost

2.4 Toplotne lastnosti

2.4.1 Specifična toplota

2.4.2 Toplotna prevodnost

3 EMPIRIČNI DEL

3.1 Hipoteze

3.2 Metode raziskovanja

3.2.1 Vrstični elektronski mikroskop

3.2.2 Hot disk TPS 2200

3.2.3 Naprava za detekcijo mikrostrukturnih sprememb

3.2.4 Naprava za strjevanje na vrtečem se kotlu

3.3 Potek dela

3.3.1 Priprava vzorcev za hitro strjevanje kovinskih materialov (Melt spinner)

3.3.2 Merjenje dimenzij

3.3.3 Ogljed vzorcev pod mikroskopi

3.3.4 Analiza Mikrostrukture

3.3.5 Preizkus toplotne prevodnosti vzorcev

3.4 Razprava in rezultati raziskave

4. ZAKLJUČEK

4.1 Zahvale

5. Viri

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

KAZALO SLIK

Slika 1: Koluti zlitine Cu-Al-Ni-Mn	5
Slika 2: Fazni diagram Cu-Al-Ni-Mn.....	8
Slika 3: Vrstični elektronski mikroskop Thermo Fisher Scientific, model Quattro S (UL NTF)	19
Slika 4: Hot disk TPS 2200	20
Slika 5: Hot disk senzor 5501, 5465 in 4921	22
Slika 6: Naprava za preverjanje mikrostrukturnih sprememb in graf mikrostrukturnih sprememb.....	23
Slika 7: Melt spinner.....	23
Slika 8: Nosilec talilnega agregata za Melt spinner	23
Slika 9: Rezultati meritev toplotnih lastnosti	26

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

POVZETEK

Mehanske lastnosti in mikrostruktura zlitin s spominskim oblikovanjem na osnovi bakra so široko raziskane, vendar obstaja opazen primanjkljaj podatkov glede njihovih toplotnih lastnosti, vključno s toplotno prevodnostjo, specifično toplotno kapaciteto in temperaturno prevodnostjo. Za rešitev te vrzeli smo se osredotočili na določanje toplotnih lastnosti hitro ohlajanje zlitine.

V začetni fazi našega raziskovanja smo izvedli temeljito preiskavo in oceno delovanja naprave Hot Disk TPS 2200. Ta instrument se izstopa kot eden izmed sodobnih in vrhunskih orodij za natančno merjenje toplotnih lastnosti.

Nato smo v kasnejšem delu naše študije izvedli meritve in temeljito analizo toplotnih lastnosti hitro ohlajanje zlitine s spominskim oblikovanjem Cu-Al-Ni-Mn. Naša metodologija je sledila standardom, opisanim v ISO 22007-2, ki obsegajo ocene pri sobni temperaturi in pri povišanih temperaturah.

Ključne besede: Zlitina Cu-Al-Ni-Mn, fazne spremembe, psevdoelastičnost

ABSTRACT

The mechanical properties and microstructure of copper-based memory-forming alloys are widely studied, but there is a noticeable lack of data regarding their thermal properties, including thermal conductivity, specific thermal capacity, and thermal conductivity. To solve this gap, we focused on determining the thermal properties of fast-cooling alloys.

In the initial phase of our research, we conducted a thorough investigation and evaluation of the operation of the Hot Disk TPS 2200. This instrument stands out as one of the modern and top-of-the-range tools for accurate measurement of thermal properties.

Then, in the later part of our study, we carried out measurements and a thorough analysis of the thermal properties of the fast-cooling alloy with the memory formation Cu-Al-Ni-Mn. Our methodology followed the standards described in ISO 22007-2, which cover both room temperature and elevated temperature assessments.

Keywords: Cu-Al-Ni-Mn alloy, phase changes, pseudoelasticity

1 UVOD

Nalogo bomo razdelili na teoretični del, v katerem bomo podali enačbe in razložili materiale, s katerimi bomo delali, ter na empirični ali praktični del, v katerem bomo poizkušali s prakso razložiti podano teorijo ter naše hipoteze, pri tem si bomo pomagali z različnimi napravami, ki jih bomo tudi opisali. Na koncu bomo rezultate primerjali še z našimi hipotezami in o temi razpravljali.

2 TEORIJA

V tem delu raziskovalne naloge smo opisali splošno znana dejstva in razlage, ki smo jih pridobili med izdelavo raziskovalne naloge; nekatere izmed informacij so nam predali naši mentorji, druge pa smo poiskali v razni literaturi, spletiščih itn.

Fokus teoretičnega dela je predvsem na zlitini Cu-Al-Ni-Mn

2.1 Zlitina Cu-Al-Ni-Mn

Zlitina Cu-Al-Ni-Mn predstavlja razširitev osnovne zlitine Cu-Al-Ni z dodatkom mangana (Mn), ki je namenjena izboljšanju določenih lastnosti zlitine, kot so trdnost, trdota in odpornost proti koroziji. Mangan deluje kot element, ki poveča trdnost brez znatnega zmanjšanja plastičnosti, kar je ključno za inženirske aplikacije, ki zahtevajo visoko zmogljivost materialov.

Zlitina Cu-Al-Ni spada v skupino bakrovih zlitin, ki so znane po svojih izjemnih lastnostih, kot so dobra odpornost proti koroziji, visoka trdnost, odpornost proti obrabi in posebne l

lastnosti, povezane s spominom oblike. Glavne komponente te zlitine so baker (Cu), aluminij (Al) in nikelj (Ni), pri čemer vsak element prispeva k specifičnim lastnostim zlitine.

Cu (baker): 80.7%

Al (aluminij): 12.7%

Ni (nikelj): 4.2%

Mn (mangan): 2.4%



2.2 Fazne spremembe

Razumevanje faznih transformacij v zlitinah Cu-Al-Ni-Mn vključuje preučevanje posebne faze, ki jih ti materiali lahko izvedejo pod različnimi termičnimi in mehanskimi pogoji. Vsaka faza ima edinstvene lastnosti in strukture, ki prispevajo k splošnemu obnašanju zlitine. Raziščimo te faze in njihove podrobne transformacije, hkrati pa upoštevamo njihovo zaporedje in medsebojno povezanost.

Faza avstenita (γ faza):

Avstenit je visokotemperaturna faza, za katero je značilen obrazno centrirana kubična (FCC) struktura. V zlitinah Cu-Al-Ni-Mn je ta faza stabilna pri visoki temperaturi in lahko zadržijo znatne količine legirnih elementov v trdnem stanju rešitev.

Ta faza je relativno duktilna in je lahko podvržena znatnim deformacijam, ki je bistvena za nadaljnje fazne transformacije pri hlajenju.

