

# **TOPLOTNE LASTNOSTI ZLITINE S SPOMINOM OBLIKE NA OSNOVI BAKRA**

Področje: **STROJNIŠTVO**

Vrsta naloge: **Raziskovalna naloga**

Dijaka:  
**Luka Čabrian, 3. E**  
**Van Gregor Hvala, 3. C**

Mentor: **dr. Sonja Kitak, prof. fiz.**

## Vsebina

<b>IZVLEČEK</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>1. Uvod</b> .....	5
<b>2. Toplotne lastnosti</b> .....	5
<b>2.1 Toplotna prevodnost</b> .....	6
<b>2.2 Specifična toplota</b> .....	6
<b>2.3 Temperaturna prevodnost</b> .....	7
<b>3. Opis naprave Hot Disk TPS 2200</b> .....	7
<b>4. Opis zlitine</b> .....	8
<b>5. Potek dela</b> .....	10
<b>5.1 Standard ISO 22007</b> .....	13
<b>5.2 Meritve</b> .....	14
<b>6. Zaključki</b> .....	17
<b>7. Zahvala</b> .....	18
<b>8. Viri</b> .....	19

## Kazalo prilog

Slika 1 - Zlitina Cu-Al-Mn ulita v valjčke po klasičnem postopku. ....	5
Slika 2 - Trakovi iz zlitine Cu-Al-Mn, polproizvod (levo) in mikrostruktura (desno). ....	5
Slika 3 - Naprava za meritve toplotnih lastnosti Hot Disk TPS 2200. ....	7
Slika 4 - Vzorec iz zlitine Cu-Al-Ni (Ø40 x 12 mm) izdelan in pripravljen za analizo toplotnih lastnosti. ....	9
Slika 5 - Vrstični elektronski mikroskop na poljsko emisijo Thermofischer Quattro S. ....	10
Slika 6 - Površina vzorca posneta z vrstičnim elektronskim mikroskopom z jasno vidnimi nehomogenostmi. ....	11
Slika 7 - Slika 6 z označenim delom za kemijsko analizo (levo) in spekter elementov (desno). ....	12
Slika 8 - Standard ISO 22007,-2. ....	14
Slika 9 - Slika 8 - Standard ISO 22007,-2. ....	14
Slika 10 - Meritev toplotnih lastnosti Cu-Al-Mn (Ø40 x 12 mm) pri sobni temperaturi. ....	15
Slika 11 - izvajanje meritev .....	15

## Kazalo tabel

Tabela 1 - Osnovni merilni parametri naprave Hot Disk TPS 2200 .....	8
Tabela 2 - Kemijska sestava zlitine Cu-Al-Mn .....	9
Tabela 3 - Mehanske lastnosti zlitine Cu-Al-Mn v ulitem stanju .....	9
Tabela 4 - Rezultati kemijske analize zlitine Cu-Al-Mn s SEM (Slika 6) .....	13
Tabela 5 - Rezultati izvedenih meritev toplotnih lastnosti .....	16
Tabela 6 - Originalni izpis izmerjenih vrednosti na sistemu naprave Hot Disk TPS 2200. ....	16
Tabela 7 - Toplotne lastnosti zlitine s spominom oblike Cu-Al-Mn pri sobni temperaturi. ....	17

## IZVLEČEK

Profesorica dr. Sonja Kitak nama je ponudila priložnost za udeležbo 35. srečanju mladih raziskovalcev in mentorjev. Zato smo obiskali Naravoslovnotehniško fakulteto Univerze v Ljubljani, kjer so nam omogočili izvedbo meritev na zlitini s spominom oblike ena osnovi bakra. Zlitina je zelo zanimiva za opazovanje toplotnih lastnosti, ker če jo deformiramo pri nizki temperaturi, se bo po njenem segrevanju nad kritično temperaturo, povrnila nazaj v prvotno obliko.

V okviru raziskovalne naloge smo izvedli meritve pri katerih smo opazovali tri toplotne lastnosti. Meritve smo izvedli na sobni temperaturi (22 °C) v skladu s standardom ISO 22007-2.

Uporabili smo napravo za določevanje toplotnih lastnosti Hot Disk TPS 2200, enega izmed naj sodobnejših in najkakovostnejših instrumentov za določevanje toplotnih lastnosti.

**Ključne besede:** toplotne lastnosti, zlitine s spominom oblike na osnovi bakra, Cu-Al-Mn, metoda Hot Disk, meritve

## **ABSTRACT**

Professor dr. Sonja Kitak offered us the opportunity to attend the 35th meeting of young researchers and mentors. Therefore, we visited Faculty of Natural Sciences and Engineering University of Ljubljana, where we were able to perform measurements on copper-based shape memory alloy. The alloy is very interesting for observing thermal properties, because if it is deformed at low temperature, after its heating above the critical temperature, it will return to its original shape.

