

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA

**KOEXISTENCIA MAGNETICKÉHO USPORIADANIA
A SUPRAVODIVOSTI V HEUSLEROVÝCH
ZLIATINÁCH**

2020

Samuel Nalevanko

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA

KOEXISTENCIA MAGNETICKÉHO USPORIADANIA
A SUPRAVODIVOSTI V HEUSLEROVÝCH
ZLIATINÁCH

ŠTUDENTSKÁ VEDECKÁ KONFERENCIA

Študijný program:	Fyzika-biológia
Pracovisko:	TIP - UPJŠ
Vedúci práce:	RNDr. Ladislav Galdun, PhD.
Konzultant práce:	prof. RNDr. Rastislav Varga, DrSc.

Košice 2020

Samuel Nalevanko

Pod'akovanie

Rád by som sa pod'akoval môjmu školiteľovi RNDr. Ladislavovi Galdunovi, PhD. za jeho odborné vedenie, trpezlivosť, rady a usmernenie pri písaní tejto práce. Taktiež by som chcel pod'akovať prof. RNDr. Rastislavovi Vargovi, DrSc. za odborný dohľad nad prácou. Ďalej by som sa chcel pod'akovať prof. RNDr. Mariánovi Reiffersovi, DrSc., doc. Ing. Gabrielovi Sučíkovi, PhD., RNDr. Jozefovi Kačmarčíkovi, PhD., RNDr. Jiřímu Pospíšilovi, PhD., Ing. RNDr. Andrei Džubinskej, za pomoc pri vykonávaní experimentálnych meraní a v neposlednom rade sa chcem pod'akovať aj mojej rodine za ich podporu.

Abstrakt v štátnom jazyku

Koexistencia feromagnetizmu a supravodivosti predstavuje nový fenomén, ktorý bol objavený experimentálne a publikovaný ako chyba merania, a to z dôvodu, že sú to dve diametrálne odlišné vlastnosti, ktoré by sa mali navzájom vylučovať. Výnimočnosť a perspektívnosť tohto javu, nás viedla k tomu, aby sme ho skúmali v Heuslerovej zliatine Ni_2NbSn . Heuslerove zliatiny sú výnimočné tým, že sú nenáročné na prípravu, lacné a ich zloženie nám umožňuje kombinovať viaceré prvky, pričom dostávame úplne nové vlastnosti, prípadne kombináciu viacerých vlastností. Koexistencia feromagnetizmu a supravodivosti sprevádza jav magnetickej neviditeľnosti, kedy sa materiál stáva neviditeľným pre vonkajšie magnetické polia, čo by mohlo nájsť uplatnenie v technickej či zdravotníckej praxi, napríklad na „zatiernenie“ kardiostimulátora v ľudskom tele pri vyšetrení magnetickou rezonanciou.

Kľúčové slová: feromagnetizmus, supravodivosť, magnetická neviditeľnosť

Abstrakt v cudzom jazyku

Coexistence of ferromagnetism and superconductivity is a new phenomenon, which was discovered experimentally and published as a measurement error, because those characteristics are two diametrically different properties. The perspective of this phenomenon was a reason why we decided to study it in the Ni_2NbSn Heusler alloy, because it is supposed to show the mentioned properties. Heusler alloys are remarkable, because they are cheap, easy to prepare, and with combination of other elements, they show new properties, or their combination. The coexistence of ferromagnetism and superconductivity accompany the phenomenon of magnetic invisibility, when the material is undetectable by the outside magnetic fields. This could find an use in technical or medical practice, for example for magnetic shielding of the cardiostimulator in human body during the examination by magnetic resonance.

Key words: ferromagnetism, superconductivity, magnetic invisibility

Obsah

Obsah	5
Zoznam skratiek a značiek	7
Slovník termínov	8
Úvod	9
1 Teória	11
1.1 Magnetické materiály	11
1.1.1 Látky s neusporiadanou magnetickou štruktúrou	11
1.1.2 Látky s usporiadanou magnetickou štruktúrou	13
1.2 Supravodiče	14
1.2.1 Meissnerov efekt	16
1.2.2 Supravodiče typu I	16
1.2.3 Supravodiče typu II	17
1.3 Feromagnetické supravodiče	19
1.4 Heuslerove zliatiny	21
2 Experiment	23
2.1 Príprava vzorky	23
2.2 Skenovací elektrónový mikroskop (SEM)	24
2.3 Merania magnetizácie	25
2.4 Merania odporu	26
2.5 Röntgenova difrakčná analýza	27
3 Výsledky a diskusia	29
3.1 Skenovací elektrónový mikroskop	29
3.2 Merania magnetizácie ako funkcie teploty	30
3.3 Hysterézne slučky	32

3.4	Merania odporu ako funkcie teploty	36
3.5	Röntgenova difrakčná analýza	38
	Záver	39
	Zoznam použitej literatúry	41

Zoznam skratiek a značiek

χ	magnetická susceptibilita
H	magnetická intenzita
H_K	kritické magnetické pole
I_K	kritický prúd
M	magnetizácia
T_C	Curieho teplota
T_K	kritická teplota
EDX	energy dispersive X-ray (energeticky disperzná Röntgenova spektroskopia)
SEM	skenovací elektrónový mikroskop
XRD	X-ray diffraction (štruktúrna analýza)

Slovník termínov

Abrikosov vortex - vír supravodivého prúdu v supravodiči

Bean-Livingstonova bariéra - hranica, po ktorú dokáže prenikať vonkajšie magnetické pole

Cooperov pár - pár elektrónov (fermiónov), ktoré po spárovaní vytvárajú bozón

Curieho teplota - teplota, kedy sa magnetické momenty navzájom vyrušia v dôsledku tepelnej aktivácie a výsledná magnetizácia je rovná nule

doména - oblasť, v ktorej sú magnetické momenty usporiadané do jedného smeru

doménová stena - hranica medzi doménami, kde sa vytáčajú magnetické momenty

koherentná dĺžka supravodivosti - vzdialenosť, na ktorej sa dokáže vytvoriť Cooperov pár

kritická teplota - teplota, pri ktorej supravodič stráca svoje supravodivé vlastnosti

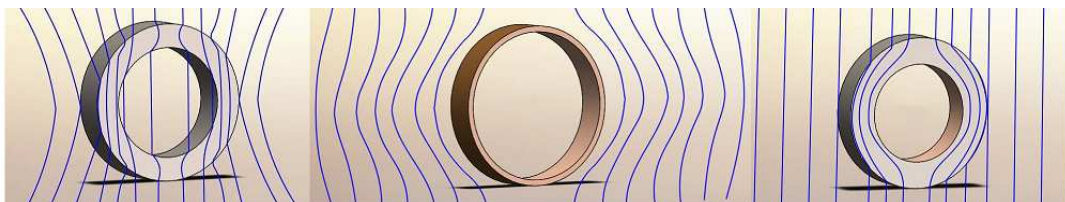
magnetizácia - charakterizuje magnetické vlastnosti materiálu

Úvod

Všetky materiály vieme z pohľadu magnetizmu klasicky rozdeliť na paramagnetické, diamagnetické a feromagnetické. Paramagnetické materiály sa vyznačujú tým, že dokážu zosilňovať vonkajšie magnetické pole. Diamagnetické naopak vonkajšie magnetické pole zoslabujú. Feromagnetické sa správajú podobne ako paramagnetické, ale vyznačujú sa tzv. spontánnou magnetizáciou [1].

Z pohľadu vodivosti vieme materiály rozdeliť na izolanty, polovodiče, vodiče a supravodiče. Supravodivé materiály sú známe tým, že dokážu viesť elektrický prúd bez odporu a z magnetického pohľadu sa správajú ako diamagnetické materiály.

V tejto práci sa venujeme koexistencii feromagnetizmu a supravodivosti v Heuslerových zliatinách. Tento jav bol objavený experimentálne, pričom bol pripisovaný chybám merania v zliatine Ni_2NbSn [2]. Výnimočnosť tohto javu sa vyznačuje tým, že feromagnetické a supravodivé vlastnosti sú diametrálne odlišné, a vykazujú opačné správanie. Pre Heuslerove zliatiny sme sa rozhodli z dôvodu, že sú nenáročné na prípravu, pomerne lacné a majú aj iné vlastnosti vhodné pre technické, zdravotnícke a ďalšie uplatnenia.



Obr. 1: *Feromagnetický valec naľavo, supravodivý valec v strede a ich kombinácia napravo*

Kombinácia feromagnetizmu a supravodivosti sa prejavuje magnetickou neviditeľnosťou [3]. Magnetická neviditeľnosť predstavuje fenomén, kedy sa materiál stáva neviditeľný pre magnetické pole. Feromagnetická časť priťahuje vonkajšie magnetické pole do svojho objemu a supravodivá časť materiálu magnetické pole zo svojho objemu vypudzuje. Kombináciou týchto javov dosiahneme, že vonkajšie

magnetické pole obtečie materiál, a teda si nevšimne že sa v magnetickom poli nachádza. (Obr. 1)

Perspektívnosť a špecifické uplatnenia tohto javu nás viedli k tomu, aby sme jav skúmali podrobnejšie v Heuslerovej zliatine Ni_2NbSn .

1 Teória

V tejto kapitole bude rozobraté teoretické pozadie javu koexistencie feromagnetizmu a supravodivosti, pozrieme sa bližšie na magnetické materiály, supravodivosť, nomenklatúru a charakteristiku Heuslerových zliatin.

1.1 Magnetické materiály

Magnetické materiály je možné rozdeliť na základe vzájomnej interakcie medzi atómovými magnetickými momentami a charakteru vplyvu vonkajšieho magnetického poľa na ne. Podľa tejto charakteristiky sa magnetické materiály delia na látky s neusporiadanou magnetickou štruktúrou a látky s usporiadanou magnetickou štruktúrou.

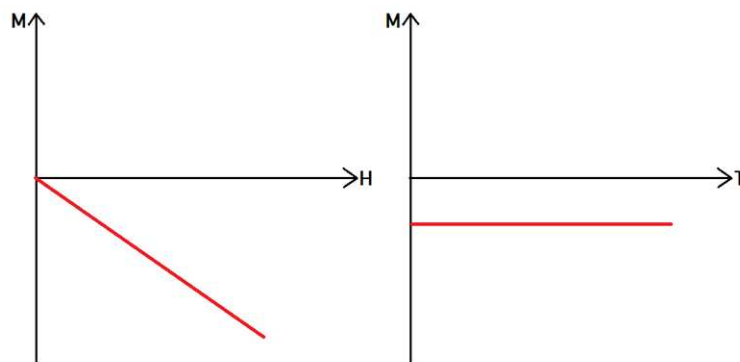
1.1.1 Látky s neusporiadanou magnetickou štruktúrou

Diamagnetizmus

Jav diamagnetizmu je výsledkom indukčného pôsobenia vonkajšieho magnetického poľa na pohybujúce sa elektróny v základných časticách látky. Na základe tohto javu vzniká v každom atóme diamagnetickej látky magnetický moment, ktorého orientácia je proti smeru pôsobiaceho magnetického poľa na látku. [1] Atómy diamagnetického materiálu nemajú magnetický moment, ak na ne nepôsobí vonkajšie magnetické pole.

