



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

3D PRINDITUD MATERJALIDE MAGNETILISTE
OMADUSTE MÄÄRAMINE ELEKTRIMASINATE
PROTOTÜÜPIMISEKS
MAGNETIC PROPERTIES OF 3D PRINTED MATERIALS FOR PROTOTYPING
ELECTRICAL MACHINES
BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Naydis Artem

Üliõpilaskood: 143501

Juhendaja: Hans Tiismus, doktorant-nooremteadur

Kaasjuhendaja: Ants Kallaste, vanemteadur

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTTE

<i>Autor:</i> Artem Naydis	<i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö
<i>Töö pealkiri:</i> 3d printitud materjalide magnetiliste omaduste määramine elektrimasinate prototüüpimiseks	
<i>Kuupäev:</i> 24.05.2019	62 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> doktorant Hans Tiismus	
<i>Töö kaasjuhendaja(d):</i> vanemteadur Ants kallaste	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Selle uurimustöö põhilisteks eesmärkideks on määrata 3D printitud magnetmaterjalide magneetilisi omadusi ning katsetada magnetomaduste täiendamiseks erinevaid printimise parameetrid ja katskehade järeltöötamise soojusega.</p> <p>Esmaselt 3D SLM printeriga olid toodud standardse printimis parameetritega 3% ja 6,5% räni sisaldusega elekritehnilise terase pulbrist rõngakujulised katsekehad. Peale seda neist oli valmistatud rõngaspoolid, mis olid ühendatud katseskeemiga. Edaspidi nendega olid tehtud katsetused segedustel 1,10 ja 50Hz. Analüüsimiseade abil oli kogutud sisend- ja väljundpingete ning väljundvoolu väärtused, mis olid kasutatud ülekannesuhte, magnetvoogu, magnetvälja tugevuse ja tiheduse arvutamiseks. Saadud arvuliste väärtuste põhjal olid ülesehitatud erinevate katsekehade hüstereesisilmused, mille alusel oli tehtud printimiseks kasutatavate materjalide magnetiliste omaduste analüüs.</p> <p>Pärast oli toodud optimeeritud printimis parameetritega 6,5% räni sisaldusega katsekehad. Nendega oli tehtud samad tegevused kaks korda. Pärast esimest korda mähised olid ära võetud ning rõngad olid lõõmutatud ahjus. Peale seda kogu protsess toimus uuesti. See oli vajalik lõõmutamise mõju katsekehade magnetomadustele vaatlemiseks.</p> <p>Kogutud andemete põhjal oli tehtud lõplik kokkuvõtte.</p>	
<i>Märksõnad:</i> pehmed magnetmaterjalid, hüstereesisilmus, magnetvälja tihedus ja tugevus, magnetvoog, rõngaspool, sagedus, lõõmutamine, magnetilised omadused.	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Naydis Artem	<i>Type of the work:</i> Bachelor
<i>Title:</i> magnetic properties of 3d printed materials for prototyping electrical machines	
<i>Date:</i> 24.05.2019	62 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Early Stage Researcher Hans Tiismus	
<i>Co-supervisor(s) of the thesis:</i> Senior Research Scientist Ants Kallaste	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The main objectives of this study are to determine the magnetic properties of 3D printed magnetic materials and to test different printing parameters and heat post-treatment of used test pieces.</p> <p>Initially, investigated samples were printed in form of the rings and with standard printing settings. For printing were used 3% and 6.5% containing silicon powders of electrical steel. After that printed rings were used for making coils which were connected to the research circuit. With the help of the analyzing facility were obtained the values of input/output voltages and the input current. The values obtained were used in magnetic flux, field density and strength the calculations. According to the calculated data, hysteresis loops of various samples were constructed and on the basis of which an analysis of the magnetic properties of the printed samples was made.</p> <p>Next were printed samples with optimized printing settings and with 6,5% silicon content. The work described previously was done with them twice. After they were measured, they were unwound and placed in to the furnace. After the process of doing coils and hysteresis loops creating was repeated again. This was necessary, in order to evaluate the effect of heat treatment of the magnetic properties of the samples.</p> <p>Based on the obtained data a conclusion was made.</p>	
<i>Keywords:</i> soft magnetic materials, hysteresis loop, magnetic field density and strength, magnetic flux, coil, remanence, annealing, frequency, magnetic properties.	