As part of the research task, we performed measurements in which we observed three thermal properties. Measurements were performed at room temperature (22 °C) in accordance with standard ISO 22007-2.

We used the device for determining the thermal properties of the Hot Disk TPS 2200, one of the most modern and high-quality instruments for determining the thermal properties.

**Key words:** thermal properties, copper base shape memory alloys, Cu-Al-Mn, Hot Disk method, measurements

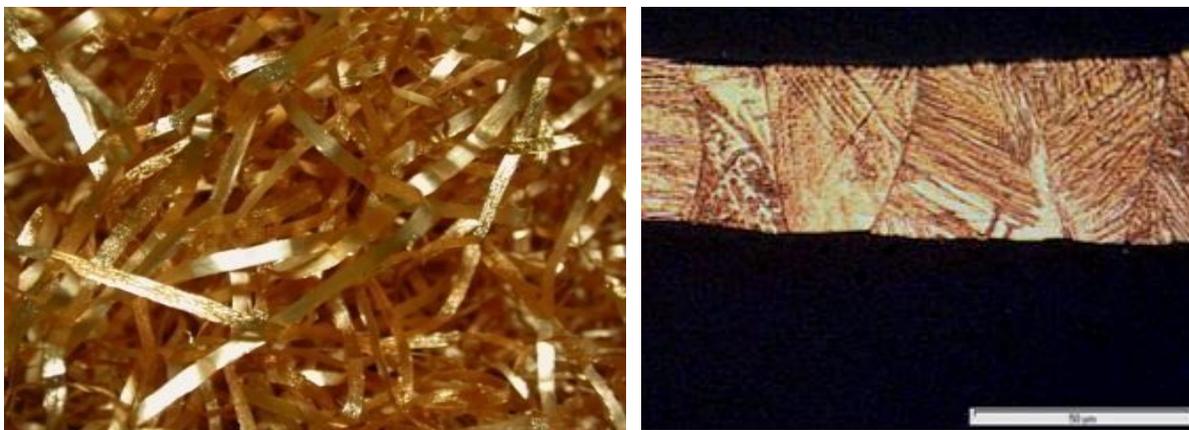
## 1. Uvod

Zlitine s spominom na obliko (SMAs – Shape Memory Alloys) so relativno nova skupina naprednih funkcionalnih materialov, ki si lahko zapomnijo in obnovijo svojo prvotno obliko, potem, ko so bili znatno deformirani zaradi obremenitve ali deformacije zaradi segrevanja nad temperaturo fazne transformacije. Glavna prednost zlitin s spominom oblike na osnovi bakra, je njihova nizka cena v primerjavi z drugimi SMA.

V okviru predstavljene raziskave smo izmerili, analizirali in ovrednotili toplotne lastnosti v inženirski praksi izredno uporabne zlitine s spominom oblike na osnovi bakra Cu-Al-Mn.



Slika 1 - Zlitina Cu-Al-Mn ulita v valjčke po klasičnem postopku.



Slika 2 - Trakovi iz zlitina Cu-Al-Mn, polproizvod (levo) in mikrostruktura (desno).

## 2. Toplotne lastnosti

Toplotne lastnosti določenega materiala odražajo, kako se izbrani material obnaša v stiku s toploto in kako bo toplota prehajala skozi njega. Spodaj opisani izrazi *toplotna prevodnost*, *specifična toplota*, in *temperaturna prevodnost* so osnovni pojmi za predstavitev toplotnih lastnosti materiala.

## 2.1 Toplotna prevodnost

Toplotna prevodnost je fizikalna lastnost materiala in je definirana kot količina toplote, ki je prešla skozi 1 m<sup>2</sup> površine materiala z debelino 1 m pri temperaturni razliki 1 K. Pove nam, koliko toplote bo prehajalo skozi snov pri stacionarnih pogojih. Osnovna enota je Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>, označimo pa jo z grško črko lambda ( $\lambda$ ), v anglosaksonski literaturi pa z oznako  $k$ . Izračunamo jo po enačbi:

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot l}{S \cdot \Delta T} \quad (1)$$

kjer je  $\Phi$  toplotni tok [W],  $l$  debelina materiala [m],  $S$  površina [m<sup>2</sup>] in  $\Delta T$  sprememba temperature snovi (K).