Diamagnetizmus je slabý jav, ktorý je prekrytý inými silnejšími javmi (feromagnetizmus), a taktiež nie je závislý od teploty vonkajšieho prostredia. Jav diamagnetizmu je zvyčajne viditeľný pri veľkých magnetických poliach pôsobiacich na látku. Medzi typické diamagnetické materiály patria supravodiče, ktorým sa budeme venovať v ďalšej časti uvedenej práce.

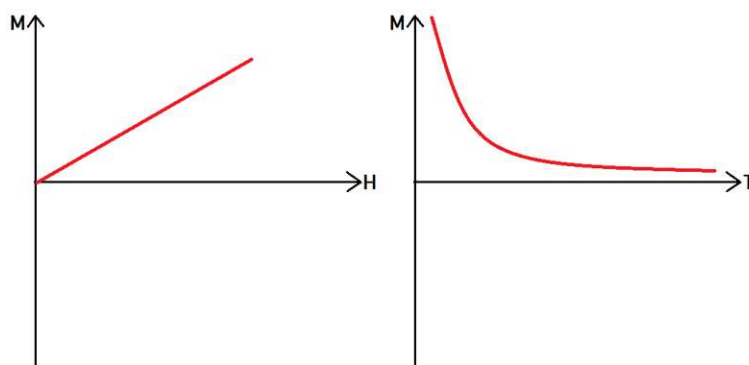
Magnetizáciu vieme charakterizovať ako $\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}$, kde \mathbf{M} je vektor magnetizácie látky, χ je magnetická susceptibilita a \mathbf{H} je vektor intenzity vonkajšieho magnetického poľa. Z vlastností diamagnetických materiálov platí, že susceptibilita $\chi < 0$. (Obr. 2)



Obr. 2: Závislosť magnetizácie diamagnetického materiálu od pôsobiaceho vonkajšieho magnetického poľa a od teploty

Paramagnetizmus

S javom paramagnetizmu sa stretávame pri látkach, ktoré sa skladajú z atómov alebo iónov s permanentným magnetickým momentom, pričom vzájomné pôsobenie medzi týmito atómovými magnetickými momentami je zanedbateľne malé. [1]



Obr. 3: Závislosť magnetizácie paramagnetického materiálu od pôsobiaceho vonkajšieho magnetického poľa a od teploty

V paramagnetickom materiály sú magnetické momenty atómov neusporiadané, ako v prípade diamagnetizmu, a preto ak nepôsobíme na látku vonkajším magnetickým poľom, tak hodnota magnetizácie látky je nulová. Pri pôsobení vonkajšieho magnetického poľa sa začínajú magnetické momenty atómov usporadúvať do smeru pôsobiaceho magnetického poľa, a preto zo vzťahu $\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}$

vyplýva, že $\chi > 0$. (Obr. 3)

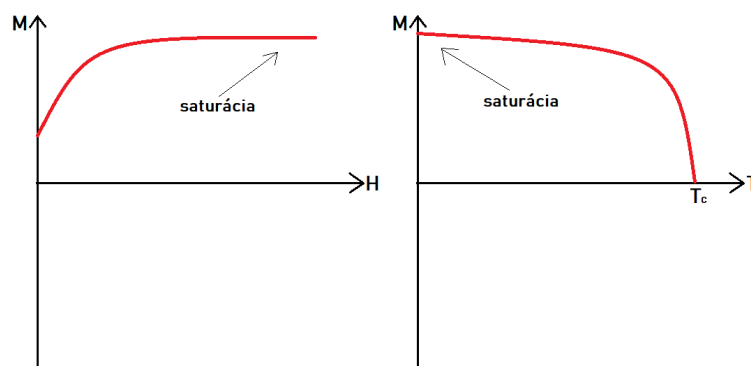
1.1.2 Látky s usporiadanou magnetickou štruktúrou

Vznik takýchto látok je podmienený vzájomnými interakciami medzi magnetickými momentami atómov, ktoré sú dosť silné na to, aby prekonávali neusporiadané štruktúry.

Feromagnetizmus

Vzájomné pôsobenie medzi elementárnymi nosičmi magnetizmu pri feromagnetickom stave látok vedie k vzniku spontánnej magnetizácii magnetika, ktorá súvisí s paralelnou orientáciou magnetických momentov atómov. [1]

Spontánna magnetizácia pri feromagnetických materiáloch spôsobuje to, že magnetické momenty atómov látky sú usporiadané v jednom smere. Vo feromagnetikách pri tzv. Curieho teplote T_C , nastane rozrušenie pravidelného usporiadania, magnetické momenty sa navzájom vyrušia v dôsledku tepelnej aktivácie a výsledná magnetizácia materiálu je rovná nule.



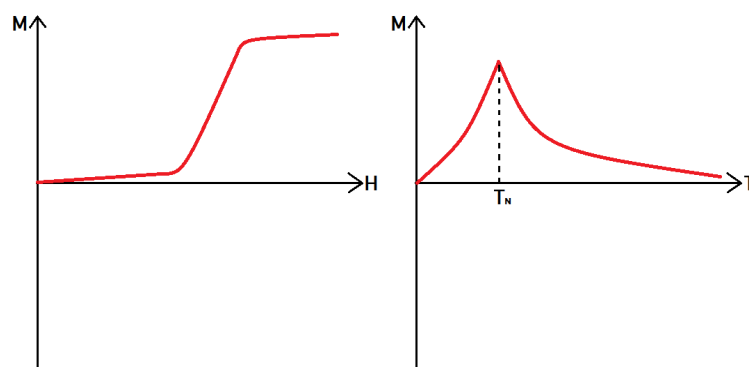
Obr. 4: Závislosť magnetizácie feromagnetického materiálu od pôsobiaceho vonkajšieho magnetického poľa a od teploty

Pri závislosti magnetizácie od vonkajšieho magnetického poľa dokážeme pri feromagnetikách určiť saturáciu, čo predstavuje hodnotu maximálneho magnetického momentu, ktorý sa dokáže v látke naindukovať, z dôvodu natočenia všetkých magnetických momentov do smeru vonkajšieho magnetického poľa.

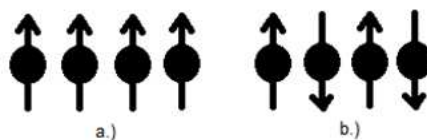
Antiferomagnetizmus

Antiferomagnetický stav sa líši od feromagnetického stavu tým, že spiny susedných atómov sú antiparalelne usporiadané. [1] Z tohto dôvodu sa vykompenzujú magnetické momenty atómov.

Magnetizácia antiferomagnetického materiálu narastá spolu s teplotou až po tzv. Neeleho teplotu, kedy magnetizácia začína hyperbolicky klesať až na nulovú hodnotu.



Obr. 5: Závislosť magnetizácie antiferomagnetického materiálu od pôsobiaceho vonkajšieho magnetického poľa a od teploty



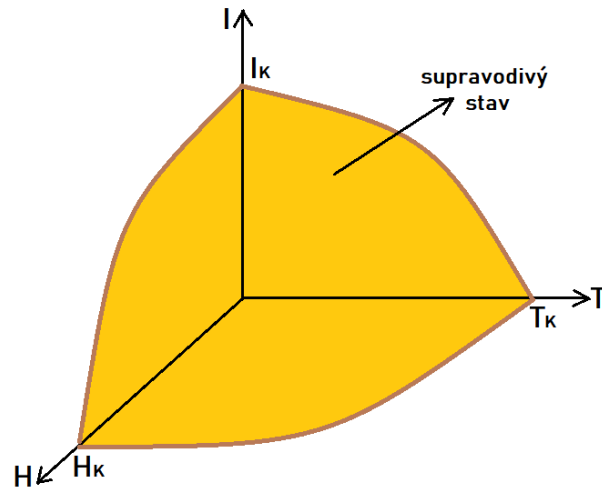
Obr. 6: a.) spiny atómov vo feromagnetiku, b.) spiny atómov v antiferomagnetiku

1.2 Supravodiče

Supravodivé materiály majú vlastnosti, ktoré u žiadnych iných materiálov nepozorujeme, ako napríklad vedenie elektrického prúdu s nulovým odporom alebo magnetická levitácia.

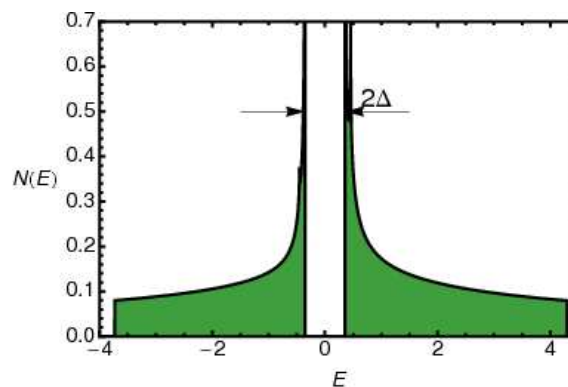
Supravodivé materiály charakterizujú tri dôležité vlastnosti. Kritická teplota, kritický elektrický prúd a kritické magnetické pole [4]. Kritická teplota T_K predstavuje teplotu, pod ktorou materiál náhle stráca elektrický odpor a prúd pre-

teká materiálom bez strát. Kritický elektrický prúd I_K predstavuje maximálne množstvo prúdu, ktoré prejde materiálom, a ten nestratí supravodivé vlastnosti. Kritické magnetické pole H_K charakterizuje maximálnu hodnotu magnetického poľa, pri ktorom má vzorka ešte stále supravodivé vlastnosti. Po prekročení aspoň jedného z týchto parametrov vzorka stratí supravodivé vlastnosti. (Obr. 7)



Obr. 7: Diagram kritických parametrov supravodivej látky

Ďalším charakteristickým znakom supravodičov sú Cooperove páry. [5] Cooperov pár predstavuje pár elektrónov (fermiónov), ktoré po spárovaní vytvárajú bozón, ktorý má nulový magnetický moment, z dôvodu kompenzácie. Bozóny na rozdiel od fermiónov, môžu nadobúdať všetky kvantové čísla rovnaké. U fermiónov sa uplatňuje Pauliho vylučovací princíp, teda tento jav nenastane.