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1 Aatomi ehitus[6].....	16
Joonis 1.2 Elektronpilv metallisideme korral[5]	16
Joonis 1.3 Aatomite paiknevus elementaarvõres[2].....	19
Joonis 1.4 Kristalli kasv ja polükristalse struktuuri moodustumine[5].....	20
Joonis 1. 5 Metalli jahtumiskõverad erinevatel jahtumiskiirustel[5]	21
Joonis 2.1 Pika sirge juhtme väli, kui juhtmes on vool 0,25A [12].....	24
Joonis 2.2 Kruvireegel[12]	25
Joonis 2.3 Magnetvoog läbi pinna, kui magnetvootiheduse B väli on homogeenne ja pinnaga risti[12].....	26
Joonis 2.4 Magnetvoo leidmine vektorite B ja dA skalaarkorrutise integreerimisega üle pinna A[12]	27
Joonis 2.5 Orientatsiooni pöördlemine ja suuruse kasv magnetilistes domeenides välise välja mõjul[3].....	29
Joonis 2.6 Diamagnetilise materjali magnetdomeenid reageerimas välisele magnetväljale[8]	30
Joonis 2.7 Lihtsustatud paramagnetilise aine mudel[9]	30
Joonis 2.8 Magnetmomentide joondumine antiferromagnetilises materjalis[4].....	31
Joonis 2.9 Magnetmomentide joondumine ferrimagnetilises materjalis[11].....	32
Joonis 3.1 Magneetimiskõver ja hüstereesisilmus[6].....	33
Joonis 4.1 Toroidi südamik enne ja pärast töötlemist (FeSi rõngas).....	41
Joonis 4.2 Mähitud toroid (6,5% rännisisaldusega FeSi).....	41
Joonis 4.3 Vasetraadid	41
Joonis 4.4 3D printer Realizer SLM-50.....	42
Joonis 4.5 Realizer SLM-50 printeri töö kamber.....	43
Joonis 4.6 Katsekehade struktuur[13]	43
Joonis 4.7 Defektse keha välise struktuuri näidis	44
Joonis 4.8 Katsekehade nr.1-6 mõõtmised	45
Joonis 4.9 Katsekeha nr.7 mõõtmised.....	46
Joonis 4.10 Katsestendi lihtsustatud skeem.....	46
Joonis 4.11 Signaali generaator GwInstek SFG -2120.....	47
Joonis 4.12 Võimendi Omicron CMS 356	47
Joonis 4.13 Mooduliseade Dewetron DEWE2-M.....	47
Joonis 4.14 Katsekehade 1-4,7 hüstereesisilmused voolul 14A ja sagedusel 1Hz.....	50
Joonis 4.15 Katsekehade 1, 3, 6 hüstereesisilmused voolul 14A ja sagedusel 1Hz.....	51

Joonis 4.16 Katsekehade 5,6 hüstereesisilmused enne ja pärast lõõmutamist voolul 14A ja sagedusel 1Hz	52
Joonis 4.17 Katsekeha 3 hüstereesisilmused voolul 14A.....	53
Joonis 4.18 Katsekeha nr.5 hüstereesisilmused voolul 14A	54
Joonis 4.19 Katsekeha nr.6 hüstereesisilmused voolul 14A.....	55

TABELITE LOETELU

Tabel 1.1 Materjalide omaduste tabel	22
Tabel 3.1 Erineva puhtuse ja töötlemisviisiga raua magnetilised omadused[6]	36
Tabel 3.2 Raua omaduste sõltuvus ränisisaldusest[6].....	36
Tabel 4.1 Katsekehade printimise parameetrid.....	44
Tabel 4.2 Katseandmed	45

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTTE	3
ABSTRACT.....	4
JOONISTE LOETELU.....	5
TABELITE LOETELU	7
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE.....	11
EESSÕNA.....	13
SISSEJUHATUS	14
1. MATERJALIDE STRUKTUUR JA OMADUSED.....	16
1.1. Materjalide aatomstruktuur.....	16
1.1.1. Metalside	16
1.2.2. Atomite paigutus	17
1.2. Kristalliline struktuur	17
1.2.1. Kristallivõre tüübid.....	17
1.3. Metall – mittemetall.....	18
1.4. Metallide kristalliline siseehitus – struktuur.....	18
1.4.1. Polümorfism	20
1.4.2. Isomorfism	20
1.4.3. Terastruktuuri teke –kristallisatsioon	20
1.4.4. Tera kuju	21
1.5. Materjalide omadused.....	21
2. MAGNETISM.....	23
2.1. Magnetismi allikad	23
2.2. Pika sirge juhtme magnetväli.....	23
2.3. Magnetvootiheduse väli ja magnetvoog.....	25
2.4. Rõngaspooli magnetväli ja ülekanadesuhe	27
2.5. Magnetilised domeenid	28
2.6. Diamagnetism	29
2.7. Paramagnetism.....	30
2.8. Ferromagnetism.....	30
2.9. Antiferromagnetism.....	31
2.10. Ferrimagnetism.....	31
3. MAGNETMATERJALID	32
3.1. Magnetmaterjalide magnetilised omadused	32
3.2. Magnetiliselt pehmed materjalid.....	35
3.2.1. Elektrotehniline lehtteras	36

