

# HALLOV EFEKT U SLITINAMA VISOKE ENTROPIJE

Filip Filipović, F-4148

PMF, Fizički odsjek, Bijenička c. 32, 10000 Zagreb

Mentor: doc. dr. sc. Emil Tafra

Datum: 21.01.2018.

## Sažetak

U eksperimentu su na uzorcima  $(TiZrNbCu)_{0.875}Ni_{0.125}$  ( $a-HEA1$ ) i  $(TiZrNbCu)_{0.5}Ni_{0.5}$  ( $a-HEA2$ ) mjereni magnetootpor ( $MR$ ) i Hallov efekt za raspon temperatura  $2-200K$  te ovisnost otpornosti o temperaturi u rasponu  $1,3-295K$ . Uzorci su hlađeni u kriostatu sa tekućim  $He^4$  koji je smješten u unutrašnjoj posudi, dok se u vanjskoj posudi radi dodatne izolacije nalazi tekući  $N_2$ . Za napajanje je korišten izvor izmjenične struje frekvencije  $22Hz$ . Oba uzorka pokazuju određeni magnetootpor koji slabi s porastom temperature. Hallova konstanta se ne mijenja s temperaturom za oba uzorka te iznosi  $R_H = (8,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-11} \frac{\Omega m}{T}$  za  $a-HEA1$  i  $R_H = (2,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-11} \frac{\Omega m}{T}$  za  $a-HEA2$  uzorak.

## 1 Uvod

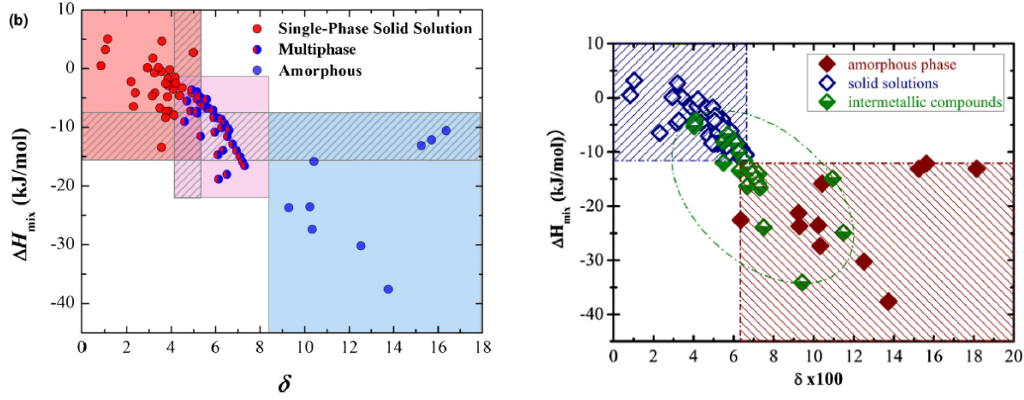
Slitine visoke entropije ( High entropy alloys-HEAs ) su relativno novo područje znanstvenog istraživanja koje se intenzivnije počelo proučavati u zadnjih dvadesetak godina. Obične slitine su najčešće sastavljene od dvije vrste metala sa mogućnošću dodavanja manjih količina drugih primjesa radi poboljšanja svojstava. HE slitine su sastavljene od pet do trinaest elemenata, gdje je koncentracija svakog od elemenata  $5-35\%$ , no, moguća su odstupanja od tih granica. Za opis HE slitina i određivanje faza koje će zauzeti koristi se nekoliko veličina. Jedna od njih je konfiguracijska entropija definirana kao:

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln(c_i), \quad (1)$$

gdje je  $R$  plinska konstanta,  $n$  broj elemenata, a  $c_i$  koncentracija  $i$ -tog elementa u slitini. Za HE slitine  $\Delta S_{mix}$  je veliko i obično se definira granična vrijednost od  $1.5R$  ( ili  $1,61R$  što odgovara  $\Delta S_{mix}$  za ekvatomsku slitinu od pet elemenata ) za njihovu formaciju. U slitinama sastavljenim od više metala postoji mogućnost formiranja intermetalne faze, čvrste otopine i amorfne faze. Intermetalni spojevi imaju uređenu kristalnu strukturu i jasan stehiometrijski omjer elemenata, dok kod čvrstih otopina jedan element predstavlja otapalo u čiju se kristalnu rešetku inkorporiraju drugi elementi na mjesta atoma otapala ili na mjesta između atoma rešetke i najčešće se radi o  $fcc$ ,  $bcc$  ili  $hcp$  kristalnoj rešetki. Kod čvrstih otopina moguće su višefazne otopine koje sadrže mješavinu dvije ili više kristalnih struktura. Kao drugi parametar u opisu HE slitina koristi se entalpija miješanja:

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, j>i}^n 4\Delta H_{AB}^{mix} c_i c_j, \quad (2)$$

gdje je  $H_{AB}^{mix}$  entalpija miješanja elemenata  $A$  i  $B$  u jednakom omjeru. Kao treći bitan parametar za opis HE slitina koristi se:



Slika 1: različite faze HE slitina u ovisnosti o  $\Delta H_{mix}$  i  $\delta$  ( preuzeto iz [2] i [3] )

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - r_i / \sum_{j=1}^n c_j r_j\right)^2}, \quad (3)$$

gdje je  $\delta$  parametar koji opisuje razliku veličina atoma u slitini. Amorfna faza preferira veći  $\delta$ , odnosno veće razlike u radijusima elemenata. Za predviđanje faze i kristalne strukture koju će slitina zauzeti koriste se još i koncentracija valentnih elektrona  $VEC$ , razlika elektronegativnosti  $\Delta\chi$  i još neke druge veličine.

Donja granica od pet elemenata za HE slitine je uzeta jer se smatra da je tada  $\Delta S_{mix}$  dovoljno velika za stvaranje čvrstih otopina, dok je gornja granica od trinaest elemenata uzeta zato jer se dodavanjem većeg broja elemenata ne očekuju nova bitna svojstva zbog logaritamske ovisnosti u  $\Delta S_{mix}$ , a mogu se dogoditi i komplikacije sa promjenama faze. Osim visoke  $\Delta S_{mix}$  HE slitine odlikuje i iskrivljena kristalna struktura zbog različitih atoma i interakcija među njima te slaba difuzija. Za predviđanje svojstava HE slitina ponekad se koristi i pravilo miješanja ( RoM ) kod kojeg se veličine računaju usrednjavanjem po udjelima pojedinih elemenata u spoju, no, RoM za mnoge veličine ( npr. temperaturu taljenja ) ne daje dobre rezultate. HE slitine se proučavaju zbog mogućnosti otkrivanja novih svojstava stvari zanimljivih za znanost, ali i iz praktičnih razloga kao što je upotreba u industriji. Za neke HE slitine su do sada otkrivena određena dobra svojstva kao što su visoka tvrdoća koju mogu održati i na visokim temperaturama uz nisku gustoću, otpornost na koroziju i lomljenje, supravodljivost, itd.

Hallov efekt se javlja u materijalima kada se na njih nametne magnetsko polje. Pod djelovanjem polja dolazi do nakupljanja pozitivnog naboja na jednoj i negativnog naboja na drugoj strani uzorka sve dok se ne uspostavi ravnoteža između sile od novostvorenog električnog polja, koje se naziva Hallovo polje, i sile zbog djelovanja magnetskog polja. Ukupna sila na naboj koji se giba u uzorku se može zapisati kao:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) - \frac{m}{\tau} \vec{v}, \quad (4)$$

gdje je  $\tau$  relaksacijsko vrijeme, odnosno prosječno vrijeme između dva sudara čestice i taj član opisuje trenje u materijalu. Hallovo polje predstavlja vertikalnu komponentu ukupnog električnog polja na smjer struje i može se zapisati kao:

$$\vec{E}_H = R_H \vec{j} \times \vec{B}, \quad (5)$$

	$\Delta H_{\text{mix}}$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$\delta$ (%)	$\Delta S_{\text{conf}}$ (J mol K <sup>-1</sup> )	VEC	$\Delta\chi$	$a(k_p)$ (Å)	$a_{\text{th}}$ (Å)	D(XRD) (g cm <sup>-3</sup> )	D(RoM) (g cm <sup>-3</sup> )
a-HEA1	-35	9.2	13.218	6.5	0.218	3.24	3.20	7.04	7.11
a-HEA2	-40	9.3	13.311	6.6	0.220	3.22	3.19	7.10	7.13
a-HEA3	-49	9.5	13.381	6.8	0.222	3.20	3.17	7.16	7.20
a-HEA4	-55	9.7	13.320	7	0.224	3.19	3.14	7.17	7.28

Slika 2: podaci za  $(TiZrNbCu)_{1-x}Ni_x$  za redom  $x = 0.125$ ,  $x = 0.15$ ,  $x = 0.2$ ,  $x = 0.25$  ( iz [1] )

gdje je  $R_H$  Hallova konstanta, a  $\vec{j}$  gustoća struje koja se može zapisati kao  $\vec{j} = qn\vec{v}$ . Jednadžba gibanja se treba rješavati u stacionarnom slučaju kada vrijedi  $\frac{d\vec{v}}{dt} = 0$  i uz uvjet da postoji samo longitudinalna komponenta struje. Tada se dobije:

$$j_x = \sigma_0 E_x \quad (6)$$

$$j_y = \frac{\sigma_0}{1 + (\omega_c \tau)^2} (-\omega_c \tau E_x + E_y) = 0 \quad (7)$$