Fourierjev zakon opisuje prevod toplote kot gostoto toplotnega toka s področja z višjo temperaturo proti področju z nižjo temperaturo:

$$\Phi = -\lambda \cdot \nabla T \quad (2)$$

kjer je  $\lambda$  toplotna prevodnost in  $\nabla T$  gradient temperature, negativni predznak pa je v enačbi zaradi dogovora, da toplotni tok potuje od višje proti nižji temperaturi. Toplotna prevodnost se pri večini materialov spreminja s temperaturo, pri nekaterih pa je odvisna tudi od smeri potovanja toplote po materialu (anizotropija).

V trdnih snoveh se topota prevaja z različnimi nosilci, kot so prosti elektroni, nihanje kristalne rešetke (fononi), vibracija atomov okoli ravnovesnih leg ter v transparentnih materialih še z elektromagnetnim sevanjem. Z naraščajočo temperaturo se povečuje amplituda nihanja atomov. Za razliko od plinov atomi v trdni snovi ne morejo vibrirati neodvisno, ker so povezani z medatomskimi vezmi. Prosti elektroni prispevajo k prevodu toplote s t. i. elektronsko toplotno prevodnostjo ( $\kappa_e$ ). V primeru kovin in zlitin elektronski toplotni tok prispeva veliko večji delež kot nihanje kristalne rešetke.

## 2.2 Specifična toplota

Specifična toplota je eksperimentalno določena veličina, definirana kot količina toplote, potrebne za dvig temperature enega kilograma snovi za en Kelvin. Osnovna enota je Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Če je specifična toplota merjena pri konstantnem tlaku, jo označimo s  $c_p$ , če je merjena pri konstantnem volumnu, pa s  $c_v$ . Vrednost specifične toplote je pri konstantnem volumnu ali pri konstantnem tlaku pri trdnih materialih in nestisljivih tekočinah skoraj enaka, pri plinih pa se vrednosti med njima razlikujejo.

Za določitev specifične toplote moramo poznati količino toplote  $Q$  (W), ki smo jo dovedli določeni masi snovi  $m$  (kg), ter izmeriti, za koliko se je spremenila temperatura snovi  $\Delta T$  (K). Agregatno stanje snovi se med segrevanjem ne sme spremeniti. Dovedeno toploto izračunamo po enačbi:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Pri idealnih pogojih, kjer ne pride do toplotnih izgub med segrevanjem, lahko dovedeno toploto izračunamo kot produkt moči grelca  $P$  (W) in časa segrevanja  $t$  (s):

$$Q = P \cdot t \quad (2)$$

Ko enačbi združimo, dobimo enačbo za specifično toploto snovi:

$$c = \frac{P \cdot t}{m \cdot \Delta T} \quad (3)$$

### 2.3 Temperaturna prevodnost

Temperaturna prevodnost pove, kako hitro se bo vzpostavilo stacionarno stanje prevoda toplote pri spremembi zunanjih pogojev. Definirana je kot razmerje med toplotno prevodnostjo in volumsko toplotno kapaciteto. Osnovna enota je  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ , označimo pa jo s grško črko  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (6)$$

kjer je  $\lambda$  toplotna prevodnost ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), produkt gostote ( $\rho$ ) in specifične toplote ( $c_p$ ) pa predstavlja volumsko toplotno kapaciteto z enoto  $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ . V materialih z visoko temperaturno prevodnostjo se konstanten temperaturni gradient pri spremembi temperature okolice ali pogojev prestopa toplote hitreje vzpostavi.

## 3. Opis naprave Hot Disk TPS 2200

Naprava za meritve in določevanje toplotnih lastnosti Hot Disk TPS 2200 (Slika 3) je proizvod podjetja Hot Disk AB, Göteborg, Švedska. Omogoča merjenje toplotne prevodnosti v območju od 0,01 do 500  $\text{W/mK}$ , temperaturne prevodnosti v območju od 0,01 do 300  $\text{mm}^2/\text{s}$  in toplotne kapacitete do 5  $\text{MJ/m}^3\text{K}$ . Meritve se lahko izvedejo v temperaturnem intervalu od  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  do  $750\text{ }^\circ\text{C}$ .



Slika 3 - Naprava za meritve toplotnih lastnosti Hot Disk TPS 2200.

S to napravo lahko merimo toplotne lastnosti različnih materialov, kot so:

- kovine,
- zlitine,
- polimeri,
- izolacijski materiali,

- prahovi ter
- visoko in srednje viskozne tekočine.

V Tabeli 1 so zbrani osnovni merilni parametri naprave Hot Disk TPS 2200.