3.2.2.	Permalloi	37
3.2.3.	Alsiferid	37
3.3.	Magnetiliselt kõvad materjalid.....	37
3.3.1.	Suure süsinikusisaldusega terased.....	38
3.3.2.	Raud-nikkel-alumiinium sulamid.....	38
3.3.3.	Metallkeraamilised püsिमagnetid	38
3.4.	Ferriidid.....	39
4.	3D PRINTITUD MAGNETMATERJALIDE MAGNETOMADUSTE UURIMINE.....	40
4.1.	Uurimuse üldkirjeldus.....	40
4.2.	Katsekehade printimise protsessi kirjeldus	42
4.2.1.	Printimise protsess.....	42
4.2.2.	Katsekehade Andmed	44
4.2.2.	Katseskeem.....	46
4.2.3.	Katseskeemi elementide seletus	46
4.3.	Arvutused	48
4.3.1.	Arvutuste näidised.....	48
4.4.	Katsete tulemused.....	50
4.4.1.	Katsekehade hüstereesisilmused.....	50
4.4.2.	Hüstereesisilmuste analüüs.....	56
	KOKKUVÕTTE.....	58
	SUMMARY	59
	KIRJANDUS.....	60
	LISA 1	61
	LISA 2	62

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	3D prinditud materjalide magnetiliste omaduste määramine elektrimasinate prototüüpimiseks
Lõputöö teema inglise keeles:	Magnetic properties of 3d printed materials for prototyping electrical machines
Üliõpilane:	Naydis Artem
Eriala:	Elektroenergeetika, AAVB
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	doktorant-nooremteadur Hans Tiismus
Lõputöö kaasjuhendaja:	vanemteadur Ants Kallaste
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	201919
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019, 15.00

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektrimasinate ja trafode üheks oluliseks komponendiks on magnetilised materjalid. Antud materjalidest sõltub olulisel määral seadme tööarakterisikud ning mõõtmed. Üheks oluliseks suuruseks magnetiistel materjalidel on nende magnetiline juhtivus, mida kirjeldatakse hüstereesi silmusega, mis määrab ära materjali magnetilised omadused. Lisaks esinevad magnetilistes materjalides ka magnetilised kaod, mis mõjutavad seadme talitlust ning kasutegurit. Tänu 3D printimise võimalutele on muutunud ka aktuaalseks magnetiliste materjalide printimine. See omakorda on tekitanud vajaduse uurida 3D printimisel saadud magnetiliste materjalide magnetilisi omadusi ning nende rakendamise võimalusi elektrimasinates.

2. Töö eesmärk

Antud lõputöö peamine eesmärk on 3D printeril printitud materjalide magnetiliste omaduste uurimine. Uurimine käib läbi materjali hüstereesi silmuse määramise. Lisaks uuritakse võimalusi, kuidas vähendada 3D printitud materjalide magnetilisi omadusi.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Antud töö kaigus on vajalik tutvuda erinevate 3D printitud materjalide magnetiliste omadustega, magnetkadude määramise ja arvutamise võimalustega, uurida 3D printeri printimise võimalusi, teha selgeks erinevate materjalide sissehituse ja struktuuri. Samuti on vaja uurida füüsili nähtusi seotud magnetismiga.

4. Lähteandmed

Selleks, et püstitatud küsimustele vastuseid leida hakkavad kasutama oma teoreetilisi teadmisi ja praktilisi oskusi. Samuti hakkavad uurima tehnilise kirjanduse, mis on vajalik töö tegemiseks. Kõik lähteandmeid võtavad raamatutest, erinevatest juhenditest, tabelitest ja internet allikatest.

5. Uurimismeetodid

Püstitatud küsimuste vastuste leidmiseks ja eesmärkide saavutamiseks antud töös hakatakse kasutama erinevaid kvantitatiivseid uurimismeetodeid. Nende hulka kuuluvad: teoreetiliste materjalide uurimine ja rakendamine, matemaatilised arvutused, laboratoorsed uuringud ehk katsete tegemine ning saadud tulemuste analüüs. Mõned teised uurimismeetodid võivad selles töös leida kasutust aga nad ei ole veel määratud.

6. Graafiline osa

Kõige olulisemad joonised on toodud peatükis 4.4.1., lk. 48.