$$j_z = 0, \quad (8)$$

gdje je  $\omega_c = \frac{qB}{m}$  ciklotronska frekvencija, a  $\sigma_0 = \frac{q^2 n \tau}{m}$  standardna vodljivost bez magnetskog polja. U aproksimaciji jedne vrste nosioca naboja Hallova konstanta je jednaka:

$$R_H = \frac{E_H}{j_x B} = \frac{1}{qn} \quad (9)$$

U slučaju dvije vrste nosioca naboja svaka vrsta će imati svoju gustoću, relaksacijsko vrijeme i masu. Tada se posebno promatra struja elektrona i struja šupljina te se ponovno zahtjeva da je ukupna vertikalna struja jednaka nula. U tom slučaju se u aproksimaciji ne prevelikih magnetskih polja i relaksacijskih vremena za Hallovu konstantu dobije:

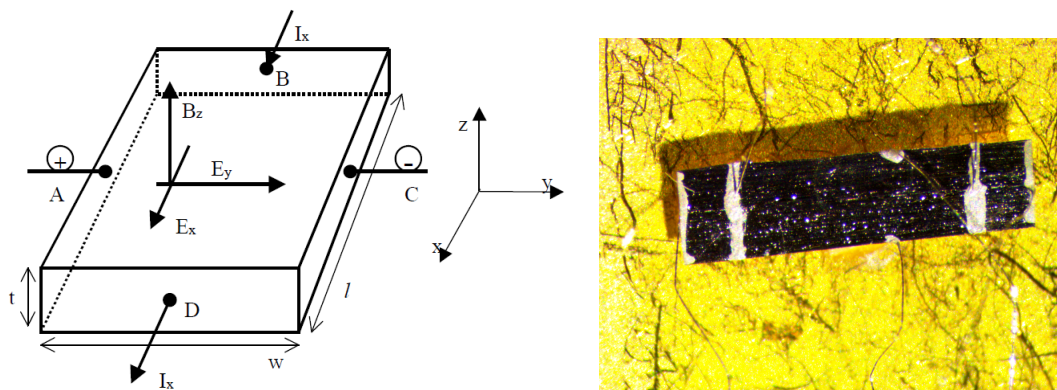
$$R_H = \frac{n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2}{e (n_e \mu_e + n_h \mu_h)^2}, \quad (10)$$

gdje je  $\mu_{e,h} = \frac{e \tau_{e,h}}{m_{e,h}}$  mobilnost elektrona odnosno šupljina. Za izračun gustoća nosioca naboja trebalo bi provesti dodatna mjerenja i izvesti dodatne relacije koje bi povezale mobilnosti sa magnetootporom i Hallovim otporom.

## 2 Mjerenja

### 2.1 Eksperimentalni postav

Uzorci  $a-HEA1$  ( $x = 0,125$ ) i  $a-HEA2$  ( $x = 0,5$ ) su proizvedeni u atmosferi plemenitih plinova kapanjem taljevine na rotirajući kotač, gdje se formira dugačka traka male širine i debljine iz koje se potom režu uzorci. Da bi se dobila amorfnu fazu potrebno je brzo hlađenje taljevine kako bi se spriječila formacija kristalne strukture. Dobiveni uzorak se pričvršćuje na postolje s time da je potrebno izolirati uzorak od postolja jer je vodljivo, što je napravljeno sa komadom drveta. Na uzorak se zatim srebrnom pastom pričvršćuju tanke platinaste žice ( promjera  $\sim 10\mu m$  ) koje se spajaju na predviđene kontakte na postolju. Kod strujnih kontakata pasta je ravnomjerno razmazana kako bi se osigurao što uniformniji tok struje. Kontakti za mjerenje magnetootpora su odvojeni od strujnih i nalaze se između njih, dok su kontakti za mjerenje Hallovog napona na bočnim stranama



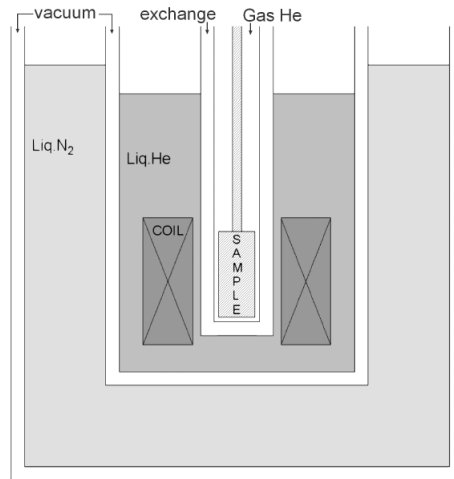
Slika 3: lijevo je prikazan Hallov efekt, a desno je  $a - HEA1$  uzorak iz eksperimenta