Tabela 1 - Osnovni merilni parametri naprave Hot Disk TPS 2200

Toplotna prevodnost	0,01 do 500 W/mK
Temperaturna prevodnost	0,1 do 300 mm <sup>2</sup> /s
Specifična toplota	do 5 MJ/m <sup>3</sup> K
Merilni čas	2,5 do 1280 s
Ponovljivost	~ 1 %
Natančnost	~ 2–5 %
Temperaturno območje	-50 °C do +750 °C
Senzorji	Kapton: 7577, 5465, 5501, 8563, 4922, 5599 Mica: 5465, 5082, 4921, 4922, 5599 teflonski: 7577, 5465, 5501

Za napravo Hot Disk TPS 2200 se v inženirski praksi največkrat uporablja senzor Hot Disk, ki je sestavljen iz dvojne spirale, ki je električno izolirana z dvema tankima plastema izolacijskega materiala. Večinoma je iz tanke folije niklja. Uporablja se zaradi linearne temperaturne spremembe specifične električne upornost in visokega temperaturnega koeficienta električne upornosti. Senzor se lahko uporablja v temperaturnem razponu temperatur od 0 °C do 750 °C.

#### 4. Opis zlitine

Zlitine s spominom oblike (SMA) kažejo zmožnost vrnitve v neko prej definirano obliko ali velikost, če so podvržene ustrezni obdelavi. To je posledica faznih transformacij. Takšne fazne transformacije lahko dosežemo z mehanskimi (obremenitvenimi) oziroma toplotnimi obdelavami (hlajenje in segrevanje).

Pojav oblikovnega spomina pri kovinskih zlitinah lahko razložimo z delovanjem martenzitne transformacije. Pri tej transformaciji se zlitini pri spremembi temperature spremeni kristalna struktura. Pravimo, da ima zlitina različne faze. Visokotemperaturna faza se imenuje avstenit, nizkotemperaturna faza pa martenzit. Temperatura, pri kateri zlitina preide iz ene v drugo fazo, je odvisna od sestave zlitine in jo lahko spremenimo s spremembo deleža kemijskih elementov ali dodajanjem zlitnih elementov.

Zelo poenostavljeno povedano je avstenitna struktura bolj urejena od martenzitne, zato se zlitina pri prehodu iz martenzita v avstenit vedno vrne v prvotno obliko.

Glavne vrste (tipi) zlitin s spominom oblike so nitinol (Ni-Ti) ter zlitine na osnovi bakra in železa Fe. Zlitine s spominom oblike so zanimive na številnih tržnih področjih za inženirske aplikacije. V tehničnih aplikacijah so pogosto potrebne zlitine s spominom oblike z visoko trdnostjo in učinkom spomina oblike. Glavne prednosti zlitin na osnovi bakra so nizka cena, razmeroma enostavna obdelava, visoka električna in toplotna prevodnost v primerjavi z drugimi zlitinami s spominom oblike. Med zlitinami s spominom oblike na osnovi bakra so

obsežno raziskane zlitine Cu-Al-Ni in Cu-Al-Zn. Vendar sta Cu-Al-Ni in Cu-Al-Zn krhka in dovzetna za intergranularni lom. Iz tega razloga so v tej preiskavi izbrane zlitine s spominom oblike tipa Cu-Al-Mn. Ugotovljeno je bilo, da Cu-Al-Mn zlitine kažejo boljšo duktilnost in dobro regeneracijo deformacij. Razlog za večjo duktilnost zlitine s spominom oblike Cu-Al-Mn je mogoče pripisati zmanjšanju stopnje urejenosti  $\beta$  matične faze. Dodatek mangana SMA na osnovi bakra stabilizira osnovno fazo in izboljša duktilnost zlitin. Druge prednosti Cu-Al-Mn zlitin so večja obremenitev spomina oblike, večja sposobnost obnovitvena, boljša duktilnost in večja zmogljivost dušenja.

V naši raziskavi smo uporabili zlitino s spominom oblike (SMA – Shape Memory Alloy) na osnovi bakra Cu-Al-Mn. Njena (okvirna) kemijska sestava je prikazana v Tabeli 2, mehanske lastnosti pa so zbrane v Tabeli 3. Vzorec iz zlitine Cu-Al-Ni ( $\text{\O}40 \times 12 \text{ mm}$ ) izdelan in pripravljen za analizo toplotnih lastnosti pa je prikazan na Sliki 4.

*Tabela 2 - Kemijska sestava zlitine Cu-Al-Mn*

Element	Cu	Al	Mn
m. %	81,3	15,3	3,4

*Tabela 3 - Mehanske lastnosti zlitine Cu-Al-Mn v ulitem stanju*

Natezna trdnost, MPa	Raztezek, %	Kontrakcija, %	Trdota, HV10
627,2	8,5	17,9	234,8



*Slika 4 - Vzorec iz zlitine Cu-Al-Ni ( $\text{\O}40 \times 12 \text{ mm}$ ) izdelan in pripravljen za analizo toplotnih lastnosti.*

## 5. Potek dela

Za merjenje toplotnih lastnosti izbranega materiala smo v ta namen pridobili dva enaka vzorca zlitine, premera 4 cm, ter debeline 1,2 cm, ki sta pripravljena za merjenje. Vzorec ni popolnoma homogen (Slika 4), v sebi ima številne zračne mehurčke.