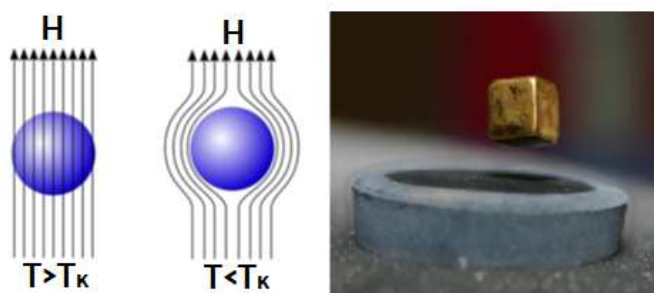


Obr. 8: Hustota elektrónových stavov v supravodivom materiáli [6]

Párovanie elektrónov prebieha fonónovou interakciou a výskyt Cooperových párov sa u supravodičov pozoruje len pod kritickou teplotou na Fermiho hladine. Na Obr. 8 sa okolo Fermiho hladiny nachádza energetická medzera 2Δ , kde sa po schladení pod T_K nachádzajú Cooperove páry.

1.2.1 Meissnerov efekt

Po schladení supravodivého materiálu, ktorý sa nachádza vo vonkajšom magnetickom poli pod jeho kritickú teplotu, sú magnetické siločiarly poľa, v ktorom sa materiál nachádza vytláčané z objemu látky supravodiča, a tento vykazuje perfektné diamagnetické správanie. Na demonštráciu Meissnerovho efektu sa využíva už vyššie spomínaná magnetická levitácia, kedy sa magnet nadnáša nad supravodičom (Obr. 9).

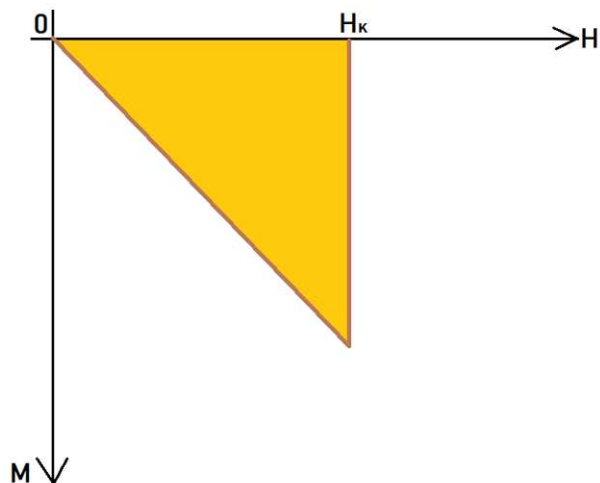


Obr. 9: Meissnerov efekt naľavo a magnetická levitácia napravo [7]

Pri prvom pohľade na Meissnerov efekt by sme mohli povedať, že všetky supravodivé materiály sa správajú rovnako, ale sú tu rozdiely, ktoré supravodiče delia do dvoch kategórií, supravodiče typu I a supravodiče typu II.

1.2.2 Supravodiče typu I

Supravodivé materiály typu I, taktiež známe ako „mäkké“ supravodiče pri Meissnerovom efekte vykazujú perfektný diamagnetizmus [8], kedy z celého svojho objemu vypudzujú vonkajšie magnetické pole. Po prekročení jedného z kritických parametrov T_K , H_K alebo I_K materiál okamžite stráca supravodivé vlastnosti a prechádza do normálneho stavu.



Obr. 10: *Závislosť magnetizácie od vonkajšieho magnetického poľa*

Taktiež nezáleží či bol materiál chladený pod jeho kritickú teplotu v nulovom magnetickom poli (ZFC = zero field cooling), alebo pri istej počiatočnej hodnote magnetického poľa, menšej ako H_K (FC = field cooling), čo znamená, že supravodivé vlastnosti sú nezávislé na magnetickej histórii materiálu. Táto diamagnetická odozva materiálu predstavuje reverzibilný termodynamický proces.

Pri prekročení jedného z kritických parametrov dochádza k zániku Cooperových párov, čo spôsobuje to, že v miestach zániku začne pretekať magnetické pole, strácajú sa supravodivé vlastnosti materiálu a látka prechádza do normálneho stavu. Pri supravodičoch typu I zanikajú Cooperove páry v celom objeme supravodiča.

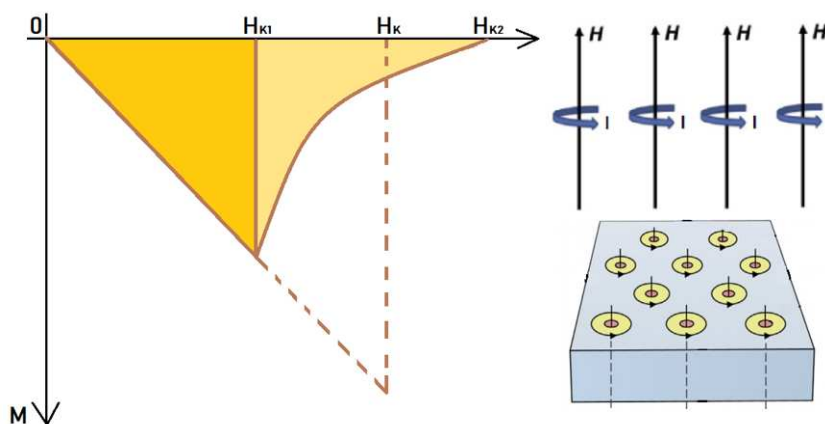
1.2.3 Supravodiče typu II

Supravodivé materiály typu II, formálne známe ako „tvrdé“ supravodiče vykazujú odlišné správanie ako supravodiče typu I. Tieto odlišnosti sú pozorovateľné aj pri Meissnerovom efekte, kde rozlišujeme dve kritické magnetické polia pôsobiace na materiál. [8]

Prvá kritická hodnota magnetického poľa H_{K1} , predstavuje hranicu, pod ktorou supravodivý materiál vykazuje rovnaké vlastnosti, ako supravodiče typu I, teda celý objem vzorky vytláča vonkajšie magnetické pole a vykazuje jav per-

fektného diamagnetizmu. Tak, ako pri supravodičoch typu I sa aj pri type II nachádzajú Cooperove páry, kvôli ktorým tento jav nastáva.

Na rozdiel od supravodiča typu I po prekročení H_{K1} sa Cooperove páry nerozpadávajú v celom objeme vzorky na všetkých miestach súčasne. Rozpadávajú sa postupne len na určitých miestach až po hodnotu kritického magnetického poľa H_{K2} , kedy dochádza k úplnej strate supravodivosti a materiál prechádza do normálneho stavu.



Obr. 11: *Závislosť magnetizácie od vonkajšieho magnetického poľa naľavo a víry napravo*

Na intervale hodnôt medzi kritickými hodnotami vonkajšieho magnetického poľa na miestach rozpadu Cooperových párov, teda dochádza k prenikaniu magnetického poľa supravodičom. Takýto stav sa nazýva zmiešaný stav, kedy materiál vykazuje supravodivé, ako aj normálne vlastnosti. Na miestach rozpadu, ktoré sú nahodné vznikajú tzv. víry (Obr. 11), v ktorých intenzita magnetického poľa klesá s narastajúcou vzdialenosťou od stredu víru. V týchto miestach sa vytvára cirkulárny perzistentný elektrický prúd. Na miestach, kde sa stále nachádzajú nenarušené Cooperove páry pretrváva jav supravodivosti.

1.3 Feromagnetické supravodiče

Na základe vlastností feromagnetického materiálu uvedených v predošlých kapitolách (narastajúca magnetizácia pri zvyšujúcom sa vonkajšom magnetickom poli, nasýtenie) a supravodivého materiálu, ktorý sa vyznačuje presne opačnými vlastnosťami (silný diamagnetizmus), sa ich koexistencia nepredpokladala. V súčasnosti už ale existujú materiály, ktoré koexistenciu týchto dvoch protichodných vlastností vykazujú [9].

Jav koexistencie feromagnetizmu a supravodivosti vzbudil vo svete veľký záujem najmä kvôli ich protichodným vlastnostiam. Doterajšie výsledky ukázali, že nejednotné magnetické stavy dokážu koexistovať so supravodivým stavom. Napríklad zliatina RRh_4B_4 , kde R predstavuje prvok vzácnych zemín, predstavuje antiferomagnetický supravodič. V RRh_4B_4 je magnetický moment na škále koherentnej dĺžke supravodivosti nulový, a preto neovplyvňuje Cooperove páry. [10]

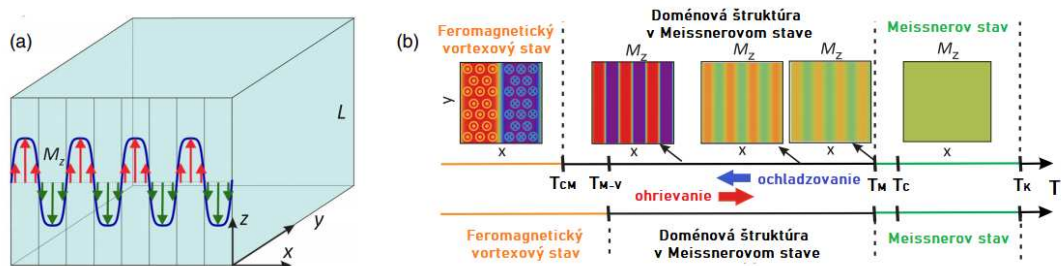
Feromagnetický supravodič $EuFe_2As_2$ má zaujímavú vlastnosť v tom, že jeho T_C je menšia ako T_K . Vďaka tejto vlastnosti sa objavuje feromagnetizmus v plne vyvinutej supravodivej fáze.

Pri schladzovaní materiálu (Obr. 12), a pri teplote $T = T_K$ sa objaví supravodivá Meissnerova fáza. Vyvinutá supravodivosť zabraňuje vytvoreniu feromagnetického usporiadania pri teplote $T = T_C$. Výsledkom toho je, že v materiáli sa začne objavovať magnetické usporiadanie pri teplote $T_M < T_C$, pričom magnetizácia má tvar funkcie sínus s jednou priestorovou harmonickou frekvenciou (Obr. 12 a.). Pri schladzovaní pod T_M sa začínajú prejavovať nelineárne efekty a vznikajú ďalšie priestorové harmonické frekvencie, pričom sa magnetizácia vyvinie do etapovej doménovej štruktúry so zväčšujúcou sa doménovou stenou. Pri teplote T_{M-V} (Obr. 12 b.) narastá amplitúda magnetizácie, čo spôsobuje, že jednotná supravodivá fáza je menej výhodná ako koexistencia doménových štruktúr a vortexovej mriežky.