Po ohladi se avstenit lahko spremeni v martenzit ali drugo vmesno fazo, odvisno od sestave zlitine in hitrosti hlajenja.

Faza martenzita:

Martenzit v zlitinah Cu-Al-Ni-Mn je produkt brez difuzije transformacija iz avstenita. Zanj je značilna tetragonalna, telesno centrirana (BCT) ali ortorombska struktura, odvisno od specifične sestave zlitine.

Ta faza je veliko težja in manj duktilna kot avstenit, prispeva k trdnosti in obliki spominskih lastnosti zlitine.

Martenzit nastane pri nižjih temperaturah in se lahko vrne na avstenit po ponovnem segrevanju nad temperaturo povratne transformacije.

Obarjanje intermetalnih faz:

Med staranjem ali toplotno obdelavo pri vmesnih temperaturah,

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

Oborine se lahko tvorijo v matrici zlitine. Te lahko vključujejo faze, kot so:

θ ($A_{12}Cu$), γ' , ($Ni_3(Al, Ti)$) in druge, odvisno od sestave zlitine in posebni pogoji toplotne obdelave.

Oborine znatno povečajo trdoto in trdnost

zlitina skozi mehanizem strjevanja padavin, kjer drobni delci

ovirajo gibanje dislokacij.

Nastajanje in rast oborine nadzorujejo

toplotne obdelave. Velikost, porazdelitev in sestava teh oborin lahko

biti prilagojen s prilagajanjem temperature in trajanja staranja.

β faza (beta faza)

- Opis: Faza β v zlitinah Cu-Al-Ni-Mn je visokotemperaturna faza, ki lahko obstaja v ravnovesju z drugimi fazami ali se pri hlajenju preoblikuje. Običajno ima kubična struktura, osredotočena na telo (BCC), in lahko vsebuje znatne količine raztopljeni legirni elementi.

Faza β je ključnega pomena za procese toplotne obdelave, saj določa odziv materiala na gašenje in staranje.

Po ohlajanju ali med staranjem se lahko β faza razgradi v

Martenzit, avstenit in različne oborine, odvisno od sestave zlitine in toplotna zgodovina.

Razgradnja β faze

Razgradnja β faze v stabilnejše faze po

hlajenje ali staranje je kritična transformacija zlitin Cu-Al-Ni-Mn. To lahko privede do tvorba mešanice faz, vključno z martenzitom, avstenitom in oborinami.

Proces razgradnje je bistven za razvoj

mehanske lastnosti zlitine, saj lahko poveča trdnost, duktilnost in odpornost proti obrabi in koroziji.

Na to transformacijo vpliva sestava zlitine,

hitrost hlajenja in parametri toplotne obdelave. Natančen nadzor teh dejavnikov

omogoča optimizacijo lastnosti zlitine za posebne aplikacije.

V zlitinah Cu-Al-Ni-Mn so interakcije in transformacije med temi fazami

V različnih toplotnih in mehanskih pogojih določite končni material

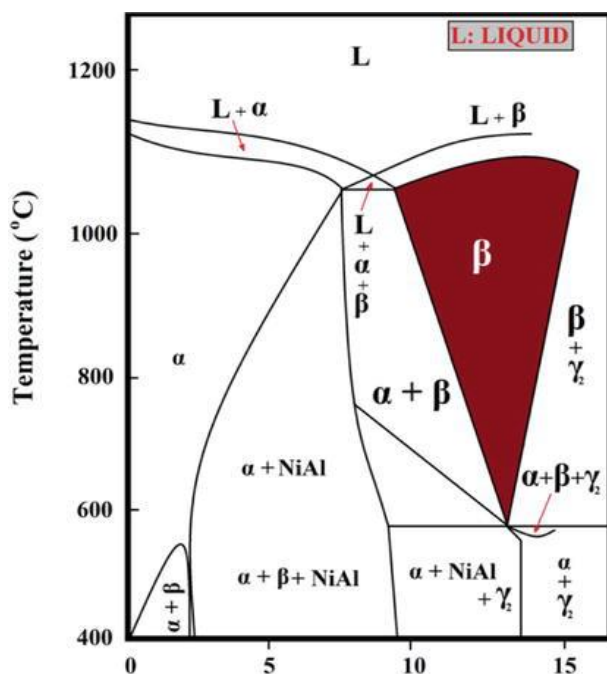
Lastnosti. Z nadzorom procesa toplotne obdelave, vključno z obdelavo raztopine,

gašenje in staranje, je mogoče prilagoditi mikrostrukturo in posledično

mehanske in fizikalne lastnosti zlitine za širok spekter uporabe. Ta

vključuje aplikacije, ki imajo visoko trdnost, odpornost proti obrabi, korozijo

Odpornost in edinstvene funkcije, kot so učinki spomina oblike.



Slika 2: [Fazni diagram Cu-Al-Ni-Mn](#)

2.2.1 Martenzitna transformacija

Martenzitna transformacija v zlitinah, kot je Cu-Al-Ni-Mn, je ključni proces, ki omogoča

tem materialom edinstvene lastnosti, kot so spomin na obliko in superelastičnost. Pri tej

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

zlitini se martenzitna transformacija nanaša na difuzijsko neodvisno preoblikovanje kristalne strukture materiala, ki se zgodi pri spreminjanju temperature.

Potek martenzitne transformacije:

Martenzitna transformacija se začne, ko se zlitina ohladi pod določeno kritično temperaturo, znano kot temperatura začetka martenzita (M_s). Pri tem prehodu se visokotemperaturna faza, znana kot avstenit (ki ima običajno kubično ploskovno centrirano (fcc) kristalno strukturo), preoblikuje v nizkotemperaturno martenzitno fazo z drugačno kristalno strukturo (običajno tetragonalno ali ortorombsko). Ta preoblikovanje je posledica premika atomov v kristalni rešetki, ki se zgodi brez difuzije, kar pomeni, da atomi "skočijo" na nove položaje v zelo kratkem času.

Značilnosti martenzitne transformacije:

- Difuzijsko neodvisen prehod: Za razliko od drugih faznih prehodov, ki vključujejo premikanje atomov preko difuzije, martenzitna transformacija vključuje premik atomov znotraj kristalne rešetke brez dolgoročnega premeščanja atomov.
- Oblika in volumske spremembe: Transformacija pogosto spremlja spremembe v obliki in volumenu, ki so odvisne od specifične orientacije kristalne rešetke pred in po transformaciji.
- Odvisnost od temperature in mehanske napetosti: Martenzitna transformacija se lahko inducira s hlajenjem pod M_s temperaturo ali z uporabo mehanske napetosti, kar vodi do superplastičnega obnašanja.