uzorka. Prije početka mjerenja kroz kontakte se pušta struja te se mjeri napon kako bi se provjerilo jesu li kontakti ispravni i ima li ikakvih problema sa uzorkom. Uzorak se zatim postavlja na nosač uzorka koji omogućuje spuštanje uzorka u kriostatsku komoru. Uzorak je oklopljen sa bakrenim cilindrom koji se nalazi na kraju nosača i oko cilindra su namotane strujne žice. Bakar ima dobru toplinsku vodljivost što omogućuje približno homogenu temperaturu u području oko uzorka, a žice oko cilindra služe za grijanje po potrebi puštanjem struje. Unutar bakrenog cilindra se nalazi i Cernox termometar smješten odmah uz uzorak. Cernoxu se otpor mijenja sa magnetskim poljem ( najviše na  $T \approx 2K$  ), no, ne previše pa to nema značajnijih utjecaja na mjerenje temperature. Za mjerenje i kontrolu temperature korišten je uređaj marke *LakeShore*.

Kriostat je sastavljen od tri posude koje su međusobno i od vanjskog prostora vakuumski izolirane. U vanjskoj posudi se nalazi tekući dušik, u drugoj posudi je tekući helij, a u unutrašnjoj posudi je smješten nosač sa uzorkom. U posudi sa tekućim helijem nalazi se zavojnica koja je na temperaturama u posudi supravodljiva i može stvarati polja do  $18T$ . Tijekom rada, promjena polja kroz zavojnicu se ne smije događati prebrzo kako ne bi došlo do zagrijavanja i gašenja ( quenching ) zavojnice i kriostata. U kriostat iz raznih izvora ulazi toplina zbog čega kapljevine postepeno isparavaju pa je potrebno odvoditi plin koji nastaje isparavanjem kako ne bi došlo do dodatnog zagrijavanja. Glavni izvori zagrijavanja u kriostatu su dovod topline kroz dijelove kriostata, vođenje topline kroz preostali plin u vakuumskoj izolaciji, zračenje topline, dovod topline kroz nosač i žice, i dr. Za hlađenje uzorka koristi se *VTI* ( Variable Temperature Inset ) koji je smješten između posuda s tekućim helijem i uzorkom tako da ih povezuje. *VTI* funkcionira kao ventil i može kontrolirano uzimati tekući helij i helijev plin te ga ubrizgavati u posudu sa uzorkom. Iz posude sa uzorkom se pumpom odvodi plin tako da helij koji se ubrizgava iz *VTI* ima prostora za ekspanziju. Pri ekspanziji heliju se snizuje temperatura te je tako moguće ohladiti uzorak na temperature niže od temperature ukapljivanja  $He^4$ . U blizini uzorka se također nalazi komad metala umotan u žicu kroz koju se može puštati struja kako bi se po potrebi uzorak zagrijao i regulirala temperatura. Pokraj *VTI* se nalazi i još jedan termometar koji nerijetko pokazuje ( malo ) drugačiju temperaturu nego termometar pokraj uzorka, što se može objasniti činjenicom da temperatura u posudi nije homogena. Na računalu ( svi računalni programi u eksperimentu su napisani u programskom paketu LabView ) je moguće kontrolirati intenzitet rada *VTI* i grijača, ali je moguće namjestiti i da se temperatura sama regulira tako da se zada ciljana temperatura i njezina promjena u vremenu. Tada se u programu mogu pratiti dvije krivulje u vremenu, jedna predstavlja zadanu vrijednost temperature, a druga stvarnu vrijednost. Za reguliranje temperature mogu se u programu zadati *PID* vrijednosti. Parametar  $P$  se odnosi na trenutnu razliku krivulja zadane i mjerene temperature,  $I$  se odnosi na integral razlike krivulja kroz određeni vremenski period, a  $D$  se odnosi na promjenu u vremenu



krivulja zadane i izmjerene temperature i svi parametri određuju intenzitet rada *VTI* i grijača u prilagodbi temperature.



Slika 4: shematski prikaz kriostatske komore ( diplomski rad B. Mihaljević )