V režime chladenia zabraňuje okamžitému vstupu vortexu pri teplote $T = T_{M-V}$ bariéra podobná Bean-Livingstonovej bariére. To vyúsťuje k podchladeniu

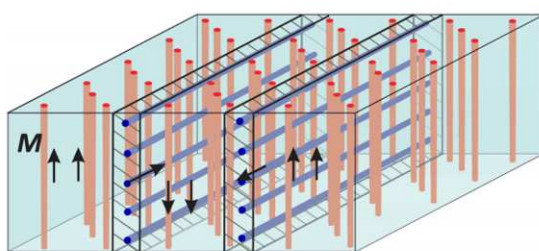
Meissneroveho javu a fázovému prechodu prvého druhu do vortexového stavu iba pri $T = T_{CM} < T_{M-V}$ (Obr. 12 b.), kedy bariéra z materiálu zmizne.

Pri zohrievaní materiálu ostáva materiál vo vortexovom stave až do $T = T_{M-V}$, čo demonštruje hysteréziu materiálu. Na Obr. 12 b. je to znázornené oranžovými úsečkami.



Obr. 12: (a) feromagnetický supravodič so sínusovým profilom magnetizácie, kde os ľahkej magnetizácie leží v osi z , (b) fázový diagram znázorňujúci vývoj fáz vo feromagnetickom supravodiči

Vo feromagnetickom vortexovom stave doménových stien môžu byť Abrikosove vortexy orientované kolmo na vortexy v doméne (Obr. 13). Tento fenomén vzniká z transformácie lineárnych domén s jednou zložkou magnetizácie M_z do Blochovej doménovej steny s ďalšou zložkou magnetizácie M_y . Zložka M_y je výhodná pre Abrikosov vortex smerujúci v smere osi y popri doménových stenách.



Obr. 13: Abrikosove vortexy objavujúce sa v Blochových doménových stenách

1.4 Heuslerove zliatiny

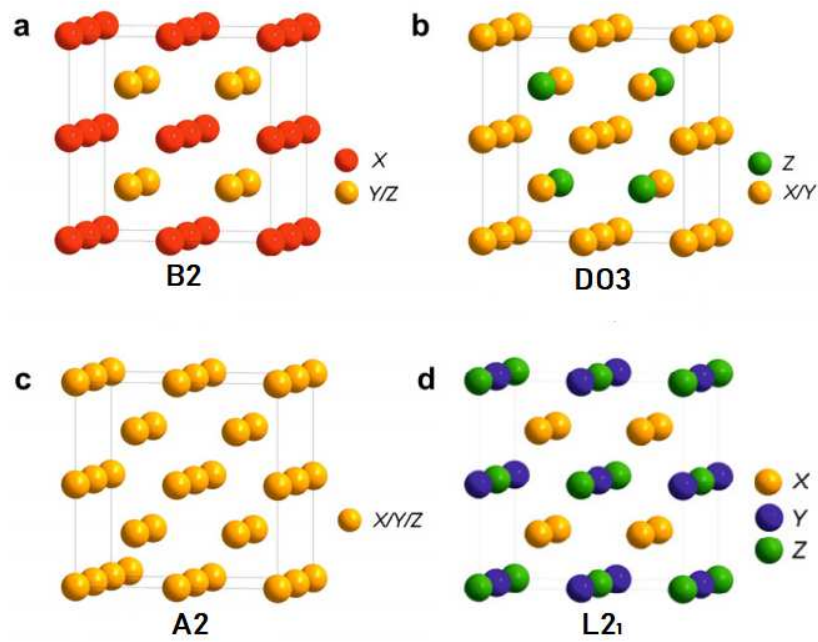
Heuslerove zliatiny predstavujú skupinu materiálov, ktoré majú stechiometrický vzorec X_2YZ alebo polovičné Heuslerove zliatiny so stechiometrickým vzorcom XYZ , kde X a Y predstavujú prechodný prvok a Z prvok z p bloku [11]. Heuslerove zliatiny vykazujú mnoho vlastností ako jav tvarovej pamäte, magnetokalorický jav, a taktiež koexistenciu feromagnetizmu a supravodivosti.

X_2YZ Heuslerove zliatiny

H 2.20																	He	
Li 0.96	Be 1.57											B 2.04	C 2.55	N 3.04	O 3.44	F 3.98	Ne	
Na 0.93	Mg 1.31											Al 1.61	Si 1.90	P 2.19	S 2.58	Cl 3.16	Ar	
K 0.82	Ca 1.00	Sc 1.36	Ti 1.54	V 1.63	Cr 1.66	Mn 1.55	Fe 1.83	Co 1.88	Ni 1.91	Cu 1.90	Zn 1.65	Ga 1.81	Ge 2.01	As 2.18	Se 2.55	Br 2.96	Kr 3.00	
Rb 0.82	Sr 0.95	Y 1.22	Zr 1.33	Nb 1.60	Mo 2.16	Tc 1.90	Ru 2.20	Rh 2.28	Pd 2.20	Ag 1.93	Cd 1.69	In 1.78	Sn 1.96	Sb 2.05	Te 2.10	I 2.66	Xe 2.60	
Cs 0.79	Ba 0.89	Hf 1.30		Ta 1.50	W 1.70	Re 1.90	Os 2.20	Ir 2.20	Pt 2.20	Au 2.40	Hg 1.90	Tl 1.80	Pb 1.80	Bi 1.90	Po 2.00	At 2.20	Rn	
Fr 0.70	Ra 0.90																	
		La 1.10	Ce 1.12	Pr 1.13	Nd 1.14	Pm 1.13	Sm 1.17	Eu 1.20	Gd 1.20	Tb 1.10	Dy 1.22	Ho 1.23	Er 1.24	Tm 1.25	Yb 1.10	Lu 1.27		
		Ac 1.10	Th 1.30	Pa 1.50	U 1.70	Np 1.30	Pu 1.28	Am 1.13	Cm 1.28	Bk 1.30	Cf 1.30	Es 1.30	Fm 1.30	Md 1.30	No 1.30	Lr 1.30		

Obr. 14: Periodická tabuľka prvkov, z ktorých sú zložené Heuslerove zliatiny [11]

Heuslerove zliatiny X_2YZ sa vyznačujú kryštalickou mriežkou $L2_1$, kedy je pozícia všetkých troch prvkov presne definovaná na Wyckoffových pozíciách. Pri niektorých zliatinách sa môže vyskytnúť aj iný typ kryštalickej mriežky (Obr. 15). Usporiadanie B2 je definované vzájomnou zámennou atómov Y a Z na krátku vzdialenosť. DO3 usporiadanie je definované podobne ako B2, avšak vzájomná zámena nastáva pri atómoch X a Y. Usporiadanie A2 je charakterizované vzájomnou zámennou všetkých atómov kryštalickej mriežky. Typ kryštalickej mriežky je možné určiť pomocou Röntgenovej difrakčnej analýzy.



Obr. 15: *Typy kryštálových štruktúr Heuslerových zliatin [11]*

Bolo ukázané, že Ni_2NbSn predstavuje feromagnetický supravodič avšak vo forme pások, ktoré sú náročné na prípravu. [12] Naším cieľom bolo dosiahnuť, aby objemová vzorka vykazovala rovnaké vlastnosti. Jej príprava je jednoduchšia ako príprava pások a výhodou je aj tvarovanie formou zlievania do požadovaných tvarov.

2 Experiment

2.1 Príprava vzorky

Po presnom navážení chemických prvkov nikel, niób, cín na analytických váhach, sme ich následne zlievali metódou oblúkového tavenia. Čistota použitých prvkov bola 99,99%.

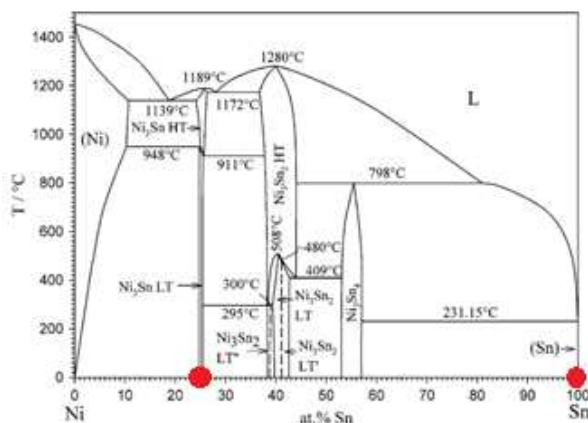


Obr. 16: Príprava vzorky v oblúkovej peci

Táto metóda funguje na princípe dvoch elektród (medenej a wolfrámovej). Po priblížení wolfrámovej elektródy do blízkosti medenej elektródy sa plyn začína ionizovať, pričom vzniká elektrický oblúk, ktorý prechádza prvkami a indukčne ich roztápa. Pracuje sa v argónovej atmosfére, aby sa predišlo oxidácii materiálu. Materiál sme niekoľkokrát tavili, aby bol homogenizovaný.

Problémom pri prvkoch Ni, Nb, Sn bol v ich teplotách varu a tavenia. Aby sme sa vyhli vyparovaniu Sn, bolo potrebné zliať Ni a Sn, keďže teplota tavenia Nb (2468°C) je blízko teploty varu Sn (2602°C). Preto sme najprv zliali Ni a Sn, čím sme vytvorili zliatinu $\text{Ni}_{75}\text{Sn}_{25}$, ktorá mala vyššiu teplotu tavenia, ako

samotný Sn (Obr. 17).



Obr. 17: Binárny diagram Ni-Sn [13]

Na prípravu 10g materiálu, sme na základe vzťahu (1), kde n predstavuje látkové množstvo, m hmotnosť prvkov a M molárnu hmotnosť určili hmotnosti prvkov Ni, Nb, Sn.

$$n = \frac{m(Ni_2NbSn)}{M(Ni_2NbSn)} \quad (1)$$

Prvok	m_T (g)	m_E (g)
Nikel (Ni)	3,568	3,566
Niób (Nb)	2,824	2,825
Cín (Sn)	3,608	3,609
		$\Sigma = 10$

Tab. 1: Teoretická a navážená hmotnosť prvkov

2.2 Skenovací elektrónový mikroskop (SEM)

Po vyrobení homogénneho materiálu sme chceli zistiť, či vzorka má zloženie, ktoré očakávame z výpočtov. Chemické zloženie materiálu vieme určiť analýzou pomocou SEM s funkciou EDX (Energy Dispersive X-Ray, energeticky dispézná röntgenová analýza). Analýza SEM funguje na princípe vysielaného elektrónového lúča, ktorý prechádza vzorkou a interaguje s povrchovými elektrónmi vzorky.

Lúč sa odráža od povrchu materiálu a vytvára signál, ktorý je detegovaný senzorom a následne graficky zobrazený na monitore.



Obr. 18: *Skenovací elektrónový mikroskop*

Elektrónový lúč, ktorý prechádza po povrchu materiálu excituje elektróny, ktoré sú následne vyrážané z povrchu. Excitované elektróny sú zachytávané senzorom, ktorý určí atómové percentuálne zastúpenie prvkov v materiáli, na základe ich výstupnej práce, ktorú vykonali pri vyrazení z povrchu.