V Metalografskem laboratoriju Katedre za inženirske materiale Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani smo vzorca pregledali in analizirali z vrstičnim elektronskim mikroskopom na poljsko emisijo (FEG SEM) Thermofischer Quattro S. Osredotočili smo se na pregled (ne)homogenosti in izvedli kemijsko analizo.

Thermo Fisher Scientific Quattro S (Slika 5) je vrhunski 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 4000 Pa).

Za slikanje vzorcev je FEG SEM Quattro S opremljen z detektorji sekundarnih (SE), povratno sipanih (PSE) in presevnih elektronov (STEM). Združuje principe, ki se uporabljajo v presevnih elektronskih mikroskopih (TEM) in vrstičnih elektronskih mikroskopih (SEM). Ločljivost v visokem vakuumskem načinu znaša 0,8 nm (STEM), 1,0 nm (SE) oziroma 2,5 nm (PSE), v ESEM načinu pa 1,3 nm (SE) oziroma 2,5 nm (PSE). Za analizo kemijske sestave je vgrajen EDXS detektor nove generacije Ultim<sup>®</sup> Max.



*Slika 5 - Vrstični elektronski mikroskop na poljsko emisijo Thermofischer Quattro S.*

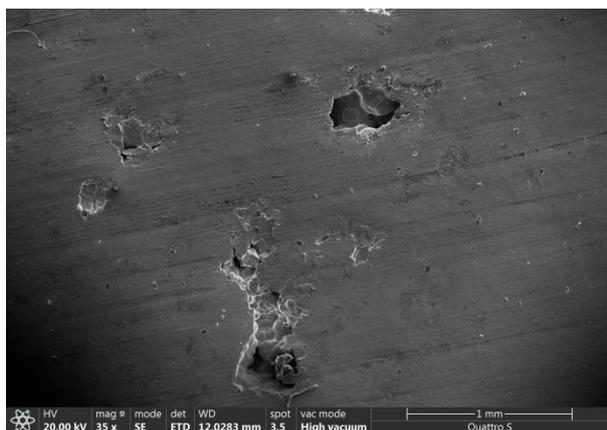
Thermo Fisher Scientific Quattro S je vrstični elektronski mikroskop na poljsko emisijo, ki omogoča karakterizacijo:

- kovin in zlitin, zvarov, magnetnih in supermagnetnih materialov,
- keramičnih materialov, kompozitov in polimernih materialov,
- tankih plasti,
- mineralov, ter

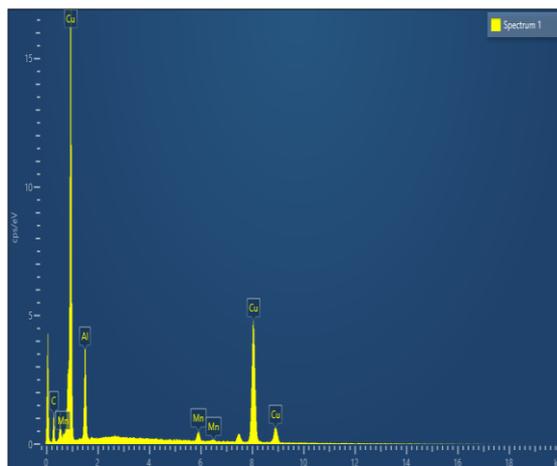
- mehkih materialov: polimerov, tekstilij, filtrov, gelov in tkiv.

Za izvedbo dinamičnih preiskav med ohlajanjem in segrevanjem je Quattro S opremljen z nosilcema za ohlajanje do temperature  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  in segrevanje do temperature  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

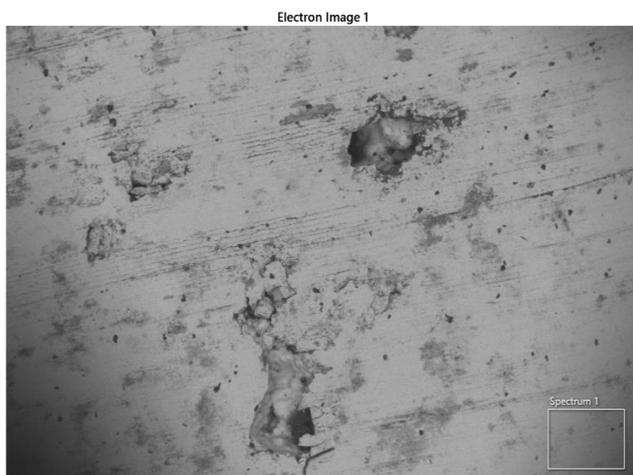
Na Sliki 6 je prikazana površina vzorca (Slika 4) z jasno vidnimi nehomogenostmi in zračnimi mehurčki.