Strujni krug za mjerenje se sastoji od izvora izmjenične struje frekvencije  $f = 22\text{Hz}$  te serijski spojenog otpornika od  $1\Omega$  sa  $a - \text{HEA}$  uzorkom. Signal od napona i Hallovog napona prvo odlazi u transformator gdje se povećava za faktor 100, a potom u *lock – in* pojačalo. *Lock – in* pojačalo je vrsta pojačala koja može izvlačiti i mjeriti signale točno određene frekvencije. *Lock – in* je spojen sa izvorom struje i iz izvora dobiva referentni signal, odnosno frekvenciju koju treba mjeriti. Princip rada *lock – ina* se oslanja na ortogonalnost sinusoidalnih funkcija - umnožak dviju sinusoidalnih funkcija usrednjen preko dovoljno dugog vremenskog perioda daje nulu. *Lock – in* usrednjava registrirani i referentni signal i kao rezultat toga dobiva se  $X$  komponenta signala zadane frekvencije, no, *lock – in* mjeri i  $Y$  komponentu signala koja je pomaknuta u fazi za  $\frac{\pi}{2}$ . Amplituda signala je tada dana sa  $A = \sqrt{X^2 + Y^2}$ . Za uklanjanje  $Y$  komponente iz mjerenja potrebno je podesiti fazu na *lock – inu*. Za podešavanje faze koristi se otpornik od  $1\Omega$  koji je serijski spojen sa uzorkom. Razlog zašto se koristi otpornik, a ne uzorak je u tome što smo za otpornik sigurni da ima samo realnu komponentu otpora, dok bi uzorak mogao sadržavati nešto imaginarne komponente. Struja korištena u eksperimentu ( *RMS* vrijednost ) iznosi  $200, 1\mu\text{A}$ .

Kod Hallovog efekta definira se Hallov otpor kao:

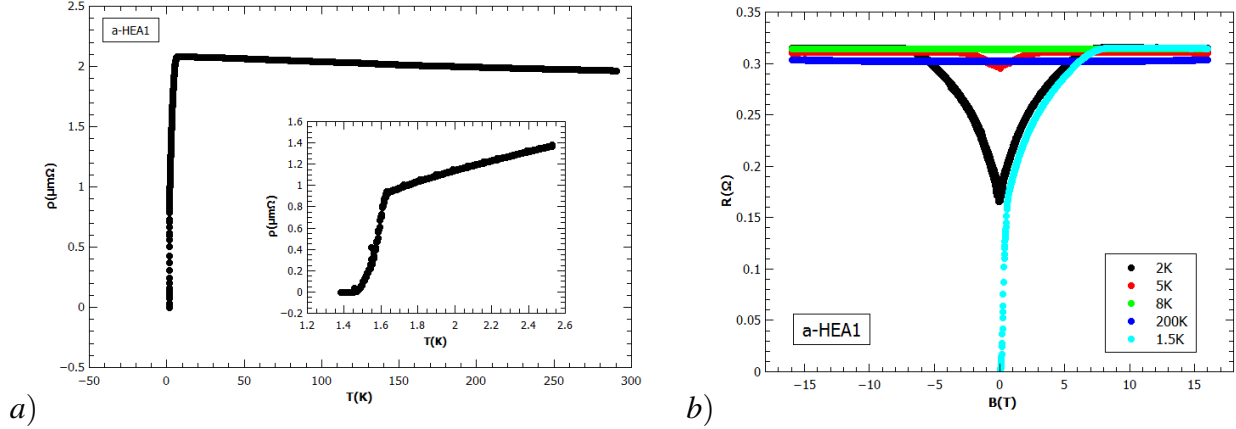
$$R_{xy} = \frac{V_H}{I_x} = \frac{R_H}{t} B, \quad (11)$$

gdje je  $t$  debljina uzorka. Kontakti za mjerenje Hallovog napona nisu idealno postavljeni jedan nasuprot drugoga pa zbog toga u Hallovom naponu postoji i komponenta magnetootpora. Isto tako, kod magnetootpora je moguće da postoje parazitski otpori zbog kojih bi se dobivali različiti rezultati za suprotne smjerove polja. S obzirom da je magnetootpor simetričan, a Hallov otpor antisimetričan potrebno je provesti simetrizaciju, odnosno antisimetrizaciju. Umjesto posebno za svaki smjer polja promatraju se naponi:

$$V = \frac{V_+ + V_-}{2}, \quad V_H = \frac{V_{H+} - V_{H-}}{2}. \quad (12)$$

Želi li se eliminirati magnetootpor iz Hallovog otpora potrebno je koristiti kompenzaciju. Kompenzacija se sastoji u tome da se signali iz otpornika i uzorka poslije transformatora šalju u dodatna

pojačala. Pojačanja signala se namjeste tako da razlika otpora i Hallovog otpora pri polju  $B = 0$  daje 0. Tada se kao Hallov otpor mjeri ta razlika. Kada se upali polje magnetootpor raste, ali u jednakom postotku tako da magnetootpor u Hallovom otporu ostaje eliminiran. Magnetootpor se u uzorku javlja zato jer nemaju svi nosioci naboja iste brzine pa se oni sa brzinom većom ili manjom od neke srednje brzine jače raspršuju, što povećava otpor.