2.3 Merania magnetizácie

Magnetické merania boli uskutočnené na PPMS DynaCool (Physical properties measurement system, systém merania fyzikálnych vlastností) s funkciou VSM (Vibrating sample magnetometer).



Obr. 19: *Príprava vzorky na magnetické merania*

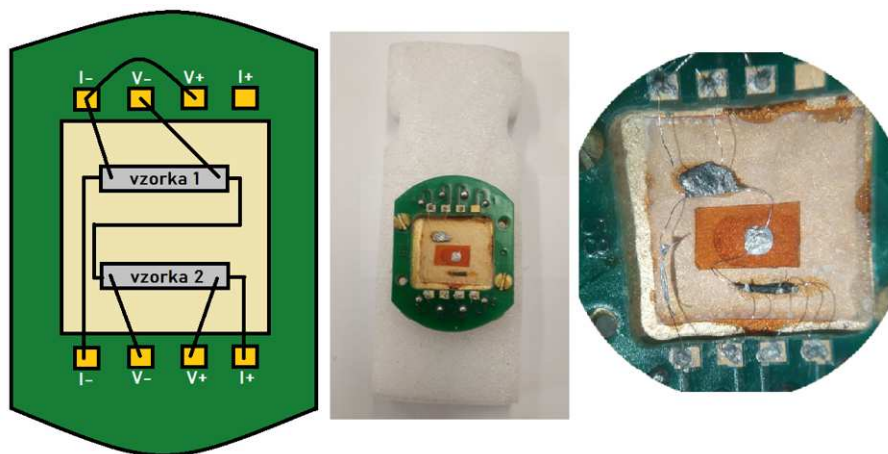
Vlastnosti použitého zariadenia umožňujú merania magnetizácie vzoriek do

vysokých hodnôt magnetických polí (140kOe) a v teplotnom rozmedzí 1.8K až 400K. Funkcia VSM je schopná merať magnetizáciu zmenou magnetického indukčného toku s citlivosťou $< 10^{-6}$ emu.

Pri meraní magnetizácie ako funkcie teploty sme merali závislosti pre pre objemovú vzorku Ni_2NbSn pri konštantnom magnetickom poli 10Oe, 100Oe a 10kOe. Taktiež sme merali magnetizáciu ako funkciu vonkajšieho magnetického poľa pri konštantnej teplote 2,5K, 5K, 15K a 20K. Pre žíhanú objemovú vzorku Ni_2NbSn sme merali magnetizáciu ako funkciu teploty pri konštantnom magnetickom poli 100Oe a 1kOe. Magnetizáciu ako funkciu vonkajšieho magnetického poľa pre žíhanú objemovú vzorku sme merali pri konštantných teplotách 2,5K, 5K a 10K.

2.4 Merania odporu

Merania odporu boli uskutočnené na PPMS, podobne ako magnetické merania. Vlastnosti tohto zariadenia nám umožnili merať odpor až do teploty 0,4K pri vonkajšom magnetickom poli 0 – 90kOe. Pomocou týchto meraní sme chceli overiť, že materiál vykazuje supravodivé vlastnosti.



Obr. 20: *Príprava vzorky na merania supravodivosti materiálu*

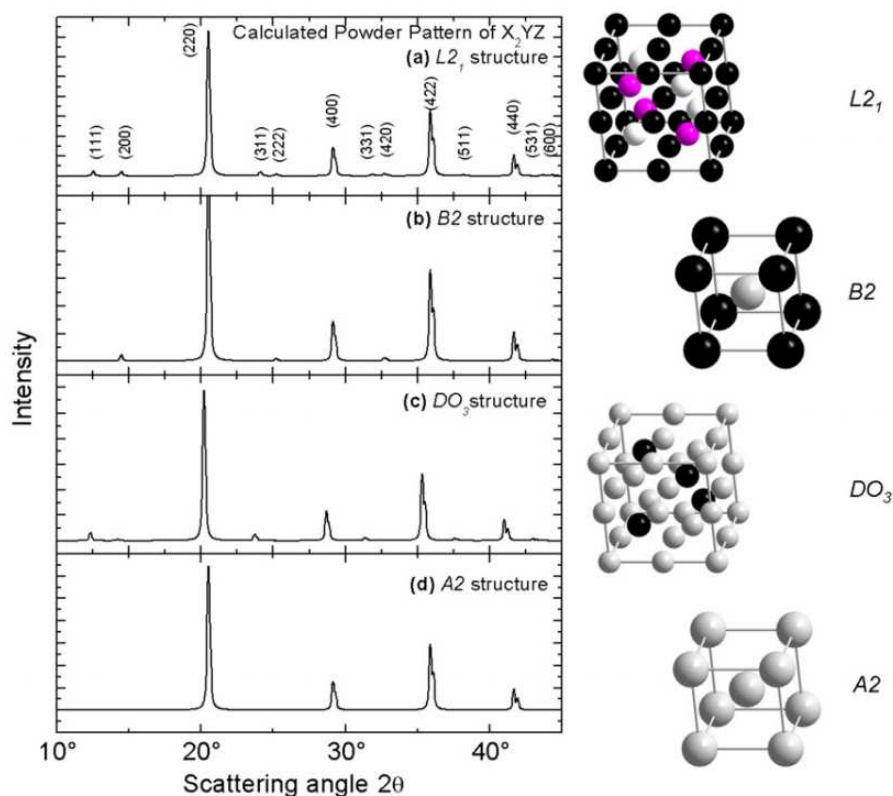
Pri meraní odporu bola využívaná dvojkanálová štvorbodová metóda (Obr. 20). Pod vzorky bol umiestnený cigaretový papier z dôvodu vodivosti bázy, čím sa

zabránilo kontaktu báza-vzorka. Kontakty medzi vzorkami a kanálmi boli tvorené striebornými drôťmi s priemerom 20 mikrónov a striebornou pastou.

Pri meraní odporu ako funkcie teploty sme merali závislosti pre objemovú vzorku Ni_2NbSn pri konštantnom magnetickom poli 0Oe, 1kOe, 2kOe, 5kOe, 7kOe a 10kOe, pre znázornenie závislosti T_K ako funkcie vonkajšieho magnetického poľa.

2.5 Röntgenova difrakčná analýza

Röntgenova difrakčná analýza funguje na princípe ožiarovania kryštálovej štruktúry monochromatickým RTG zväzkom, čím sa získa pozorovateľný difrakčný obraz [14]. Dopadajúci RTG zväzok lúčov sa rozptyľuje na elektrónoch kryštálu. Následne odrážané lúče spolu interferujú a vytvárajú difrakčný obrazec.



Obr. 21: Najčastejšie RTG difrakcie Heuslerových zliatin X_2YZ s odpovedajúcimi kryštálovými štruktúrami [15]

Dôsledky tohto javu sa dajú popísať Braggovou rovnicou:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (2)$$

kde d predstavuje vzdialenosť medzi dvoma rovinami, θ je uhol medzi rovinou a difraktovaným lúčom a $n\lambda$ je celočíselný násobok vlnovej dĺžky.

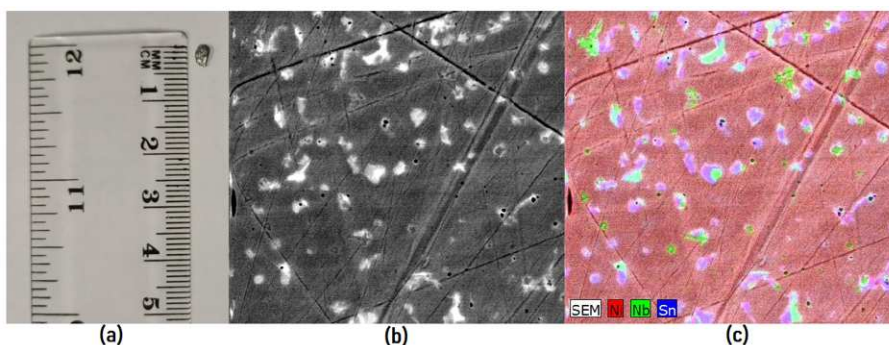
Pomocou intenzít a uhlov jednotlivých difrakcií vieme zostrojiť difrakčný obrazec (Obr. 21), z ktorého vieme vyčítať pozície atómov v kryštalickej mriežke, typ kryštalickej mriežky a v akých fázach sa vyskytuje nami skúmaná zliatina.

3 Výsledky a diskusia

Táto kapitola rozoberá nami namerané dáta pre objemovú vzorku Ni_2NbSn a žíhanú objemovú vzorku Ni_2NbSn , na základe ktorých poukážeme na koexistenciu feromagnetizmu a supravodivosti v materiály.

3.1 Skenovací elektrónový mikroskop

Po navážení a zliati kovov pomocou oblúkového tavenia sa mohlo očakávané zloženie meniť, kvôli rozdielnym vlastnostiam kovov vo vzorke ako je teplota varu a topenia. Očakávame percentuálne zastúpenie prvkov 50% Ni, 25% Nb, 25% Sn pri oboch vzorkách, pričom reálne zastúpenie prvkov sa len minimálne líši od teoretických hodnôt (Tab. 2).



Obr. 22: (a) objemová vzorka, (b) povrch z analýzy SEM, (c) EDX analýza

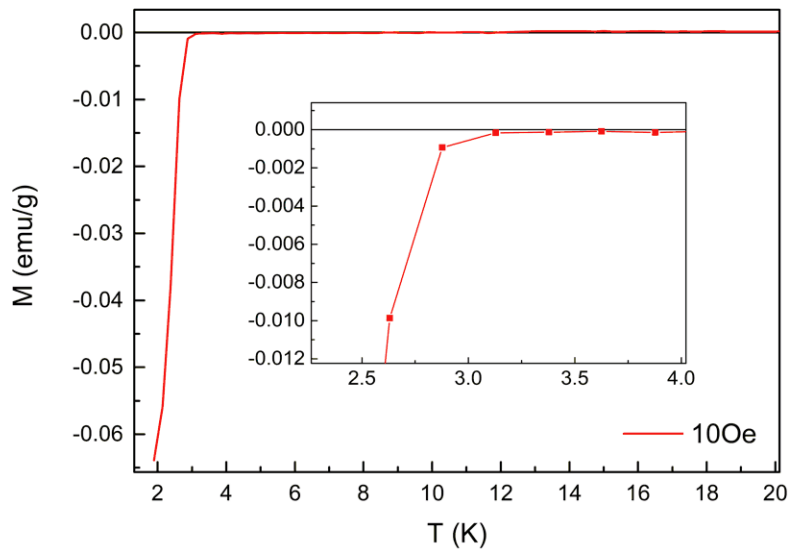
Merania sa uskutočnili na viacerých miestach na vzorke, pričom zloženie sa javilo všade rovnaké, líšilo sa nanajvýš o 1% na mieste niklu alebo nióbu, čo je v rámci chyby merania.