*Slika 6 - Površina vzorca posneta z vrstičnim elektronskim mikroskopom z jasno vidnimi nehomogenostmi.*



*Slika 7 - Slika 6 z označenim delom za kemijsko analizo (levo) in spekter elementov (desno).*



*Tabela 4 - Rezultati kemijske analize zlitine Cu-Al-Mn s SEM (Slika 6)*

Result Type	Weight %
Spectrum Label	Spectrum 1
Al	15.95
Mn	2.73
Cu	81.32
Total	100.00

Dan oziroma več ur pred izvedbo meritve smo vzorca zlitine Cu-Al-Mn pustili v Laboratoriju za meritve na sobni temperaturi (približno 22 °C), da je bila temperatura preko celotnega vzorca čimbolj homogena in enaka temperaturi okolice.

Izmerili oziroma določili smo vrednosti toplotnih lastnosti zlitine Cu-Al-Mn:

- toplotno prevodnost  $\lambda$  (W/mK),
- specifično toploto  $c$  (MJ/m<sup>3</sup>K) in
- temperaturno prevodnost  $a$  (mm<sup>2</sup>/s).

### **5.1 Standard ISO 22007**

Meritve in analizo oziroma vrednotenje toplotnih lastnosti zlitine smo izvedli na napravi oziroma instrumentu Hot Disk TPS 2200 v skladu s standardom ISO 22007-2 pri temperaturi okolice.

V nadaljevanju sledi kratek opis in zahteve standardov skupine ISO 22007: standardov ISO 22007-1 in ISO 22007-2. Standard je prikazan na Sliki 8, opisuje metode za določanje toplotnih in temperaturnih lastnosti materialov.

INTERNATIONAL  
STANDARD

ISO  
22007-1

First edition  
2009-07-01

Plastics — Determination of thermal  
conductivity and thermal diffusivity —

General principles

— Détermination de la conductivité thermique et de la  
diffusivité thermique —  
Principes généraux



Reference number  
ISO 22007-1:2009(E)

© ISO 2009

*Slika 8 - Standard ISO  
22007,-2.*

INTERNATIONAL  
STANDARD

ISO  
22007-2

First edition  
2008-12-15

Plastics — Determination of thermal  
conductivity and thermal diffusivity —

Part 2:  
Transient plane heat source (hot disc)  
method

Plastiques — Détermination de la conductivité thermique et de la  
diffusivité thermique —  
Partie 2: Méthode de la source plane transitoire (disque chaud)



Reference number  
ISO 22007-2:2008(E)

© ISO 2008

*Slika 9 - Slika 8 - Standard ISO  
22007,-2*

ISO 22007-1 je bil pripravljen pod tehnično komisijo ISO/TC 61, Plastika, Podkomite SC5, Fizikalno-kemijske lastnosti. Sestavljen je iz naslednjih delov:

- splošna načela,
- Hot disk metoda,
- analiza toplotnih valov,
- laserska metoda in na koncu še
- določitev toplotne prevodnosti.

V standardu so opisani strokovni izrazi, ki se nanašajo na toplotne lastnosti. Toplotna prevodnost se nanaša na način prenosa toplote, torej na uporabljeno metodo preizkusa. Razmere okolja, ki vplivajo na meritev toplotne lastnosti, kot so pritisk, temperatura okolja. Za opravljanje meritev je na voljo več različnih metod, ki so opisane v standardu. Metodo moramo pravilno izbrati glede na vrsto in geometrijo preizkušanca. Odvisno od vseh naštetih vplivov, vrste materiala preizkušanca, vrste metode, nastanka temperaturnega območja lahko nato določimo eno ali več termo-fizikalnih lastnosti.

## 5.2 Meritve

Pred meritvami smo merilni senzor namestili med obema ravnima površinama vzorcev, katerih hrapavost mora biti vsaj za red velikosti manjša od polmera senzorja. Vzorca smo vstavili v

napravo in ju pritrdili, ker se morata površini vzorca dobro prilegati površini senzorja, da se izognemo morebitni zračni reži med stičnimi površinami (Slika 9).