Slika 5: a) prikazuje  $\rho(T)$ , a b) magnetootpor za  $a - HEA1$

## 2.2 Uzorak a-HEA1

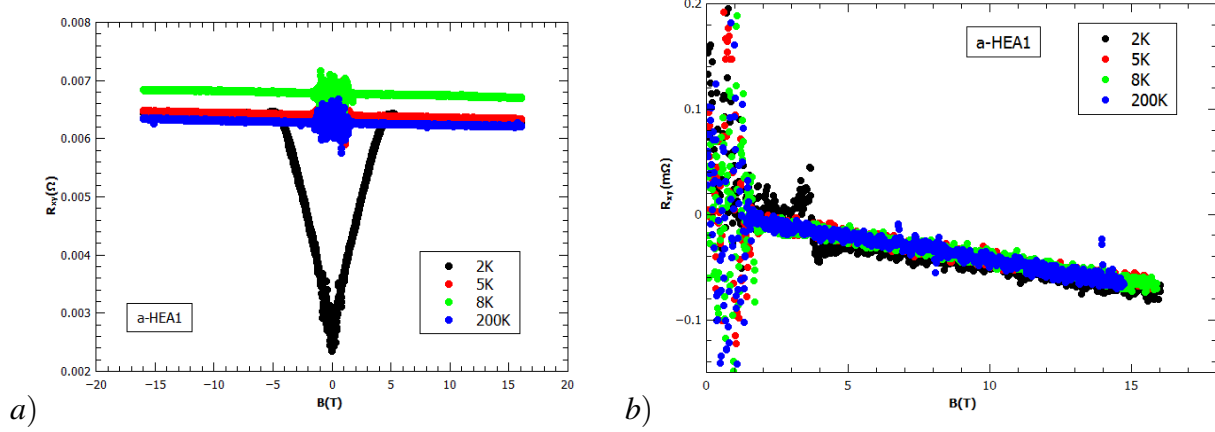
Prije rezanja masa uzorka je iznosila  $m = (4,7 \pm 0,1) \text{ mg}$ , duljina  $l_{pr} = (30,7 \pm 0,3) \text{ mm}$ , a širina  $w = (1,2 \pm 0,1) \text{ mm}$ . Gustoća uzorka je izračunata iz RoM-a prema izrazu  $\frac{1}{D} = \sum_i \frac{w_i}{D_i}$ , gdje je  $w_i$  maseni udio, a  $D_i$  gustoća i-te komponente i dobiveno je  $D = 7,04 \text{ g/cm}^3$  ( za gustoće RoM daje dobre rezultate ). Iz tih podataka je izračunata debljina uzorka za koju se dobije  $t = (18 \pm 2) \mu\text{m}$ . Poslije rezanja duljina uzorka je iznosila  $l = (4,67 \pm 0,03) \text{ mm}$ , dok je širina nepromijenjena. Udaljenost naponskih kontakata gledajući po sredini kontakta je  $l_{VV} = (3,2 \pm 0,3) \text{ mm}$ . Sve duljine su mjerene programom u kojem je moguće određenu duljinu s metra pretvoriti u piksele te tako s fotografija uzoraka odrediti duljine, a greške su procijenjene s obzirom na oblik uzorka.

Na Slici 5a prikazana je ovisnost otpornosti o temperaturi za  $a - HEA1$  uzorak. Kao što je vidljivo sa slike, uzorak ima supravodljivi prijelaz na temperaturi  $T_C \approx 1,55 \text{ K}$ . Za usporedbu, otpornost  $a - HEA1$  na sobnoj temperaturi je za približno faktor 100 veća od otpornosti bakra. Na Slici 5b prikazan je magnetootpor za temperature 2K, 5K, 8K, 200K te 1,5K gdje je zapravo posrijedi supravodljivi prijelaz. Magnetootpor je dosta izražen na temperaturama bliskim supravodljivom prijelazu, ali brzo slabi tako da već na 8K ga gotovo nema. Za mala polja magnetootpor ovisi približno kao  $\sim B^{1/2}$ , dok na većim poljima dolazi do saturacije. Radi provjere napravljeno je i mjerenje na 40K koje nije donijelo ništa novo pa ovdje nije prikazano zbog preglednosti grafa. Hallov otpor prikazan je na Slici 6a, gdje je vidljiv doprinos šuma i magnetootpora, i na Slici 6b gdje je antisimetriziran te se vidi da je Hallov efekt jednak za sve temperature. Hallov koeficijent dobije se iz nagiba pravca i iznosi:

$$R_H = -(8,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-11} \frac{\Omega m}{T}, \quad (13)$$

gdje je greška mjerenja procijenjena. U eksperimentu su naponski kontakti bili suprotno postavljeni od kontakata u teoriji, odnosno izvodu Hallovog efekta, što znači da je Hallova konstanta u

stvari pozitivna, a većinski nosioci naboja su šupljine. U aproksimaciji jedne vrste nosioca naboja dobije se  $p = 7,51 \cdot 10^{28} m^{-3}$ . Hallov efekt u uzorku  $a - HEA1$  usporediv je sa Hallovim efektom u cinku ( $R_H \approx 10 \cdot 10^{-11} \frac{\Omega m}{T}$ , ovisno o izvoru). Osim standardnog mjerenja isprobano je i mjerenje s kompenzacijom pri temperaturi  $T = 2K$ . Kompenzacija je u ovom slučaju eliminirala samo dio magnetoopora i javili su se problemi sa promjenom faze tokom mjerenja tako da ova metoda nije dalje korištena.