7. Töö struktuur

Tööstruktuur on toodud sisukorras, lk. 7.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Kasutatud allikad on toodud kasutatud kirjanduses, lk. 57.

9. Lõputöö konsultandid

Selliseid inimesi ei olnud.

10. Töö etapid ja ajakava

Esimene etapp – standardse ja optimeeritud printimis parameetritega katsekehade printimine ;

Teine etapp – rõngaspoolete tegemine ning nende mõõtmine;

Kolmas etapp- optimeeritud printimis parameetritega katsekehade lõõmutamine;

Neljas etapp – lõõmutatud katsekehade toroidide valmistamine ning mõõtmine;

Viies etapp – saadud andemete analüüs.

Ajakava ei olnud määratud.

EESSÕNA

Töö teema oli palutud Tallinna Tehnikaülikooli nooremteaduri Hans Tiismu ja vanemteaduri Ants Kallaste töötajate poolt. Uurimustöö praktiline osa seisnes katsekehade ettevalmistamises ja mõõtmiste tegemises. Printimis protsessiga opereeris tööjuhendaja Hans Tiismus. Kõik vajalik töö oli tehtud Tallinna Tehnikaülikooli, elektroenergeetika ja mehhatroonika majas asuvas laboris, kasutades ülikooli oma seadmeid ja tööriistaid.

Lõputöö on valminud tänu Tallinna Tehnikaülikooli doktorandi Hans Tiismus ja vanemteaduri Ants Kallaste juhendamisele. Veel autor tänab juhendajaid teema pakkumise, meeldiva koostöö ja uusi teadmisi ja praktilisi oskusi omandamise võimaluse pärast.

SISSEJUHATUS

Elektrimasinate ja trafode üheks oluliseks komponendiks on magnetilised materjalid. Nende materjalide omadusest sõltuvad seadmete töökarakteristikud ja talitlus. Praegusel hetkel tehnoloogiad on juba nii arenenud, et annavad võimalusi kasutada 3D printereid, elektriseadmete osi välja printimiseks.

Elektriseadmete nagu trafod ja elektrimootorid peamiseks osadeks on nende südamikud. Neid valmistakse elektritehnilisest terasest, mille räni sisaldus ei ületa 3%. Edasine räni sisalduse kasv teeb materjali habrasemaks, mistõttu materjali töötlemise protsess on kallis ja tehniliselt raske. See on peamised põhjused, miks tööstuses kasutavate materjalide räni sisaldus ei ületa 3%. Tanapäeval nende probleemide lahendamiseks on olemas lahendused. Üks nendest on SLM printimise tehnoloogia, mis oluliselt lihtsustab 6,5% ränisisaldusega metallsulameid toota. Teiselt poolt, SLM printimise tehnoloogia peamiseks negatiivseks küljeks on printivate kehade sees tekivad sissepinged, mille pärast kehade struktuur on ebaühtlane. Kehade struktuuri sees tekivad mikropraod ja väikesed õhutihimikud. See oluliselt halveneb materjalide magnetilisi omadusi. Sellel põhjusel käsitletud teema vajab uurimist ja antud töö on väike samm selles suunas.

Nimetatud põhjuste pärast käsitleva töö peamiseks ülesanneteks on SLM 3D printeriga toodud pehmete magnetmaterjalide magnetiliste omaduste ning selle katsekehade magnetiliste omaduste täiendamiseviise uurimine.

Selles töös vadeldakse 3D printitud, SLM(Selective Laser Melting) tehnoloogiat kasutades, pehmete magnetmaterjalide magnetilisi omadusi. Selle tehnoloogia üheks põhiliseks probleemiks on printitud kehade sisestruktuuri defektid, mis oluliselt mõjutavad materjalide magnetilisi omadusi. See on vähesel määral uuritud, seepärast selle uurimustöö peamine eesmärk on määrata antud katsematerjalide magneetilisi omadusi ning leida optimalsed printimis seadistusi, kasutades mida võib saada hea magnetiliste parameetritega materjale, ehk teiste sõnadega leida meetodeid selliste materjalide magnetiliste omaduste paranemiseks.

3D printimise tehnoloogiatel on suur tulevik, kuna nende kasutus omandab palju häid omadusi, võrreldes tehnoloogiatega, kasutatavates traditsioonilises tööstuses. Kõige olulisemad nendest on keskkonna säilitamine, protsessi täpsus ja lihtsus ning madalad ressurside kulud. Keskkonna säilitamine on põhjustatud vähesel määral energia kasutusega, kuna printimise protsess vajab ohutult vähem elektrienergiat. Täpsus ja protsessi lihtsus on põhjendatud sellega, et opereerida printimis protsessiga ei ole keeruline ja sellega saab hakkama isegi tavaline inimene, kes omandab teadmisi printeri töö põhimõtetest ja oskab kasutada vajalike tarkvarasid. Samuti, kasutades 3D printereid saab teha väga väikesi detaile suure täpsusega, mis omakorda tähendab 3D tehnoloogiate universaalsust. See tähendab, et 3D printimise tehnoloogiate kasutusala on päris lai.