Vpliv na lastnosti zlitine Cu-Al-Ni-Mn:

V zlitinah Cu-Al-Ni-Mn martenzitna transformacija omogoča, da se material obnaša kot material s spominom na obliko. Ko se zlitina, ki je v martenzitnem stanju, segreje nad temperaturo konca avstenita (A_s), se material vrne v originalno avstenitno fazo in s tem v

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

prvotno obliko. Ta lastnost je uporabna v številnih aplikacijah, vključno z aktuatorji, senzorji in medicinskimi pripomočki.

Mangan (Mn) v tej zlitini služi kot element za izboljšanje odpornosti proti koroziji in za fino nastavitvev temperatur faznih prehodov, kar omogoča bolj natančno kontroliranje lastnosti spomina na obliko in superelastičnosti.

2.2.2 Obarjanje intermetalnih faz

Obarjanje intermetalnih faz v kovinskih zlitinah, vključno s tistimi, kot je Cu-Al-Ni-Mn, je kritičen mehanizem za izboljšanje mehanskih lastnosti, kot so trdnost, trdota in žilavost. Ta proces je osrednjega pomena za starost ali strjevanje padavin, metodo toplotne obdelave. Da bi razumeli, kako se oborijo intermetalne faze, je nujno, da se poglobimo v posebnosti procesa in dejavnike, ki nanj vplivajo.

Obdelava raztopine: Zlitina se segreje na visoko temperaturo, kjer je topnost legirnih elementov v navadni kovini (npr. Cu v zlitinah Cu-Al-Ni-Mn) največja. To ustvari homogeno trdno raztopino.

Kaljenje: Hitro hlajenje od temperature obdelave raztopine »zamrzne« topljene atome na mestu in jih ujame v prenasičeno trdno raztopino. Ta korak je ključnega pomena za doseganje neravnotežnega stanja, potrebnega za padavine.

Staranje: Kaljena zlitina se ponovno segreje na nižjo temperaturo (vmesni produkt med sobno temperaturo in temperaturo obdelave raztopine) in tam zadrži nekaj časa. Ta korak

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

omogoča, da se prenasičeni elementi razpršijo in postopoma tvorijo oborine v trdni matrici.

Narava intermetalnih oborin

Intermetalne oborine so spojine, ki nastanejo med dvema ali več kovinami in imajo izrazito kristalno strukturo, ki se razlikuje od matične faze. V zlitinah Cu-Al-Ni-Mn so specifične vrste oborine, ki nastanejo, odvisne od sestave zlitine in pogojev staranja. Te oborine lahko znatno izboljšajo mehanske lastnosti zlitine z oviranjem gibanja dislokacije - primarnega načina plastične deformacije kovin.

Ključni dejavniki, ki vplivajo na obarjanje

Sestava: Specifična sestava zlitine določa, katere intermetalne faze so termodinamično ugodne in se lahko oborijo iz trdne raztopine.

Temperatura in čas staranja: Na velikost, porazdelitev in morfologijo oborine močno vplivata temperatura staranja in trajanje zadrževanja zlitine pri tej temperaturi. Višje temperature na splošno vodijo do bolj grobih oborin, medtem ko lahko daljši časi staranja omogočijo rast in grobost oborine

- Hitrost hlajenja: Hitrost, s katero se zlitina ohladi s temperature obdelave raztopine, lahko vpliva na raven prenasičenosti trdne raztopine in posledično na gonilno silo obarjanja.

Mehanizem krepitve

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

Primarni mehanizem, s katerim intermetalne oborine krepijo zlitino, je oviranje gibanja dislokacij skozi kristalno rešetko. To se lahko zgodi prek več mehanizmov:

- striženje oborine: Manjše oborine se lahko strižejo s premikajočimi se dislokacijami, kar zahteva dodatno silo, s čimer se poveča moč.
- Orowan mehanizem: Večje oborine, ki jih ni mogoče strižiti z dislokacijami, prisilijo dislokacije, da jih obidejo. Ta proces pušča zanko okoli oborine in povečuje stres, potreben za nadaljnje gibanje dislokacije.
- Koherentno utrjevanje: Če so oborine skladne z matriko (kar pomeni, da imajo mrežasto strukturo, ki je neprekinjena z matriko), lahko tudi polja sevov okoli oborine ovirajo gibanje dislokacije.

Primeri intermetalnih faz v zlitinah Cu-Al-Ni-Mn

Medtem ko so specifične intermetalne faze odvisne od sestave zlitine, lahko običajne oborine v zlitinah na osnovi Cu vključujejo faze, kot je θ (Al_2Cu), za katerega je znano, da zlitino krepí s precipitacijskim utrjevanjem. V zlitinah z Ni in Mn lahko nastanejo druge specifične intermetalne faze, od katerih vsaka prispeva edinstveno k lastnostim zlitine.

Obarjanje intermetalnih faz je kompleksen in visoko nadzorovan proces, ki omogoča fino nastavitve mehanskih lastnosti zlitine za širok spekter uporabe, od vesoljskih komponent do biomedicinskih pripomočkov.

2.2.3 Razpad β -faze

Razpad β -faze v zlitinah, kot je Cu-Al-Ni-Mn, je pomemben proces, ki vpliva na mikrostrukturo in s tem na mehanske lastnosti materiala. β -faza je običajno bogata z bakrom (Cu) in aluminijem (Al), z dodatkom niklja (Ni) in mangana (Mn), ki lahko stabilizirajo to fazo pri določenih temperaturah in sestavah. Razumevanje razpada β -faze je ključnega pomena za razvoj in izboljšanje lastnosti zlitin, kot so trdnost, trdota in odpornost proti koroziji. Opišimo proces razpada β -faze:

Proces razpada

Razpad β -faze se običajno zgodi med termično obdelavo, kot sta staranje ali izotermno žarjenje, pri temperaturah, ki so nižje od tistih za homogenizacijsko žarjenje. Proces vključuje preoblikovanje metastabilne β -faze v eno ali več stabilnejših faz skozi difuzijske mehanizme.