*Slika 10 - Meritev toplotnih lastnosti Cu-Al-Mn ( $\text{Ø}40 \times 12 \text{ mm}$ ) pri sobni temperaturi.*



*Slika 11 - izvajanje meritev*

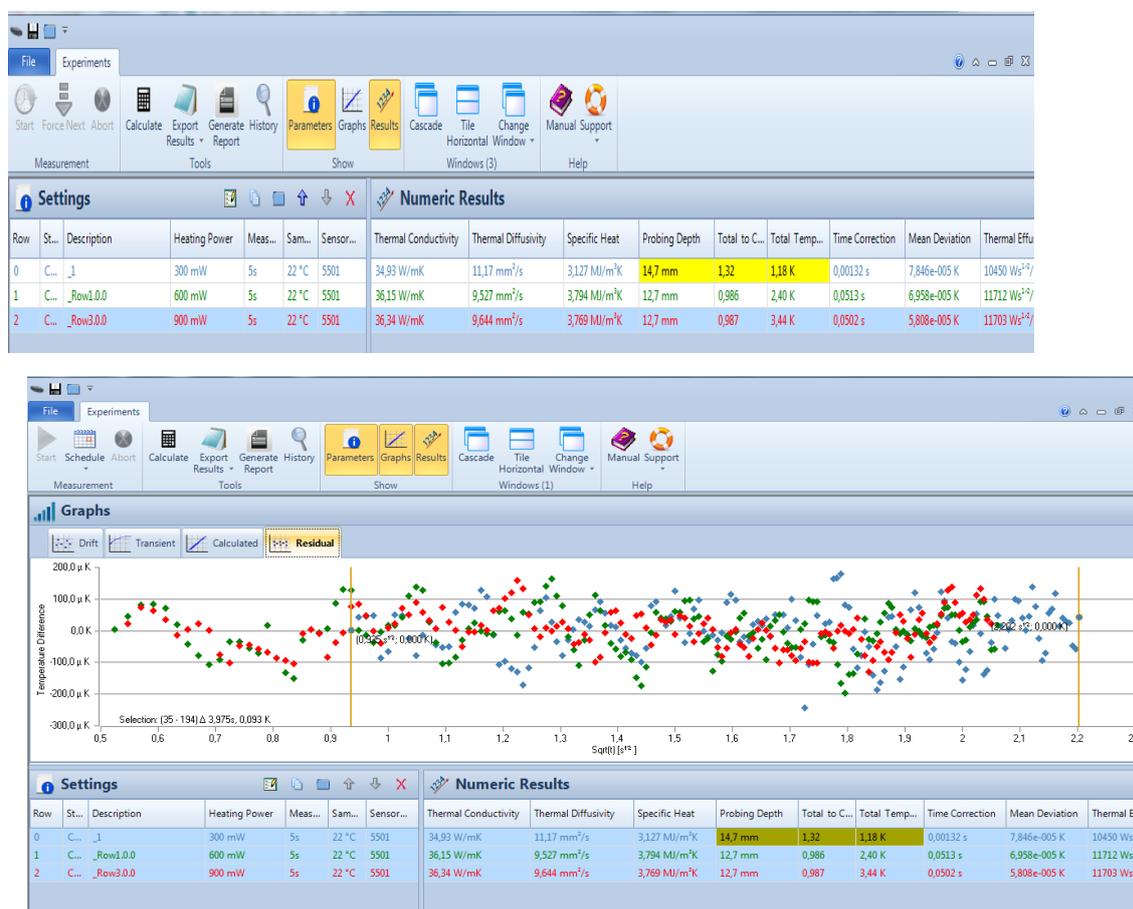
Ko smo vzorca vstavili v napravo, smo začeli proces merjenja, ter počakali na rezultate grafa. Meritev smo morali ponoviti, saj nismo natančno pritrdili vzorcev, ter zaradi zračne reže dobili prevelika odstopanja od standarda in zato tudi neveljaven diagram. Po odpravi napake, smo meritev ponovili, izvedli smo tri meritve, z različno močjo (300 mW, 600 mW in 900 mW). Dobili smo rezultate prikazane v Tabeli 5.

Tabela 5 - Rezultati izvedenih meritev toplotnih lastnosti.

Meritev	Moč [mW]	Čas meritve [s]	Temperatura [°C]	Toplotna prevodnost [W/mK]	Temperaturna prevodnost [mm <sup>2</sup> /s]	Specifična toplota [MJ/m <sup>2</sup> K]
1	300	5	22	34,93	11,170	3,127
2	600	5	22	36,15	9,527	3,794
3	900	5	22	36,34	9,644	3,769

Na sliki 10 je prikazan originalni izpis izmerjenih vrednosti na sistemu naprave Hot Disk TPS 2200.