Tasub mainida ka seda, et 3D printimine on ka soodne. See säilitab mitte ainult elektrienergiat, vaid ka materjali, kuna 3D printerid kasutavad printimiseks erinevate metallsulamite pulbreid, mis tähendab, et materjalikulu on väike. Tänapäeval 3D metallmaterjalide printimine ei ole veel tugevalt levinud. Seepärast tehniliselt raskete seadmete tõttu metallmaterjalide printimine on kallihinnaline. See on olukord, mis on kujunenud täna aga võib kindlalt öelda, et mõne aastate pärast see muutub vastupidiseks, kuna 3D printimise tehnoloogiad arenevad väga kiiresti. Iga aastaga nende kasutusala kasvab. Kokkuvõttes võib öelda, et 3D printimise tehnoloogiatel on suur potentsiaal, mida tänapäeval aktiivselt uuritakse. Antud põhjuste pärast käsitlev töö on aktuaalne ning võib leida kasutust alajargnevates uuringutes.

3D printitud pehmete magnetmaterjalide magnetiliste omaduste määramise teemat oli valinud, sest tahtsin rohkem teada saada magnetismi nähtuse ja magnetmaterjalide omaduste kohta. Lõputöö teooria osa annab ülevaate ainete ehitusest ja liigitusest ning kirjeldab magnetmaterjalide füüsikalisi omadusi. Täpsemalt on välja toodud magnetismi nähtuse mõju magnetmaterjalidele. Praktiline osa sõnastab lahti antud katsekehade magnetilisi omadusi. Veel on praktilises osas kirjeldatud magnetvälja tiheduse ja tugevuse arvutuskäik.

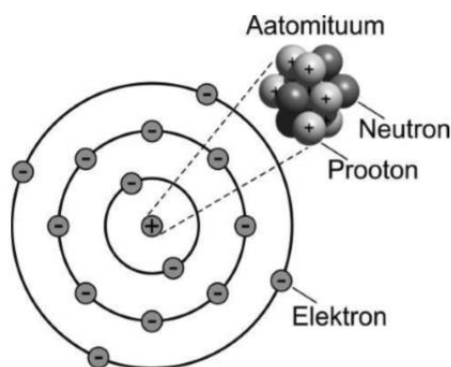
Lõpuosas on antud lühike ülevaade katsematerjalide magnetilistest omadustest.

1. MATERJALIDE STRUKTUUR JA OMADUSED

1.1. Materjalide aatomstruktuur

Kõikide tehnomaterjalide põhiliseks struktuuri-ühikuks on aatom, mis koosneb positiivselt laetud tuumast ja seda ümbritsevast elektronkattest (joonis 1.1). Aatomituum koosneb prootonitest ja neutronitest, mille arv võrdub aatomnumbriga (järjenumbriga). Aatommass määrab tahke ainete tahkise tiheduse, elektrijuhtivuse, soojusmahtuvuse, mõjub aga vähe selle tugevusomadustele.

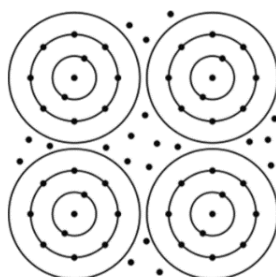
Aatomkristallilise või lihtsalt kristallilise struktuuri all mõeldakse aatomite (ioonide) omavahelist paigutust realselt esinevas kristallis. Metallis paiknevad aatomid kindla seaduspärasuse järgi, moodustades korrapärase kristallivõre. Seldline aatomite paigutus vastab aatomite omavahelise mõju minimaalsele energiale (aatomite ideaalsele paigutusele). [6]



Joonis 1.1 Aatomi ehitus[6]

1.1.1. Metalside

Tüüpiliste metallide aatomeis on üsna vähe valentselektrone – 1, 2 või 3. Nende arv võib olla ebapiisav kovalentsideme moodustamiseks. Metallide aatomeis võib laheneda see nii, et valentselektronid eralduvad aatomeist, moodustades selle ümber elektronpilve ehk elektrongaasi (joonis 1.2). [5]



Joonis 1.2 Elektronpilv metallisideme korral[5]

1.2.2 Atomite paigutus

Aatomite paigutusel on määrav roll materjali omadustele. Olenevalt aatomite rühmitamisest liigitatakse materjalid (struktuurid) molekulaarseteks, kristalseteks ja amorfseteks.