Faze, ki nastanejo med razpadom

Med razpadom β -faze se lahko tvorijo različne intermetalne spojine in sekundarne faze, odvisno od sestave zlitine in pogojev termične obdelave. Možni produkti razpada vključujejo:

- α -faza (Cu-bogata faza): Stabilna faza, ki se lahko tvori pri nižjih temperaturah. Ta faza prispeva k izboljšanju mehanskih lastnosti, kot sta trdnost in trdota.
- γ' -faza ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$): Ta faza se pogosto tvori v zlitinah, ki vsebujejo nikelj, aluminij in titan. V zlitinah Cu-Al-Ni-Mn lahko prisotnost Mn vpliva na stabilnost in tvorbo te faze.
- θ -faza (Al_2Cu): Ta intermetalna spojina se lahko tvori v zlitinah, ki so bogate z aluminijem in bakrom. θ -faza lahko poveča trdnost zlitine z mehanizmom precipitacijskega strjevanja.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

Vpliv na lastnosti

Razpad β -faze ima pomemben vpliv na lastnosti zlitine:

- Povečanje trdnosti in trdote: Tvorbeni precipitativ med razpadom β -faze ovira gibanje dislokacij, kar vodi do povečanja trdnosti in trdote.
- Spremembe v električni prevodnosti in odpornosti proti koroziji: Sprememba mikrostrukture in sestave faze lahko vpliva tudi na električne lastnosti in odpornost proti koroziji zlitine.
- Vpliv na duktilnost: Medtem ko razpad β -faze lahko poveča trdnost, lahko tudi zmanjša duktilnost, zaradi česar je pomembno najti ravnovesje med tema dvema lastnostima za določene aplikacije.

Termična obdelava

Optimizacija pogojev termične obdelave, kot so temperatura, čas in hitrost ohlajanja, je ključnega pomena za nadzor procesa razpada β -faze in doseganje želenih lastnosti v zlitini Cu-Al-Ni-Mn. Eksperimentalno določanje optimalnih pogojev omogoča prilagoditev mikrostrukture in izboljšanje performans materiala za specifične aplikacije.

2.3 Psevdoelastičnost

Psevdoelastičnost je izjemna lastnost nekaterih materialov, med njimi tudi zlitin Cu-Al-Ni-Mn, ki se odlikujejo po sposobnosti, da prenesejo znatno deformacijo, hkrati pa se po odstranitvi nanešenega stresa vrnejo v svojo prvotno obliko. To lastnost omogoča reverzibilna martenzitska transformacija, ki se zgodi, ko je material izpostavljen mehanskemu stresu ali spremembam temperature. Pri tem avstenitna faza preide v martenzitsko fazo, kar povzroči spremembo oblike in volumna materiala.

Pod mehanskim stresom lahko zlitina doživi stresno inducirano martenzitsko transformacijo, kjer se austenit pretvori v martenzit. Ta proces se sproži z premikom kristalografskih napak znotraj kristalne mreže, kar vodi v nastanek martenzitnih domen.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

Martenzitska faza omogoča materialu, da se deformira brez trajnih sprememb, saj se po odstranitvi stresa lahko znova preoblikuje nazaj v avstenitno fazo.

Med cikli obremenjevanja in raztovarjanja opazimo histerezijsko zanko na krivulji napetosti-deformacije. To območje predstavlja energijo, ki se sprosti kot toplota med procesi fazne transformacije in deformacije. Obseg histereze je odvisen od sestave zlitine, mikrostrukture in pogojev obremenjevanja.

Pseudoplastične zlitine Cu-Al-Ni-Mn najdejo raznolike uporabe, kjer je visoka elastičnost, oblična spomin in odpornost proti utrujanju ključnega pomena. To vključuje aplikacije v biomedicinskih vsadkih, aktuatorjih, blažilnikih ter komponentah za letalsko in vesoljsko tehnologijo. Skupaj omogoča pseudoplastično vedenje zlitin Cu-Al-Ni-Mn uporabo v številnih inženirskih aplikacijah, kjer je potrebna sposobnost prenosa velikih deformacij in povratek v prvotno obliko materiala.

2.4 Toplotne lastnosti

2.4.1 Specifična toplota

Specifična toplota (c) je količina toplote (Q), ki je potrebna za povišanje temperature 1 kilograma snovi za 1 kelvin. Enačba za specifično toplotno kapaciteto je:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

kjer je:

- c specifična toplota (J/kg·K),
- Q količina toplote (J),
- m masa snovi (kg),
- ΔT sprememba temperature (K).

2.4.2 Toplotna prevodnost

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

Toplotna prevodnost (λ) je mera sposobnosti materiala za prevajanje toplote in je definirana kot količina toplote, ki prehaja skozi material v enoti časa (P) skozi površino (S) pri temperaturnem gradientu ($\frac{\Delta T}{d}$), kjer je (d) debelina materiala. Enačba za toplotno prevodnost je:

$$\lambda = \frac{P \cdot d}{S \cdot \Delta T}$$

kjer je:

- λ toplotna prevodnost (W/m·K),
- P toplotni tok (W ali J/s),
- S površina (m²),
- d debelina materiala (m),
- ΔT temperaturna razlika (K).

3 EMPIRIČNI DEL

V nadaljevanju naloge se posvečamo praktičnemu delu, v katerem smo poskušali potrditi prej podano teorijo in smo ga izvajali med potekom izdelave raziskovalne naloge. V ta del smo vključili hipoteze, ki smo si jih zastavili, opis postopkov in poteka dela, ki smo ga izvedli, ter končne rezultate in meritve. Drugi del naloge vključuje še opise nekaterih naprav, ki smo jih spoznali in uporabili v procesu raziskovanja.

3.1 Hipoteze

Hipoteza 1: Povečanje vsebnosti mangana (Mn) v spominskih zlitinah oblike Cu-Al-Ni-Mn bo povečalo njihovo odpornost proti koroziji v slanah okoljih.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

Utemeljitev: Znano je, da mangan vpliva na korozijsko obnašanje zlitin. V zlitinah na osnovi Cu bi Mn lahko deloval kot katodni inhibitor z oblikovanjem pasivnega filma na površini zlitine, s čimer bi povečal odpornost proti koroziji. Ta hipoteza temelji na predpostavki, da dodatki Mn spreminjajo elektrokemijske lastnosti zlitine, kar lahko privede do izboljšanja učinkovitosti v korozivnih okoljih, kot je morska voda.

Hipoteza 2: Optimizirana obdelava staranja zlitin Cu-Al-Ni-Mn bo bistveno izboljšala njihovo obliko, spomin, okrevanje, stres in obremenitev zaradi obarjanja fino porazdeljenih intermetalnih faz.

Utemeljitev: Zdravljenje staranja lahko privede do nastanka finih oborin v matrici zlitine, ki lahko pripnejo dislokacije in vplivajo na reverzibilno martenzitno transformacijo, ki podpira učinek spomina oblike. Hipoteza kaže, da obstaja optimalna kombinacija temperature staranja in časa, ki maksimira mehanske lastnosti, povezane z učinkom spomina oblike, po možnosti z izboljšanjem mikrostrukture ali spreminjanjem fazne sestave.

Hipoteza 3: Povečanje vsebnosti niklja (Ni) v zlitinah Cu-Al-Ni-Mn bo znižalo začetno temperaturo martenzitne transformacije (M_s) in vplivalo na termično histerezo učinka spomina oblike.