Prvok	Teoretické %	Experimentálne %
Nikel (Ni)	50.00	51.65
Niób (Nb)	25.00	23.38
Cín (Sn)	25.00	24.97

Tab. 2: Výsledky EDX analýzy

3.2 Merania magnetizácie ako funkcie teploty

Ak uvažujeme supravodivý feromagnet, tak pri charakterizácii magnetizácie ako funkcie teploty budeme očakávať, že magnetizácia bude klesať do záporných hodnôt od istej teploty T_K , kedy materiál prejde do supravodivého stavu. O feromagnete vieme povedať, že magnetizácia klesá so zvyšujúcou sa teplotou, a pri Curieho teplote T_C by mala klesnúť na nulovú hodnotu.



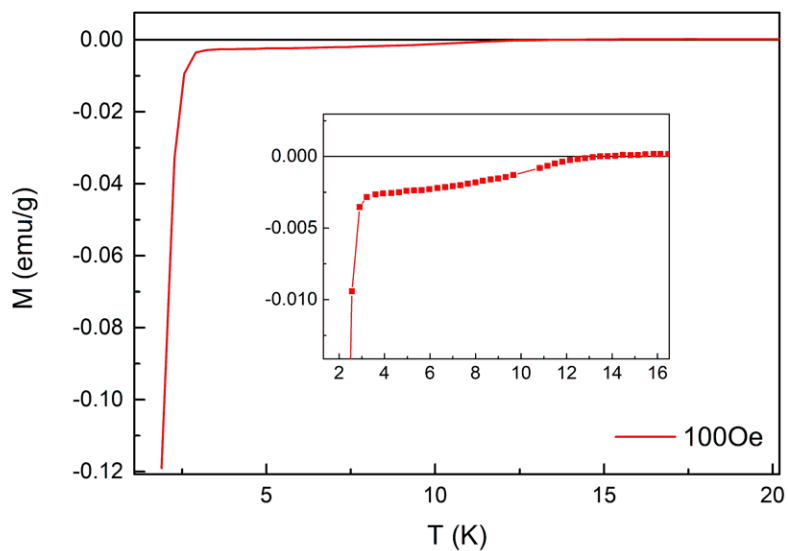
Obr. 23: Magnetizácia Ni_2NbSn ako funkcia teploty pri magnetickom poli 10Oe

Z Obr. 23 je zrejmé, že magnetizácia Ni_2NbSn začína klesať s klesajúcou teplotou pri teplote 3,1K. Uvedená hodnota by mala predstavovať kritickú teplotu T_K zliatiny Ni_2NbSn , pri ktorej sa začína správať ako supravodič.

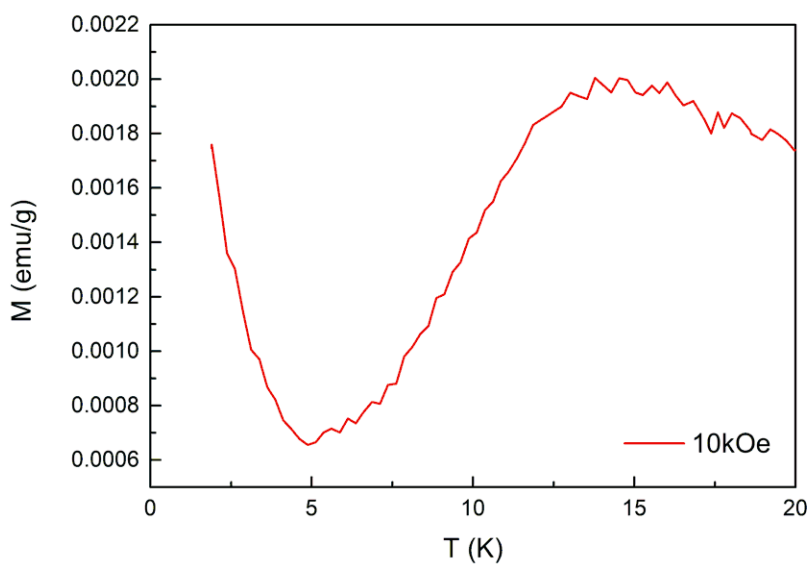
Pri vonkajšom magnetickom poli 100Oe (Obr. 24) začína magnetizácia pomaly klesať s klesajúcou teplotou pri 15K do záporných hodnôt, avšak T_K pozorujeme až pri 2,8K. Zníženie T_K spôsobuje zvyšujúce sa vonkajšie magnetické pole. Jav, kedy začína magnetizácia pomaly klesať, by mohol predstavovať to, že vzorka začína vykazovať supravodivé vlastnosti, ale do totálneho supravodivého stavu prechádza až pri teplote 3K.

Pri magnetickom poli 10kOe a teplote 15K (Obr. 25) sa meraná vzorka správa

ako feromagnet. Pod 15K začína magnetizácia prudko klesať a následne pri 5K magnetizácia prudko narastá. Takéto správanie pod 5K mohlo spôsobiť vysoké magnetické pole, ktoré zamedzilo prechodu do supravodivého stavu.

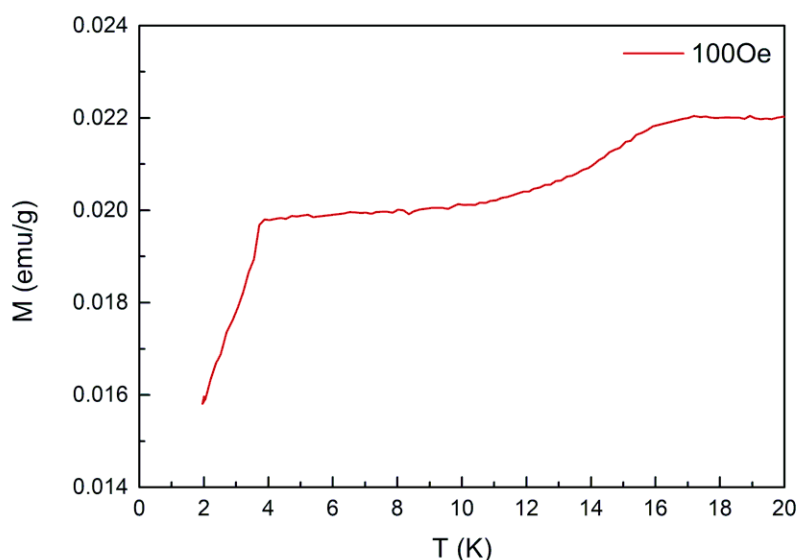


Obr. 24: Magnetizácia Ni_2NbSn ako funkcia teploty pri magnetickom poli 100Oe



Obr. 25: Magnetizácia Ni_2NbSn ako funkcia teploty pri magnetickom poli 10kOe

V nasledujúcom kroku sme sa rozhodli žihať vzorku, aby sme dosiahli homogenizáciu. Pri žihanej vzorke Ni_2NbSn , ktorá bola žišaná pri teplote 800K 6 hodín, je z Obr. 26 vidieť, že krivka magnetizácie má iný priebeh ako na Obr. 24 pri rovnakom vonkajšom magnetickom poli, avšak pri teplote 17,2K začína magnetizácia klesať podobne ako v prípade nežihanej vzorky. Ďalší pád krivky magnetizácie nastáva pri teplote 4K, čo by mohlo znamenať, že si materiál zachoval supravodivé vlastnosti aj po žíhaní, pričom sa zlepšili, čomu by odpovedala kritická teplota $T_K=4\text{K}$.

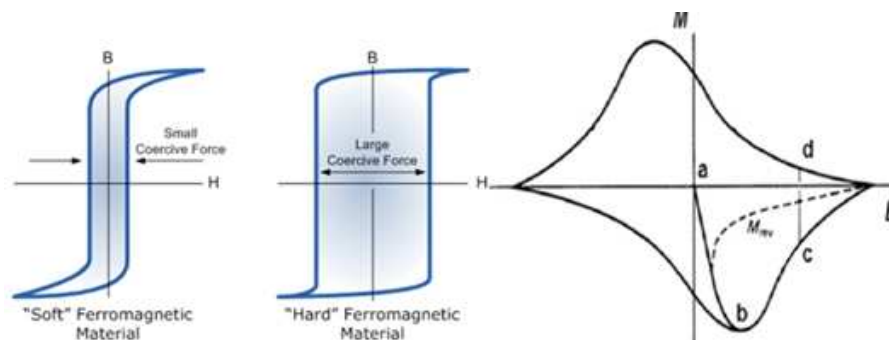


Obr. 26: Magnetizácia žihanej vzorky Ni_2NbSn ako funkcia teploty pri magnetickej poli 100Oe

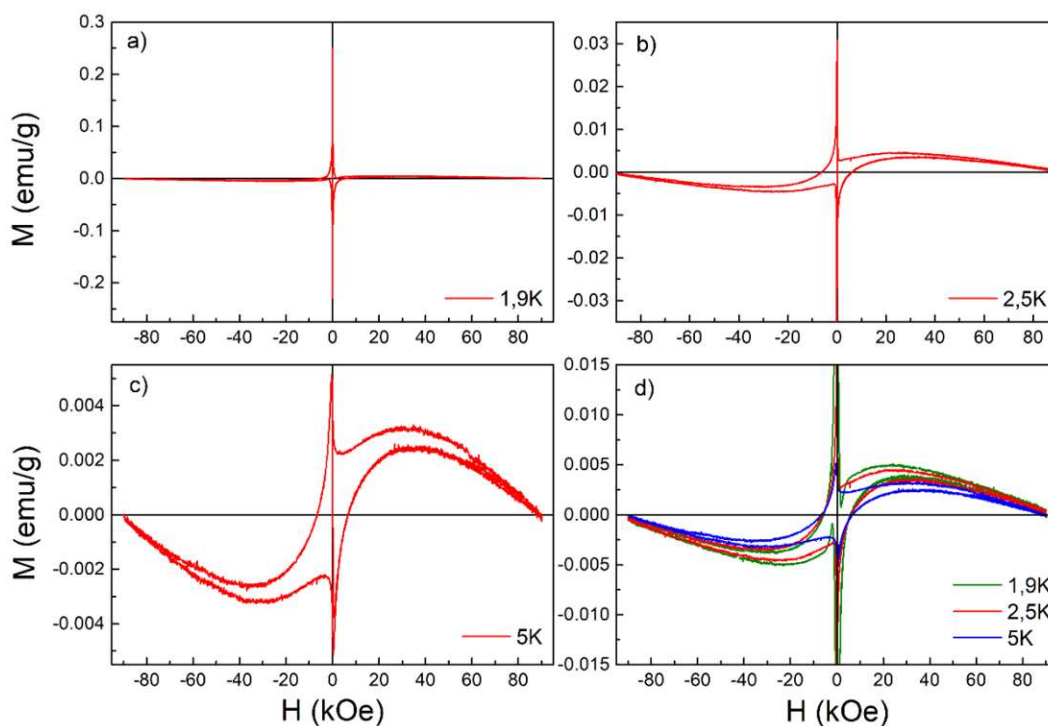
3.3 Hysterézne slučky

Podľa teórie očakávame, že v prípade supravodivého feromagnetu budú hysterézne slučky naznačovať feromagnetické správanie, v opačnom prípade supravodivé. Pre lepšiu charakterizáciu magnetických vlastností od magnetického poľa sme sa rozhodli pre meranie hysterézných slučiek, a to pri teplotách, kedy v závislosti $M(T)$ pozorujeme výrazne zmeny magnetizácie. Na Obr. 27 sú uvedené

magnetické hysterézne slučky feromagnetického materiálu a supravodivého materiálu. Zatiaľ čo u feromagnetického materiálu dochádza s narastajúcim kladným poľom k nárastu magnetizácie a naopak, v prípade supravodivého materiálu magnetizácia v kladnom poli klesá a následne pri kritickom poli narastá na hodnoty blízke nule z dôsledku prechodu od supravodivého stavu do normálneho stavu.