Molekulaarstruktuuri korral hoiavad määratud arvu aatomeid koos primaarsed sidemed, kusjuures molekulide vahel on nõrk side. Tüüpilisteks näideteks on hapnik (O_2), vesi (H_2O) ja etüleen (C_2H_4). Iga molekul on võimeline suuremal või vähemal määral tegutsema iseseisvalt, seega iseloomustab neid materjale madal sulamis- ja keemistemperatuur.

Tahkistele (metallidele ja mineraalidele) on omane kristalne struktuur. Siin moodustavad aatomid korrapärase geomeetrilise kujundi, mis on tuntud kristallivõrena. Kristallivõret iseloomustab elementaarkristallivõre, mis kordub ruumis lõpmatu arv kordi.

Põhiliselt on amorfne struktuur näiteks klaasil, kus aatomitel on korrapärane paigutus naaberaatomi(te) suhtes vaid lokaalselt. Materjali koguulatuses perioodiliselt korduvataatomite paigutust ei ole. Aatomitevahelised kaugused ja aatomi suurus materjalis pole püsivad suurused.

Aatomi elektronkihtide poolt hõivatud maht on kaugelt suurem kui elektronide mõõtmed; suurem kui aatomi poolt hõivatud maht. Aatomid pole tahkised, mistõttu aatomi suurus on midagi ebamäärast. Erinevad aatomsidemed püüavad hoida aatomeid koos, aga positiivses tuumas eksisteerivad tõukejõud. Tasakaaluline paigutus viitab tõuke- ja tõmbejõudude tasakaalule. [5]

1.2. Kristalliline struktuur

Aatomite paigutust kristallis võib kujutada ruumiliste skeemide abil, nn. võreelementide näol. Võreelemendi all tuleb mõista vähimat aatomite kompleksi, mille paljukordne kordumine ruumis jäljendab ruumilist kristallivõret. Võreelemendi servade pikkusest ja servadevaheliste nurkadest olenevalt eristatakse mitmeid kristallivõre tüüpe. [5]

1.2.1 Kristallivõre tüübid

Kristallivõred (võreelemendid) võivad olla:

- primitiivsed e. lihtsad – aatomid paiknevad ainult võreelemendi sõlmpunktides (tippudes);
- ruumkesendatud – lisaks võreelemendi tippudes olevaile aatomeile paikneb üks aatom võreelemendi sees;
- tahkesendatud – lisaks võreelemendi tippudes olevaile aatomeile paiknevad aatomid iga tahu keskel;
- põhitahkesendatud – lisaks võreelemendi tippudes olevaile aatomeile paiknevad aatomid põhitahkude keskel.

1.3. Metall – mittemetall

Metallid on ained, millel on tahkes olekus iseloomulik läige, hea elektri- ja soojusjuhtivus ning tavaliselt ka hea mehaaniline töödeldavus, suur plastsus ja elastsus. Metallide omadused on seletatavad aatomi tuumaga nõrgalt seotud vabade elektronide (valentsselektronide) olemasoluga nende kristallivõre aatomite välimises elektronkihis. Metallid loovutavad kergesti väliskihi elektrone, mis on omakorda mõjutatavad välise elektriväljaga, andes korrapärase elektronide voolu ja hea elektri juhtivuse. Metallide hulka kuulub keemilistest elementidest 80%, kusjuures kõik metallid peale elavhõbeda on tavalisel temperatuuril tahked ained (tahkised). Metallid ja sulamid liigitatakse koostise kahte suurde gruppi - raud ja rauasulamid (nende arvele tuleb u. 95% kogu maailma metallitoodangust) ning mitteraudmetallid ja mitterauasulamid (tuntud värvilismetallide ja -sulamitena) – need on kõik ülejäänud metallid ja nende sulamid. Teisteks liigituse alusteks on tihedus (kerg- ja raskmetallid ning sulamid), sulamistemperatuur (kerg- ja rasksulavad metallid ja sulamid), keemiline aktiivsus (väärismetallid ja mitteväärismetallid). Tehakse vahet ka leelismetallide, leelismuldmetallide, haruldaste ja hajusate, radioaktiivsete ja teiste metallide vahel. [5]