Tabela 6 - Originalni izpis izmerjenih vrednosti na sistemu naprave Hot Disk TPS 2200.



Opažamo, da se toplotna prevodnost zvišuje z močjo, najnižja vrednost in tudi največje odstopanje je pri prvi meritvi, z najnižjo močjo, verjetno zaradi odstopanja vdorne globine.

Pri temperaturni prevodnosti, je zanimivo, da je pri najnižji moči prevodnost najvišja, potem pri 600 mW upade, ter se pri 900 mW spet dvigne. Pri specifični toploti spet odstopa od pričakovanj, saj je vrednost najvišja pri 600 mW, namesto da bi z močjo naraščala. Drastično nižja pa je pri najnižji moči.

V Tabeli 6 so zbrane toplotne lastnosti (toplotna prevodnost, specifična toplotna in temperaturna prevodnost) analizirane zlitine spomina oblike Cu-Al- Mn pri sobni temperaturi (približno 22 °C).

*Tabela 7 - Toplotne lastnosti zlitine s spominom oblike Cu-Al-Mn pri sobni temperaturi.*

	Cu-Al-Mn
Toplotna prevodnost	35,81 W/mK
Specifična toplota	3,56 MJ/m <sup>3</sup> K
Temperaturna prevodnost	10,11 mm <sup>2</sup> /s

## 6. Zaključki

Mehanske lastnosti in mikrostruktura zlitin s spominom oblike na osnovi bakra so razmeroma dobro znane, medtem ko podatki o toplotnih lastnostih (toplotna prevodnost, specifična toplota in temperaturna prevodnost) v splošnem niso na voljo. V okviru našega raziskovalnega dela smo določili toplotne lastnosti zlitine Cu-Al- Mn.

Meritve, analize in vrednotenje smo izvedli v skladu s standardom ISO 22007-2 na sodobni visokokakovostni napravi za določevanje toplotnih lastnosti Hot Disk TPS 2200.

Toplotna prevodnost analizirane zlitine spomina oblike Cu-Al- Mn pri sobni temperaturi (približno 22 °C) znaša 35,81 W/mK, specifična toplotna 3,56 MJ/m<sup>3</sup>K in temperaturna prevodnost 10,11 mm<sup>2</sup>/s.

## 7. Zahvala

Zahvaljujeva se najini profesorici in glavni mentorici dr. Sonji Kitak za priložnost, ter pomoč in vzpodbudo pri raziskavah in izdelavi najine naloge.

Meritve sva izvedla na Oddelku za materiale in metalurgijo, na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani pod mentorstvom prof. dr. Boruta Kosca in ob pomoči doc. dr. Blaža Karpeta, Ajde Tršar in prof.dr. Aleša Nagodeta. Zahvaljujeva se vam za vaš čas, trud, ideje ter pomoč pri meritvah.

## 8. Viri

Dobrzanski L.A. Technical and Economical Issues of Materials Selection, Silesian Technical University, Gliwice, 1997.

<https://www.google.com/search?q=wikipedija+toplotna+prevodnost&aq=chrome..69i57j69i60.8503j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>  
uporabljeno dne 5.2.2022

VODLAN Mateja: Magistrsko delo, Določitev toplotnih lastnosti dentalnih materialov  
Uporabljeno dne 7.2.2022

<https://thermtest.com/what-is-thermal-conductivity> uporabljeno dne 7.2.2022

KARPE, Blaž, VODLAN, Mateja, KOPAČ, Igor, BUDAK, Igor, NAGODE, Aleš, PAVLIČ, Alenka, PUŠKAR, Tatjana, KOSEC, Borut. Thermal properties of materials used in dental medicine, Journal of Advanced Technologies and Materials, 43, 1, p.p. 1- 4, 2018. [na spletu]. 2018, 43(1), 7-10. ISSN 2620-0325. Dostopno: <http://journal-atm.org/archive/vol-43-no-1-2018>.

KOSEC., B., KARPE, B., Instrument for the thermal properties analysis Hot Disk TPS 2200, IRT3000, 1 (2017), 67.

LEŠNJAK, Matic. Toplotne lastnosti jekla PROTAC 600: diplomsko delo. [na spletu]. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, 2020. Dostopno: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=120040>.

KOSEC, Borut in Blaž, KARPE. Instrument za analizo toplotnih lastnosti Hot Disk TPS 2200, IRT3000 [na spletu]. 2016, 67, 193. Dostopno: <https://www.irt3000.si/arhiv-revij/2016/>.

International Standard ISO 22007-2: Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity, Part 2: Transient plane heat source (hot disk) method, 2012.

International Standard ISO 22007-1: Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity, Part 1: General principles, 2008.