Utemeljitev: Nikelj je pomemben element v zlitinah spomina oblike, ki vpliva na temperaturo martenzitne transformacije in termično histerezo, povezano z učinkom spomina na obliko. Hipoteza predpostavlja, da je s prilagajanjem vsebnosti Ni v določenih mejah mogoče natančno nastaviti temperaturo M_s in nadzorovati termično histerezo, s čimer se poveča primernost materiala za posebne aplikacije, kjer je potreben natančen nadzor nad temperaturami pretvorbe.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

3.2 Metode raziskovanja

3.2.1 Vrstični elektronski mikroskop

Pri praktičnem delu naše raziskovalne naloge smo uporabili vrstični elektronski mikroskop Thermo Fisher Scientific Quattro S.

Thermo Scientific Quattro S je vrstični elektronski mikroskop na poljsko emisijo (FEG SEM). Omogoča delovanje v treh vakuumskih načinih in sicer v visokem vakuumu ($< 6 \cdot 10^{-4}$ Pa), nizkem vakuumu (do 200 Pa) in v ESEM načinu (do 2000 Pa za vodo oz. 4000 Pa za N_2).

Za slikanje vzorcev je FEG SEM Quattro S opremljen z detektorji sekundarnih (SE) Everhart–Thornley, povratno sipanih (PSE) in presevnih elektronov (STEM). Le-ta združuje principe, ki se uporabljajo v presevnih (TEM) in vrstičnih elektronskih mikroskopih (SEM). Ločljivost v visokem vakuumskem načinu znaša 0,8 nm (STEM), 1,0 nm (SE) oz. 2,5 nm (PSE), v ESEM načinu pa 1,3 nm (SE) oz. 2,5 nm (PSE). Za analizo kemijske sestave je vgrajen EDXS SDD detektor nove generacije Ultim® Max s površino 65 mm², proizvajalca Oxford Instruments.

FEG SEM Quattro S omogoča nano karakterizacijo:

- kovin & zlitin, zvarov, magnetnih in supermagnetnih materialov;
- keramičnih in polimernih materialov, kompozitov;
- tankih plasti;
- mineralov;
- mehkih materialov: tekstilij, filtrov, gelov, rastlin in tkiv.

Za izvedbo dinamičnih preiskav med ohlajanjem in segrevanjem je Quattro S opremljen z nosilcema za ohlajanje do -60 °C in segrevanje do 1000 °C. Z njima mikroskop omogoča "in situ" študije procesov:

- (re)kristalizacije in faznih transformacij;
- oksidacije, katalize;
- rasti materialov;
- hidracije, dehidracije in določevanje kota omočenja.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024



Slika 3: Vrščni elektronski mikroskop Thermo Fisher Scientific, model Quattro S (UL NTF)

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

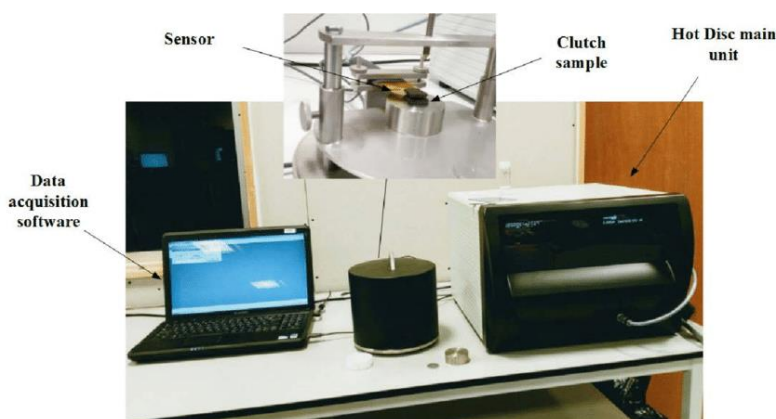
3.2.2 Hot disk TPS 2200

Hot Disk TPS 2200 je merilnik toplotne prevodnosti, ki se uporablja za merjenje toplotne prevodnosti in temperaturne prevodnosti trdnih snovi, tekočin, past in praškov. TPS 2200 deluje tako, da na eno stran vzorca usmeri temperaturni val in izmeri temperaturni odziv na nasprotni strani. Instrument uporablja tehniko prehodnega ravninskega vira (TPS), ki je nestacionarna, nedestruktivna metoda za merjenje toplotne prevodnosti.

TPS 2200 Hot Disk je sestavljen iz držala za vzorec, grelnika, temperaturnega senzorja in sistema za zbiranje podatkov. Vzorec se namesti med grelec in temperaturno tipalo, na grelec pa se vršijo temperaturne stopnje. Temperaturni senzor izmeri temperaturni odziv na nasprotni strani vzorca, ti podatki pa se uporabijo za izračun toplotne prevodnosti in difuzivnosti vzorca.

Hot Disk TPS 2200 ima več prednosti pred drugimi metodami za merjenje toplotne prevodnosti, med drugim visoko natančnost, točnost in hitrost. Ker je neporušna metoda, se lahko vzorci po testiranju ponovno uporabijo.

TPS 2200 Hot Disk se uporablja v različnih panogah, vključno z znanostjo o materialih, toplotnim inženiringom in nadzorom kakovosti. Posebej uporaben je v panogah, kjer so natančne meritve toplotne prevodnosti ključnega pomena.



Slika 4: Hot disk TPS 2200

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

Senzorji Hot Disk se uporabljajo v merilnikih toplotne prevodnosti Hot Disk TPS (Transient Plane Source). Zasnovani so za merjenje toplotne prevodnosti in difuzivnosti različnih materialov.

Senzor Hot Disk je sestavljen iz majhne, tanke in ravne sonde v obliki diska, ki je običajno izdelana iz nerjavečega jekla. Sonda je na obeh straneh prevlečena s tanko plastjo platine, ki služi kot grelni element in temperaturni senzor. Plast platine je vstavljena med dve plasti izolacije, kar zagotavlja, da se toplota prenaša le v smeri, ki je pravokotna na ravnino senzorja.

Senzor je oblikovan tako, da je v neposrednem stiku z vzorcem, ki ga preizkušamo. Ko na senzor deluje temperaturni val, temperaturni senzor izmeri temperaturni odziv na nasprotni strani senzorja. Ti podatki se nato uporabijo za izračun toplotne prevodnosti in difuzivnosti vzorca.