1.4. Metallide kristalliline siseehitus – struktuur

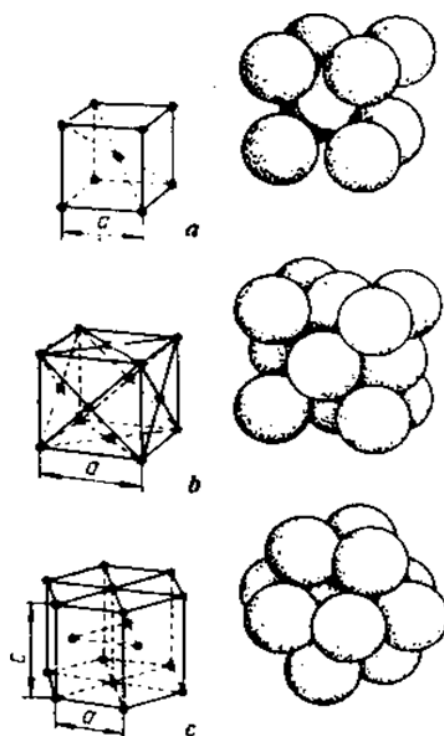
Metallidele on iseloomulik, et nende aatomite välimises elektronkihis on tavaliselt 1-2 elektroni, mis on tuumaga nõrgalt seotud. Aatomid loovutavad neid kergesti, muutudes ise positiivselt laetud ioonideks, püüdes siduda aktiivsemaid teiste materjalide elektrone või aatomeid.

Seetõttu metallidest (raud, vask, alumiinium jt.) on võimalik saada sulasolekus – kõrgetel temperatuuridel keemilisi ühendeid, millede koostisse võivad kuuluda ka mittemetallid (C, S, F, Si jt.). Selliseid mitmetest elementidest ja ühenditest – komponentidest koosnevate materjali nimetatakse sulamiks. Sulami nimetuse täpsustavad koostise põhikomponentide nimed nagu terasel – raud-süsiniksulam, pronksil – vase-pliisulam ja messingil – vase-tsingisulam.

Kõik metallid ja nende sulamid kuuluvad kristalliliste ainete hulka, kuna nende aatomid paiknevad ruumis korrapäraselt, aga mitte kaootiliselt nagu amorfsetel ainetel (klaas, vaik, plastmass jms.). Seega koosneksid metallid nagu väheliikuvate ionide kogumist, mida ümbritsevad vabad elektronid, mis kergesti lähevad ühelt orbiidilt teisele. Moodustub nagu “elektronigaas”, mis seob ühtseks kogu metalli massi, tõmmates enda poole mitut naaberiooni korraga.

Kui metallide siseehituse selgitamiseks nende aatomeid või ioone kujutada keradena – sfääradena ja ühendada nad mõtteliste sirglõikudega, siis saaksime ruumilise geomeetrilise kujundi nn. kristallivõre. Enamasti on see kujund kuup või kuuetahtuline prisma, kus aineosakesed paiknevad kindla korra kohaselt geomeetrilise kujundi tippudes ja diagonaalide lõikepunktides

tahkudel või ruumis. Sellised kujundid – kristallvõred täidavad ruumi perioodiliselt kordudes kogu ainemassi ulatuses.[2]



Joonis 1.3 Aatomite paiknevus elementaarvõres[2]

Eri kristallivõre tüüpides võib paikneda enam aatomeid kui neid mahub kristallivõre sõlmpunktidesse. Enamikul kasutatavatel metallidel on kuubiline või heksagonaalne kristallivõre [6]:

- e) ruumkesendatud kuupvõre (joonis 1.3. a) : Cr, Fe, Mn, Mo, V, W;
- f) tahkkesendatud kuupvõre (joonis 1.3. b) : Ag, Al, Cu, Co, Ni, Pb, Pt, Sn;
- g) kompaktne heksagonaalvõre (joonis 1.3. c) : Be, Cd, Co, Cr, Mg, Ti, Zn.

Tegelikult metallide aatomite paigutus kogu kristalli mahus ei ole erinevates tingimustes püsivalt ühesugune. Teatavasti võnguvad aatomid pidevalt oma tasakaaluasendi ümber. Kui metalli kuumutada, siis suureneb aatomite võnkeamplituud. Üksikud aatomid, omades keskmisest suuremat energiat ning võnkeamplituudi, muudavad oma asukohta, muutes paigutuse tihedamaks või hõredamaks. Moodustuvad tahksentreeritud või ruumsentreeritud kristallvõred. Selle tulemusena metalli mehaanilised omadused võivad tugevneda või nõrgeneda ja muutuvad ka elektrilised ning magnetilised omadused. Võivad tekkida ka tühimikud – kristallivõre defektid, mis halvendavad omadusi.