Obr. 27: Príklad hysteréznej slučky feromagnetu a supravodiča [16][17]



Obr. 28: Hysterézna slučka Ni_2NbSn pri teplote: a) 1,9K, b) 2,5K, c) 5K, d) spolu

Z grafu a) na Obr. 28 je viditeľné, že vzorka pri teplote 1,9K vykazuje vlast-

nosti supravodivého materiálu, pričom feromagnetické vlastnosti materiálu sú rovnako prítomné, avšak sú výrazne potláčané supravodivou zložkou.

Z grafu b) si môžeme všimnúť, že so stúpajúcou teplotou sa začínajú výraznejšie prejavovať feromagnetické vlastnosti materiálu na úkor supravodivých vlastností, avšak feromagnetické vlastnosti sa so stúpajúcou teplotou taktiež potláčajú. Strata supravodivých vlastností sa dá interpretovať tým, že teplota sa približuje k nami odhadovanej $T_K = 2,8\text{K}$ (merania magnetizácie ako funkcie teploty), za ktorou už materiál stráca supravodivé vlastnosti.

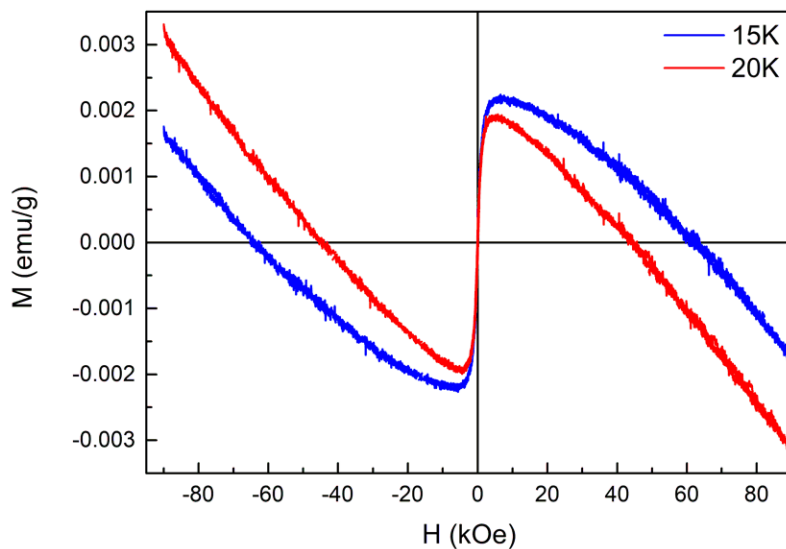
Podobne ako pri teplote 2,5K aj pri teplote 5K (Obr. 28 c) sa feromagnetická časť materiálu prejavuje výraznejšie, na úkor supravodivej časti. Je zrejmé, že pri typických feromagnetoch očakávame stav nasýtenia, avšak z grafu je vidieť, že k nasýteniu nedochádza, ale magnetizácia klesá na nulové hodnoty pri poliach väčších ako 40kOe. To môže spôsobovať značný diamagnetický príspevok supravodivej časti materiálu, ktorý znižuje celkovú magnetizáciu vzorky vo všetkých troch prípadoch.

Pri teplote 5K sme už supravodivé vlastnosti materiálu neočakávali, pretože nami predpovedaná hodnota kritickej teploty z meraní magnetizácie ako funkcie teploty je 2,8K. To môže znamenať, že sa vo vzorke nachádza viacero fáz, pričom jedna z nich je supravodič s kritickou teplotou väčšou ako 5K. Či sa v materiáli nachádza viacero fáz nám pomôže určiť Röntgenova difrakčná analýza.

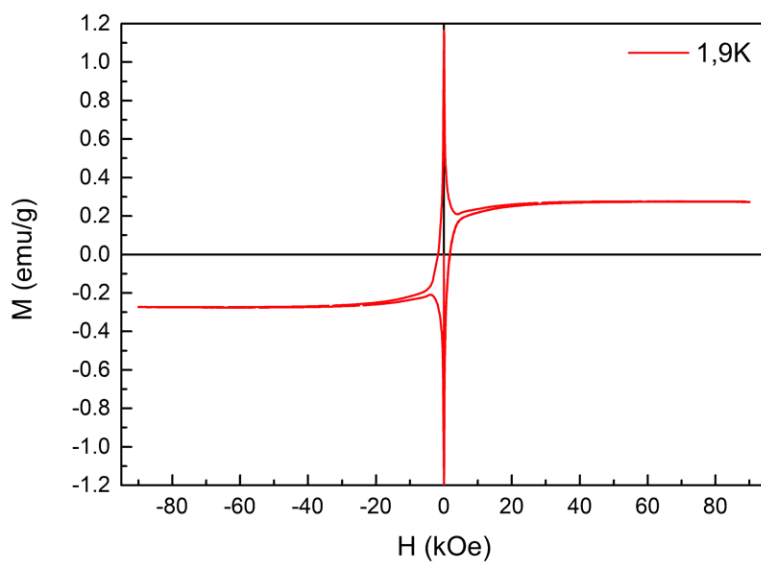
Taktiež s ustupujúcimi feromagnetickými vlastnosťami môžeme usúdiť, že sa blížime ku Curieho teplote, kedy po jej prekročení materiál úplne stratí feromagnetické vlastnosti. To, že s klesajúcou teplotou sa výraznejšie prejavujú feromagnetické aj supravodivé vlastnosti, by sa dalo vysvetliť uvedenou teóriou, kedy sa pri nízkych teplotách vytvárajú pravidelné feromagnetické domény obklopené supravodivými prúdmi pribehajúcimi v doménových stenách.

Na Obr. 29 si môžeme všimnúť, že na rozdiel od hysteréznych slučiek meraných pri nízkych teplotách, kde bola výrazná hysterezia materiálu rádovo 10^3Oe ($\sim 6000\text{Oe}$), tak pri teplote 15K nepozorujeme hystereziu materiálu, teda nad touto teplotou materiál vykazuje paramagnetické vlastnosti. Taktiež už nepozo-

rujeme supravodivé vlastnosti, avšak diamagnetický príspevok je stále prítomný.



Obr. 29: *Hysterézne slučky Ni_2NbSn pri teplote 15K a 20K*

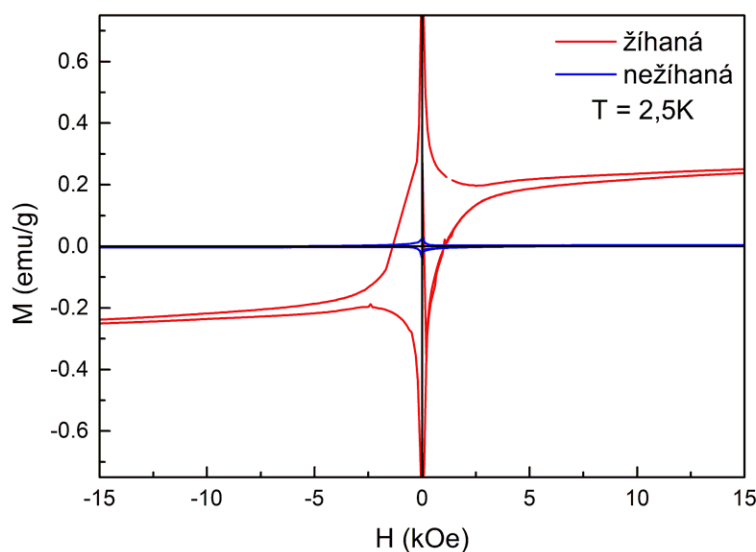


Obr. 30: *Hysterézna slučka žihanej vzorky Ni_2NbSn pri teplote 2K*

Časť materiálu Ni_2NbSn sme žihali, aby sme prišli na to či sa materiál žíhaním

homogenizuje alebo stratí svoje vlastnosti. Z Obr. 30 je vidieť, že materiál pri teplote 1,9K aj naďalej vykazuje zároveň supravodivé aj feromagnetické vlastnosti, pričom by sme mohli povedať, že je vzorka homogénnejšia.

Z Obr. 31 je vidieť že magnetické aj supravodivé vlastnosti materiálu sa zlepšili niekoľkonásobne, teda žíhanie vzorky upravilo vlastnosti nežíhaného materiálu.