Obstaja več več vrst senzorjev Hot Disk, ki so zasnovani za različne namene:

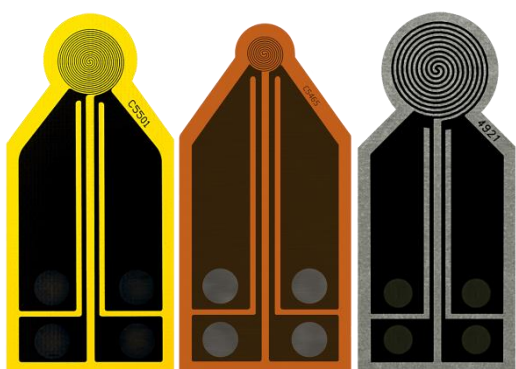
- Standardni senzor: To je najpogostejša vrsta senzorja Hot Disk, ki je primerna za merjenje toplotne prevodnosti in difuzivnosti trdnih snovi, tekočin, past in praškov.
- Mini senzor: Ta senzor je v primerjavi s standardnim senzorjem manjši in je idealen za merjenje toplotnih lastnosti majhnih ali tankih vzorcev.
- Visokotemperaturni senzor: Ta senzor je zasnovan za visoke temperature in se lahko uporablja za merjenje toplotnih lastnosti materialov pri temperaturah do 1600 °C.
- Biološki senzor: Ta senzor je posebej zasnovan za biološke vzorce, kot so tkiva, tekočine in geli.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

- Senzor po meri: Hot Disk ponuja tudi senzorje, zasnovane po meri, ki jih je mogoče prilagoditi posebnim produktom in vrstam vzorcev.

- Senzor za reaktivno gorivo: Ta senzor je posebej zasnovan za merjenje toplotnih lastnosti reaktivnega goriva in drugih letalskih goriv.

- Visokotlačni senzor: Ta senzor je zasnovan za merjenje toplotnih lastnosti vzorcev pod visokim tlakom.



Slika 5: Hot disk senzor 5501, 5465 in 4921

3.2.3 Naprava za detekcijo mikrostrukturnih sprememb

Avtomatiziran sistem za merjenje električne upornosti v odvisnosti od temperature omogoča študij toplotno aktiviranih procesov pri različnih materialih, kot so tanke plasti, kovinska stekla, kvazikristalne zlitine itd.

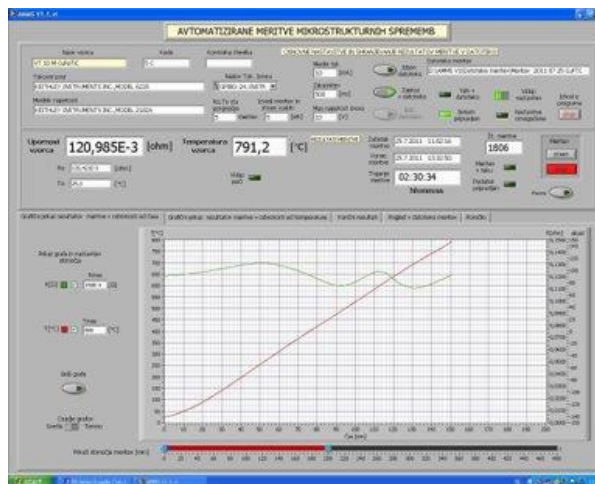
Omogoča sledenje reakcijam med plastmi, faznim transformacijam ter oksidaciji in redukciji snovi v različnih okoljih. Rezultati se običajno prikažejo v obliki krivulj, ki kažejo odvisnost električne upornosti od temperature in časa.

To omogoča natančno določanje kinetičnih parametrov mikrostrukturnih sprememb, kar je ključno za načrtovanje novih materialov in karakterizacijo obstoječih.

Naprava za zasledovanje mikrostrukturnih sprememb z merjenjem električne upornosti je sestavljena iz treh osnovnih sklopov: grelnega, vakuumskega in merilno-kontrolnega. Meritve potekajo v vakuumskem sistemu, kjer se vzorec segreva s konstantno hitrostjo ali v kompleksnejših temperaturnih programih.

Uporaba štiritočkovne metode omogoča natančne meritve električne upornosti in zmanjšuje vpliv merilnih žic. Sistem omogoča tudi enostavno nastavitve merilnih parametrov in obdelavo rezultatov.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024



Slika 6: Naprava za preverjanje mikrostrukturnih sprememb in graf mikrostrukturnih sprememb

3.2.4 Naprava za strjevanje na vrtečem se kotlu

Naprava proizvaja različno dolge kovinske trake in kosmiče, v debelini okoli 10 μm in širini od 1 ga do 12 mm pri hitrostih strjevanja od C 102 do 106 $^{\circ}\text{C/s}$

Naprava brizga staljeno kovino na boben ki se vrti in in pri tem ohladi in oblikuje kovino sestavljena je iz:

- 1. držalo za nosilec talilnega agregata
- 2. nosilec talilnega agregata
- 3. indukcijska tuljava
- 4. bakreni valj
- 5. komora
- 6. brisalec



Slika 7: Naprava za hitro strjevanje na vrtečem se valju - Melt spinner

Prednost naprave je v izvedbi nosilca talilnega agregata, ki omogoča tri postopke hitrega strjevanje:



Slika 8: Nosilec talilnega agregata za Melt spinner

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

- prosto strjevanje
- strjevanje z ravnim tokom taline
- povlečno strjevanje.

3.3 Potek dela

V naslednjih nekaj točkah bomo opisali potek dela raziskave v posameznih korakih.

3.3.1 Priprava vzorcev za hitro strjevanje kovinskih materialov (Melt spinner)

Začetna faza raziskave je vključevala pripravo kovinskih trakov z uporabo naprave za melt spinning. Ta postopek vključuje taljenje kovine in njeno izlitje na vrtljivo kolo, kar povzroči hitro ohlajanje in strjevanje kovine v obliki tankih trakov. Ta korak je bil ključnega pomena za določanje osnovnih lastnosti trakov, kot so homogenost materiala in možnost nastanka amorfne strukture.

3.3.2 Merjenje dimenzij

Pred nadaljnjimi analizami so bile opravljene meritve dolžine, debeline in širine nastalih kovinskih trakov. Ta korak je bil bistven za razumevanje vpliva procesa hitrega strjevanja na morfologijo materiala in za zagotovitev, da so bili vsi vzorci primerljivi med nadaljnjo analizo.

3.3.3 Ogled vzorcev pod mikroskopi

Elektronski Mikroskop

Analiza pod elektronskim mikroskopom je omogočila natančen vpogled v mikrostrukturo trakov na atomskem nivoju. Ta metoda je uporabljena za identifikacijo morebitnih nečistoč, dislokacij ali drugih strukturnih anomalij, ki bi lahko vplivale na mehanske lastnosti kovinskih trakov.