Slika 6: pod a) je Hallov otpor bez, a pod b) sa antisimetrizacijom za  $a - HEA1$

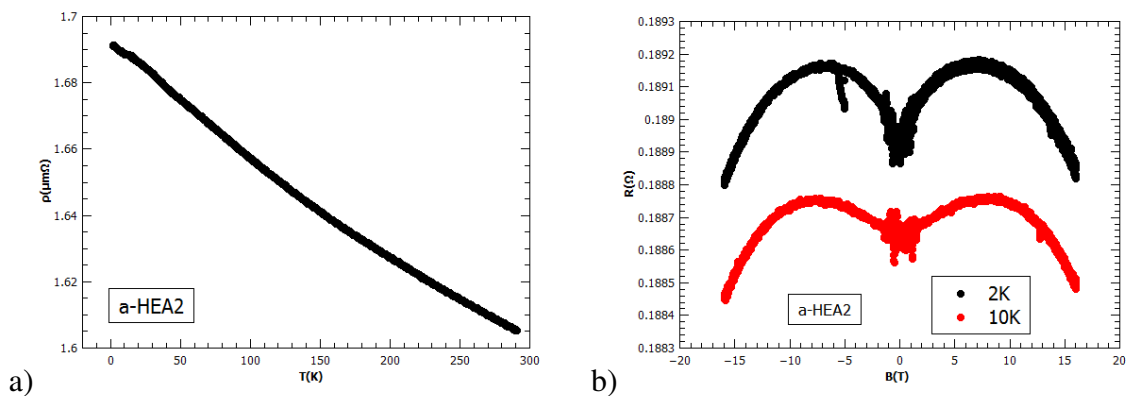
### 2.3 Uzorak a-HEA2

Za  $a - HEA2$  uzorak procedura pripreme uzorka i mjerenja je bila ista kao i za  $a - HEA1$  uzorak. Masa prije rezanja je  $m = (7,7 \pm 0,1) mg$ , duljina  $l_{pr} = (30,9 \pm 0,3) mm$ , a širina  $w = (1,00 \pm 0,06) mm$ . Gustoća iz RoM-a je  $D = 7,70 g/cm^3$  pa za debljinu slijedi  $t = (32 \pm 2) \mu m$ . Duljina uzorka poslije rezanja je  $l = (5,66 \pm 0,15) mm$ , a udaljenost naponskih kontakata  $l_{VV} = (3,5 \pm 0,3) mm$ .

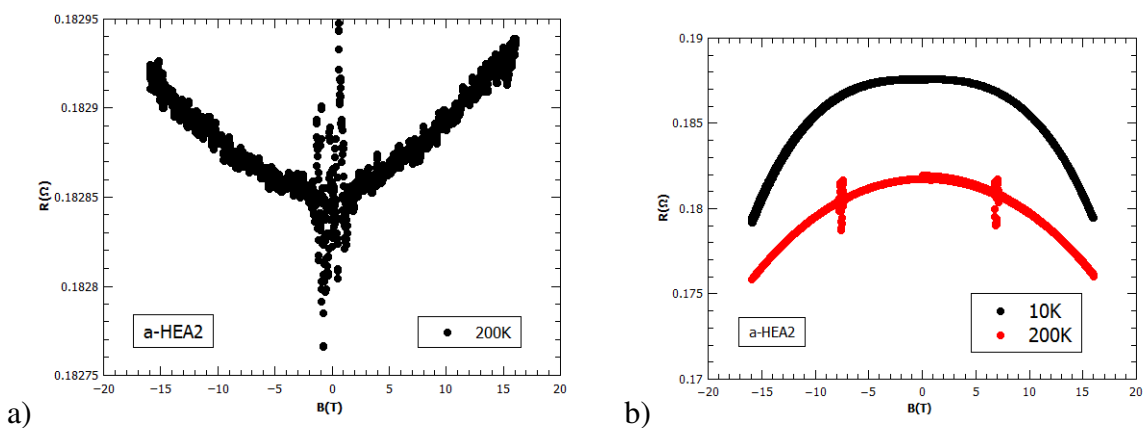
Otpornost uzorka prikazana je na Slici 7a. Za razliku od  $a - HEA1$  uzorka,  $a - HEA2$  nema supravodljivi prijelaz na temperaturama iz eksperimenta, već se samo može primijetiti monoton, gotovo linearan pad otpornosti s porastom temperature. Magnetooppor za frekvenciju  $22Hz$  prikazan je na Slici 7b i 8a gdje se vidi promjena izgleda krivulje s temperaturom, no, treba primijetiti da je promjena otpora s poljem u ovom slučaju mala. Napravljeno je i nekoliko mjerenja magnetoopora sa drugim frekvencijama struje. Neka od tih mjerenja prikazana su na Slici 8b za  $f = 77Hz$ , gdje se može primijetiti drugačiji oblik krivulja i veća promjena otpora s poljem nego za  $f = 22Hz$ . Za druge isprobane frekvencije su se također dobivali različiti rezultati, što se sve skupa vjerojatno može objasniti postojanjem kapaciteta ili induktiviteta u krugu. Hallov otpor i njegova antisimetrizacija prikazani su na Slici 9. Kao i za  $a - HEA1$ , Hallova konstanta se ne mijenja s temperaturom i iznosi:

$$R_H = (2,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-11} \frac{\Omega m}{T}, \quad (14)$$

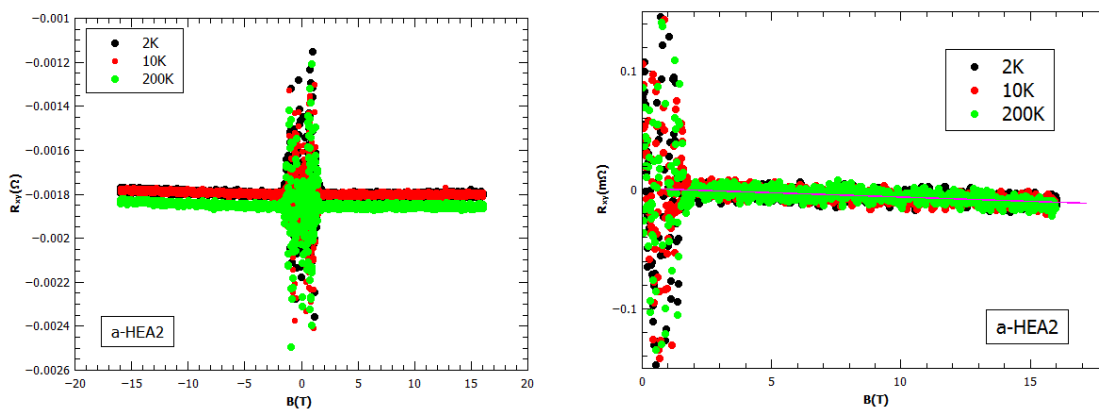
iz čega se u aproksimaciji jedne vrste nosioca naboja dobije  $p = 2,72 \cdot 10^{29} m^{-3}$  (Hallova konstanta za bakar je  $R_H \approx -5 \cdot 10^{-11} \frac{\Omega m}{T}$ ). Uzorak  $a - HEA2$  ima nešto manju otpornost i Hallovu konstantu od  $a - HEA1$ , no, radi se o usporedivim veličinama.



Slika 7: pod a) je  $\rho(T)$  za  $a-HEA2$ , a pod b) magneto otpor za  $T = 2K$  i  $T = 10K$  pri  $f = 22Hz$



Slika 8: pod a) je  $MR$  za  $T = 200K$  i  $f = 22Hz$ , a pod b) je  $MR$  za  $T = 10K$  i  $T = 200K$  pri  $f = 77Hz$



Slika 9: lijevo je Hallov otpor bez, a desno sa antisimetrizacijom pri  $f = 22Hz$

### 3 Zaključak

Otpornost oba uzorka, izuzev područje blizu supravodljivog prijelaza kod  $a-HEA1$ , pokazuje neobično svojstvo opadanja sa temperaturom, što je obično karakteristika (intrinzičnih) poluvodiča,

dok je sam iznos otpornosti usporediv sa otpornošću nekih metala. Magnetooppor je općenito slab za oba uzorka, osim u  $a - HEA1$  za temperature do  $\sim 5K$ , i pokazuje razne vrste ovisnosti o magnetskom polju za koje trenutno nema modela koji bi ih objasnio. Hallova konstanta kod oba uzorka se ne mijenja s temperaturom i usporediva je s Hallovom konstantom u metalima. Zaključno, postoji veliki broj HE slitina koje je moguće napraviti i njihovo istraživanje bi moglo dovesti do otkrića nekih zanimljivih i korisnih svojstava.

## 4 Literatura

- [1] K. Biljaković et al.: Electronic structure and properties of  $(TiZrNbCu)_{1-x}Ni_x$  high entropy amorphous alloys
- [2] Y.F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu and Y. Yang: High-entropy alloy: challenges and prospects
- [3] S. Guo, Q. Hu, C. Ng, C.T. Liu: More than entropy in high-entropy alloys: Forming solid solutions or amorphous phase
- [4] Jien-Wei Yeh: Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys
- [5] Amir Hamzić: Niskotemperaturna fizika i supravodljivost