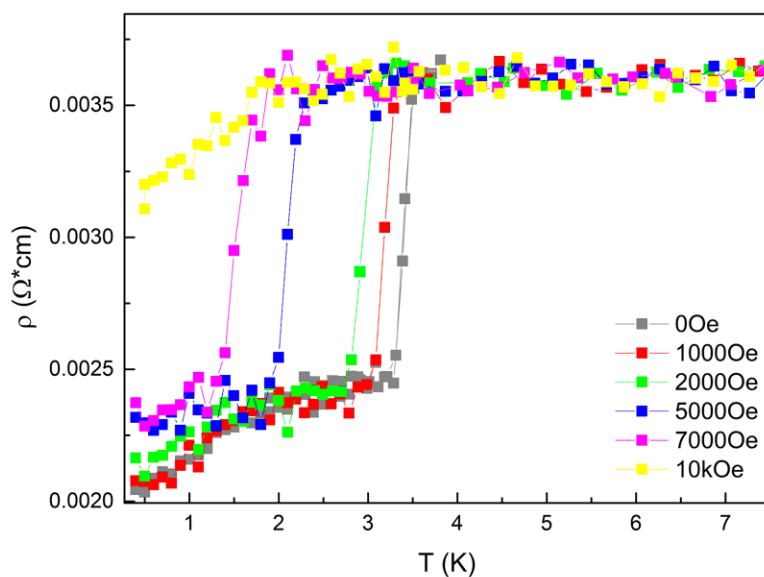


Obr. 31: Hysterézná slučka žíhanej a nežíhanej vzorky Ni_2NbSn pri teplote 2,5K

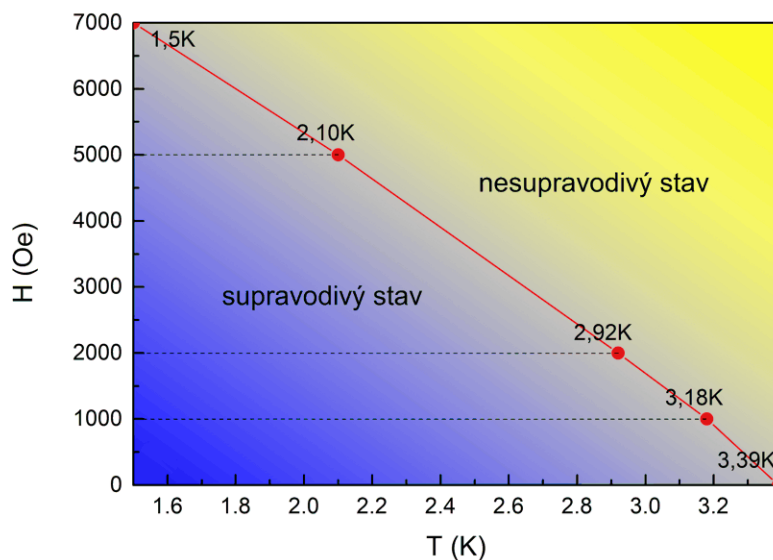
3.4 Merania odporu ako funkcie teploty

Meraniami odporu materiálu sme chceli potvrdiť, že materiál vykazuje supravodivé vlastnosti, tým že odpor padne pri kritickej teplote na nulovú hodnotu. Na Obr. 32 je vidieť, že špecifický odpor klesá ako pri supravodivom materiáli očakávame. Odpor neklesá až na nulové hodnoty, ale z meraní to vyzerá na chybný kontakt. Z toho dôvodu budeme považovať kritickú teplotu ako inflexný bod daných kriviek. Na základe kritických teplôt pri daných hodnotách vonkajších magnetických polí vieme zostrojiť fázový diagram (Obr. 33). Z Obr. 32 vieme povedať, že kritické magnetické pole je niekde pri hodnote 10kOe, avšak

pokles odporu pod teplotou 0,4K nevieme pozorovať.



Obr. 32: Špecifický odpor Ni_2NbSn ako závislosť teploty



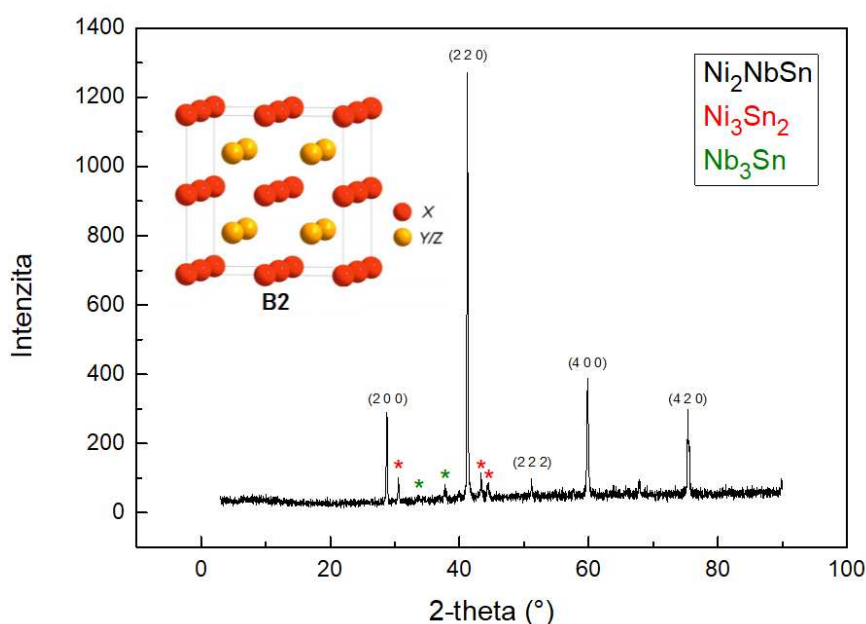
Obr. 33: Fázový diagram Ni_2NbSn

Fázový diagram Ni_2NbSn ukazuje vývoj kritickej teploty na základe von-

kajšieho magnetického poľa, teda so zvyšujúcim sa magnetickým poľom klesá kritická teplota materiálu.

3.5 Röntgenova difrakčná analýza

V tejto kapitole rozoberieme Röntgenovú difrakčnú analýzu objemovej vzorky Ni_2NbSn . Analýza by mala ukázať, že sa skutočne jedná o Heuslerovu zliatinu, aký typ Heuslerovej zliatiny vzorka predstavuje a či sa jedná o supravodivý feromagnet alebo 2 rozdielne fázy s feromagnetickým a supravodivým správaním.



Obr. 34: Výsledky Röntgenovej difrakčnej analýzy

Z Röntgenovej analýzy je viditeľné, že sa jedná o Heuslerovu zliatinu typu B2, ktorá je charakterizovaná vzájomnou zámennou atómov Y-Z (Nb, Sn) v kryštalickej mriežke (Obr. 15). Na rozdiel od požadovanej $L2_1$ štruktúry sa B2 štruktúra nevyznačuje nepárnyimi difrakciami $(1\ 1\ 1)$, $(3\ 1\ 1)$.

Navyše sa ukázalo, že sa vo vzorke vytvorili minoritné fázy Ni_3Sn_2 [18] a Nb_3Sn (<5%). Nb_3Sn predstavuje silný supravodič s $T_K = 18\text{K}$ [19], ktorý mohol spôsobovať pri meraniach magnetizácie ako funkcie teploty poklesy magnetizácie do záporných hodnôt už pri teplote 15K pri magnetickom poli 100Oe (Obr. 24), kedy sa ešte nemusela úplne prejaviť supravodivosť majoritnej fázy B2.

Záver

V tejto práci sme chceli poukázať na existenciu nového fenoménu, koexistenciu feromagnetizmu a supravodivosti. Tento jav sa nám podarilo ukázať na objemovej vzorke Heuslerovej zliatiny Ni_2NbSn .

Z magnetických meraní magnetizácie ako funkcie teploty sme ukázali, že materiál vykazuje silné diamagnetické vlastnosti do teploty $T_K = 2,8\text{K}$, čo sme zo začiatku považovali za kritickú teplotu materiálu. Hysteréznymi slučkami sme zistili, že pri nízkych teplotách sa materiál nachádza v dvoch fázach (feromagnetická a supravodivá), čo vysvetľuje ich tvar. So stúpajúcou teplotou sa tieto vlastnosti z materiálu rýchlo vytrácajú, čomu odpovedá aj teória o feromagnetických supravodičoch.

Meraniami odporu sa nám podarilo potvrdiť, supravodivé vlastnosti materiálu, na základe poklesu odporu pri kritickovej teplote. Pomocou týchto meraní sme dokázali zostrojiť fázový diagram materiálu, z ktorého vieme vyčítať vývoj kritickej teploty.

Následnou Röntgenovou difrakčnou analýzou, sme zistili, že vzorka Ni_2NbSn predstavuje jednofázový systém s nečistotami. a teda vykazuje feromagnetické a supravodivé vlastnosti súčasne. Uvedená Heuslerova zliatina kryštalizuje v štruktúre B2, ktorá je charakterizovaná chemickým neusporiadaním atómov Y, Z (X_2YZ). RTG difrakcia ukázala, že v zliatine sa nachádza vo veľmi malom množstve aj fáza Ni_3Sn_2 (feromagnet) a Nb_3Sn , ktorá predstavuje supravodič s kritickou teplotou $T_K = 18\text{K}$, čo mohlo spôsobiť predčasný pokles magnetizácie pri meraniach magnetizácie ako funkcie teploty.

Porovnaním hysterezných slučiek žihanej a nežihanej vzorky sme zistili, že žihanie zlepšilo supravodivé, ale aj feromagnetické vlastnosti materiálu niekoľkonásobne. V budúcnosti taktiež bude potrebné vykonať merania odporu žihaného materiálu, aby sme vedeli povedať, ako sa zmenila kritická teplota materiálu, a taktiež Röntgenovu difrakčnú analýzu, pretože žihanie mohlo zlepšiť aj homogenitu vzorky.

Tieto výsledky a široké uplatnenie nás inšpiruje zaoberať sa týmto javom aj naďalej, pričom našim cieľom by bolo posunúť kritickú teplotu do hodnôt nad 4K, teda nad teplotu tekutého hélia, kedy by bol materiál schopný nájsť praktické využitie.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Hajko V., Potocký L., Zentko A., Magnetizačné procesy, 30, 33, 40, 46 (1982)
- [2] Waki S., Yamaguchi Y., Mitsugi K., Journal of the Physical Society of Japan, 1675 (1985)
- [3] <https://phys.org/news/2012-03-magnetic-cloak-physicists-device-invisible.html>
- [4] <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=601>
- [5] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/bcs.html#c1>
- [6] <http://inspirehep.net/record/1254739/plots>
- [7] <https://bit.ly/2UDuD3v>
- [8] Rey C. M., Malozemoff A. P., Fundamentals of superconductivity, 33–41 (2015)
- [9] Klimczuk T., Wang C. H., Gofryk K., et. al., Physical review B 85, 174505 (2012)
- [10] Devizorova Zh., Mironov S., Buzdin A., Physical Review Letters 122, 117002 (2019)
- [11] Graf T., Felser C., et. al., Progress in Solid State Chemistry, 3, 11, 13 (2011)
- [12] Kanuch P., Ryba T., et. al., Acta Physica Polonica A Vol. 131, 1057–1059 (2017)
- [13] Schmetterer C., Flandorfer H., et. al., Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 36, 1416 (2007)
- [14] Kratochvíl B., Hušák M., Brynda J., Sedláček J., Chem. Listy 102, 889–901 (2008)
- [15] Wurmehl S., et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 40, 1525 (2007)
- [16] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html>
- [17] Flükiger R., Reviews of Accelerator Science and Technology, Vol. 5, 8 (2012)
- [18] Zhou G., Bakker H., Materials Science and Engineering, A179/A180 (1994) 453-457
- [19] Schoerling D., Zlobin V. A., Nb₃Sn Accelerator Magnets, 23 (2019)