Svetlobni Mikroskop

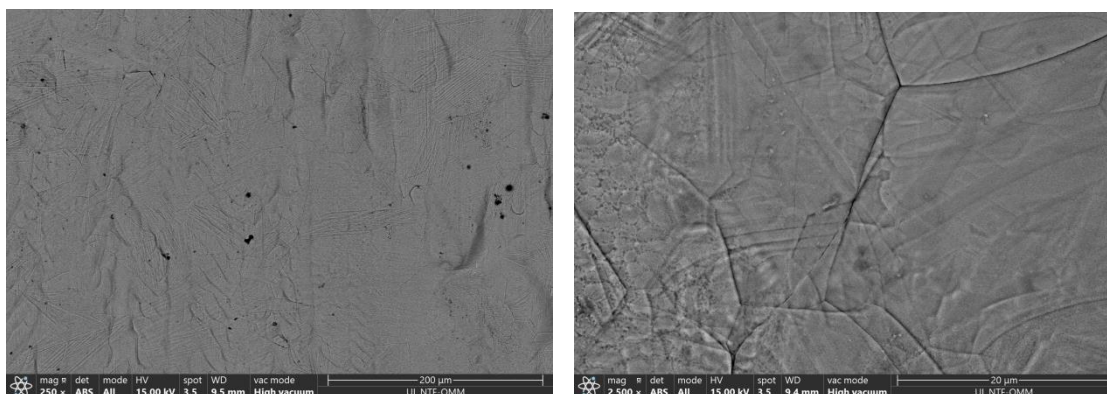
DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

Sledila je analiza pod svetlobnim mikroskopom, ki je omogočila opazovanje večjih strukturnih značilnosti, kot so zrna in fazne meje. Ta korak je bil ključen za oceno homogenosti in enakomernosti distribucije faz po celotni površini trakov.

3.3.4 Analiza Mikrostrukture

Podrobnejša analiza mikrostrukture je bila izvedena z namenom razumeti razporeditev in velikost zrn ter njihov vpliv na lastnosti materiala. Ta analiza je bila ključna za določitev mehanskih in termičnih lastnosti trakov, kar omogoča nadaljnjo optimizacijo materialov za specifične uporabe.

Na sliki 9 je prikazan mikroskopski posnetek površine hitrostrjenega traku iz zlitine CuAlNiMn; povečava 250x (levo), povečava 2500x (desno).



Slika 9: Mikroskopski posnetek površine hitrostrjenega traku iz zlitine CuAlNiMn; povečava 250x (levo), povečava 2500x (desno)

3.3.5 Preizkus toplotne prevodnosti vzorcev

Zadnji korak raziskave je vključeval merjenje toplotne prevodnosti kovinskih trakov. Ta lastnost je pomembna za številne aplikacije, kjer je učinkovito odvajanje toplote ključnega pomena. Meritve so omogočile oceno, kako dobro kovinski trakovi prevajajo toploto, kar je bistveno za njihovo uporabo v elektronski industriji in drugih področjih.

3.4 Razprava in rezultati raziskave

Za preizkus toplotne prevodnosti smo uporabili napravo Hot disk TSP 2200. Z napravo je upravljal profesor, ki je vpel vzorce v napravo, ta pa jih je ustrelila s temperaturnim valom na eni strani in odčitala prevodnost na drugi strani. To merjenje smo ponovili na treh stopnjah moči za vsak vzorec, dodali smo tudi kontrolo, da smo lahko kalibrirali napravo

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

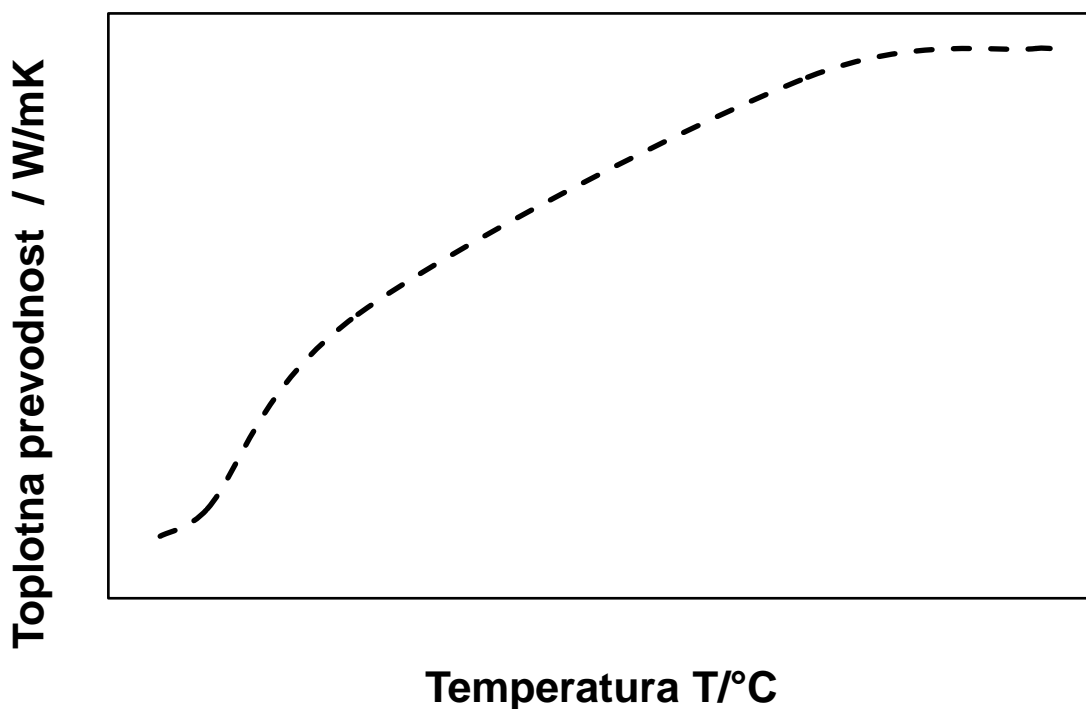
TPS 2200. V sobi je morala biti stalna temperatura, da senzor ne bi začutil vseh sprememb, ki bi se drugače dogajale, in zaradi tega lahko meritve ne bi bile tako natančne.

Na sliki 10 so prikazani rezultati meritev toplotnih lastnosti.

Settings							Numeric Results			
Ro	St...	Descript...	Heatin...	Mea...	Refere...	Sample...	Senso	Thermal Condu...	Thermal Diffusi...	Specific Heat
6	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	22,0 °C	5082	46.44 W/mK	8.704 mm ² /s	5.335 MJ/m ³ K
7	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	22,0 °C	5082	46.07 W/mK	8.436 mm ² /s	5.462 MJ/m ³ K
8	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	22,0 °C	5082	44.57 W/mK	7.580 mm ² /s	5.880 MJ/m ³ K
9	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	22,0 °C	5082	9.067 W/mK	0.05734 mm ² /s	158.1 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	297,0 °C	5082	86.14 W/mK	8.974 mm ² /s	9.598 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	297,0 °C	5082	85.75 W/mK	6.850 mm ² /s	12.52 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	297,0 °C	5082	80.75 W/mK	8.181 mm ² /s	9.870 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	394,0 °C	5082	83.40 W/mK	13.96 mm ² /s	5.975 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	394,0 °C	5082	85.91 W/mK	11.18 mm ² /s	7.686 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	394,0 °C	5082	80.26 W/mK	10.44 mm ² /s	7.686 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	44,0 °C	5082	47.76 W/mK	12.10 mm ² /s	3.946 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	42,0 °C	5082	45.83 W/mK	8.098 mm ² /s	5.660 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	42,0 °C	5082	47.63 W/mK	8.008 mm ² /s	5.948 MJ/m ³ K
1...	C...	zlitina s ...	1,2W	5s	6,7584...	22,0 °C	5082	44.55 W/mK	7.107 mm ² /s	6.268 MJ/m ³ K
2...	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	23,0 °C	5082	44.40 W/mK	6.817 mm ² /s	6.514 MJ/m ³ K
2...	C...	zlitina s ...	800 mW	5s	6,7584...	22,0 °C	5082	45.56 W/mK	5.492 mm ² /s	8.295 MJ/m ³ K
2...	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	106,0 °C	5082	64.26 W/mK	12.61 mm ² /s	5.096 MJ/m ³ K
2...	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	106,0 °C	5082	76.42 W/mK	5.688 mm ² /s	13.43 MJ/m ³ K
2...	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	106,0 °C	5082	75.01 W/mK	5.775 mm ² /s	12.99 MJ/m ³ K
2...	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	201,0 °C	5082	84.27 W/mK	8.315 mm ² /s	10.13 MJ/m ³ K
2...	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	202,0 °C	5082	80.04 W/mK	10.41 mm ² /s	7.686 MJ/m ³ K
2...	C...	zlitina s ...	1W	5s	6,7584...	202,0 °C	5082	86.16 W/mK	7.273 mm ² /s	11.85 MJ/m ³ K

Slika 10: Rezultati meritev toplotnih lastnosti

Na sliki 11 je prikazana toplotna prevodnost zlitine CuAlNiMn na temperaturnem intervalu od sobne temperature (20 °C) pa do temperature 400 °C.



Slika 11: Toplotna prevodnost na temperaturnem intervalu od 20 do 400 °C

4. ZAKLJUČEK

V raziskovalni nalogi smo izvedeli veliko novega in razrešili vprašanja, ki so se nam ob podani teoriji porajala, spoznali smo toplotne lastnosti fazne spremembe in psevdoelastične lastnosti zlitine Cu-Al-Ni-Mn.

V zaključku lahko še zapišemo, kakšne so naše ugotovitve v zvezi z našimi hipotezami.

Hipoteza 1: Povečanje vsebnosti mangana (Mn) v spominskih zlitinah oblike Cu-Al-Ni-Mn bo povečalo njihovo odpornost proti koroziji v slanih okoljih.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Hitro strjena zlitina s spominom na osnovi bakra: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2024

To hipotezo smo potrdili, ker smo pod mikroskopom opazili, da po 1 tednu ni bilo mikrostrukturalnih razlik.

Hipoteza 2: Optimizirana obdelava staranja zlitin Cu-Al-Ni-Mn bo bistveno izboljšala njihovo obliko, spomin, okrevanje, stres in obremenitev zaradi obarjanja fino porazdeljenih intermetalnih faz.

To hipotezo smo potrdili, saj smo pod mikroskopi in merilcem mikrostrukture opazili intermetalne faze, ki so pozitivno vplivale na spominske lastnosti zlitine Cu-Al-Ni-Mn

Hipoteza 3: Povečanje vsebnosti niklja (Ni) v zlitinah Cu-Al-Ni-Mn bo znižalo začetno temperaturo martenzitne transformacije (Ms) in vplivalo na termično histerezo učinka spomina oblike.

To hipotezo smo delno potrdili, saj je povečanje vsebnosti niklja vplivalo na termično histerezo učinka spomina oblike ampak je povišala začetno temperaturo martenzitne transformacije.

4.1 Zahvale

Iskreno se zahvaljujemo profesorici dr. Sonji Kitak iz Gimnazije Jožeta Plečnika Ljubljana, profesorju dr. Borutu Koscu in vsem ostalim, ki so pripomogli k nastanku naloge, za njihovo neprecenljivo vodenje, podporo in strokovno znanje med našim raziskovalnim delom.

Njihovi vpogledi in povratne informacije so bili ključni pri oblikovanju naše metodologije, analize in zaključkov.

Za njihov čas, potrpežljivost in predanost smo jim resnično hvaležni in počutimo se počaščeni, da smo imeli priložnost sodelovati s tako uglednimi ljudmi.

5. Viri

- [1] L.A. Dobrzanski, Technical and Economical Issues of Materials Selection, Silesian Technical University, Gliwice, 1997.
- [2] H.H. Libermann, Rapidly solidified alloys, Marcel Dekker, London, 1993.
- [3] M. Gojić, L. Vrsalović, S. Kožuh, A.C. Kneissl, I. Anžel, S. Gudić, B. Kosec, M. Kliškić, Electrochemical and microstructural study of Cu-Al-Ni shape memory alloy, Journal of Alloys and Compounds, 509 (2011) 41, 9782-9790.
- [4] G. Lojen, I. Anžel, A.C. Kneissl, E. Unterweger, B. Kosec, M. Bizjak, Microstructure of rapidly solidified Cu-Al-Ni shape memory alloy ribbons, Journal of Materials Processing Technology, 162/163 (2005), 220-229.
- [5] I. Ivanić, S. Kožuh, F. Kosel, B. Kosec, I. Anžel, M. Bizjak, M. Gojić. The influence of heat treatment on fracture surface morphology of the CuAlNi shape memory alloy. Engineering failure analysis.77 (2017), 85-92
- [6] I. Ivanić, M. Gojić, S. Kožuh, B. Kosec. Microstructural analysis of CuAlNiMn shape-memory alloy before and after the tensile testing. Materiali in tehnologije.. 48 (2014) 5, 713-718.
- [7] B. Kosec, Device for rapid solidifying of metal alloys, Euroteh, 3 (2004), 32-33.
- [8] Kosec., B., Karpe, B., Instrument for the thermal properties analysis Hot Disk TPS 2200, IRT3000, 1 (2017), 67.
- [9] B. Karpe, M. Vodlan, I. Kopač, I. Budak, A. Nagode, A. Pavlič, T. Puškar, B. Kosec. Thermal properties of materials used in dental medicine. Advanced technologies and materials. 43 (2018) 1, 7-10.
- [10] International standard ISO 22007 (2009). Plastics – Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 1: General principles. Reference: ISO 22007:2009(E).