Uurides aga metalli kristalle selgub, et nende omadused erinevas suunas on erinevad. Seda põhjustab aatomite erinev tihedus kristallivõres erinevates tasapindades ja kristallivõre

defektid. Selliseid aineid, mille aatomite tihedus ja seega ka omadused igas suunas on ühesugused nimetatakse isotroopseteks. Nende hulka kuuluvad amorfsed ained. [2]

1.4.1. Polümorfism

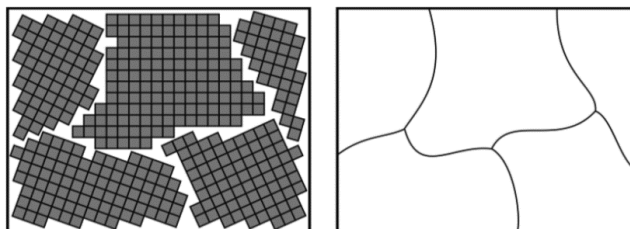
Polümorfism Mõnedel metallidel on sõltuvalt temperatuurist enam kui üks kristallivõre tüüp. Seda erinevate kristallivõrede esinemist ühe metalli korral nimetatakse polümorfismiks. Tuntumaks näiteks võib tuua raua ja titaani. Raua kristallivõre muutub temperatuuril 911 °C ruumkesendatud kuupvõrest tahkkesendatuks ja temperatuuril 1392 °C tagasi ruumkesendatuks. [5]

1.4.2. Isomorfism

Erinevate metallide kristallivõrede samakujulisust nimetatakse isomorfismiks (isomorphism). Isomorfsete ainete kristallivõredel on ligilähedased võreperioodid, aatomiraadiused, mistõttu aatomid võivad üksteist kristallivõres asendada. Näitena võib tuua Ag ja Au (mõlema metalli kristallivõre on tahkkesendatud kuupvõre)(joonis 1.3.b). [5]

1.4.3. Terastruktuuri teke –kristallisatsioon

Metalli tardumisel moodustuvad vedelmetallis väikesed antud metallile omase korrapärase aatomite paigutusega (kristallivõre) alad – tahkise osakesed. Need osakesed toimivad kui kristallisatsioonialged või -keskmed, mis kasvavad, kuna teised naabruses olevad aatomid liituvad nendega. Põhiline kristallivõre kordub ruumis (näiteks kuupvõre, joonis 1.3.a)

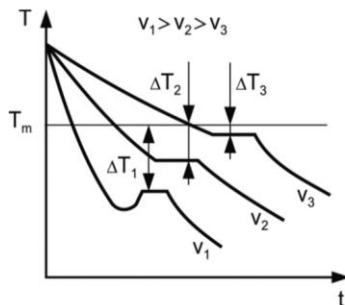


Joonis 1.4 Kristalli kasv ja polükristalse struktuuri moodustumine [5]

Tegelikult tardumisel moodustub samaaegselt palju kristallisatsioonikeskmeid vedelfaasi eri osades, mis on üksteise suhtes erinevalt orienteeritud. Igaüks neist kasvab, kuni nad hakkavad üksteist mõjutama. Kuna erinevates kasvavates kristallides kristallivõre orientatsioon on erinev, pole võimalik ühtse kristallstruktuuri moodustumine. Need moodustunud pidevstruktuuriga tahkise osised on tuntud kristallide või teradena ja pindu, mis neid lahutavad – terapiiridena. Seega terastruktuuri teke kuni tardumiseni on põhjustatud kristallisatsioonikeskmete tekkest ja nende kasvust. [5]

1.4.4. Tera kuju

Kristallumisel tekkivate kristallide (terade) kuju oleneb eelkõige nende kasvutingimustest, peamiselt soojuse äravoolu suunast ja kiirusest (jahtumiskiirusest). On täheldatud, et tera kasvab suurima kiirusega soojuse äravooluga vastassuunas. Seetõttu tekivad suunatud soojuse äravoolu korral sammakristallid. Kui soojuse äravool toimub kõigis kolmes suunas ühtlaselt, tekivad võrdtelgkristallid; kui jahtumine on aeglane –jämeterastruktuur. Seega eristatakse põhiliselt kolme liiki kristalle: võrdtelgkristalle, hulktahkkristalle ja sammakristalle. Viimaste erikujuks on dendriitkristallid ehk dendriidid, millel on iseloomulik peatelg (suund, kus kristall on kasvanud suurema kiirusega) ja kõrvaltelped. Tavaliselt on terade mõõtmed mõni sajandik millimeetrit. Puhta metalli kristallisatsiooniprotsessi iseloomustab jahtumiskõver teljestikus temperatuur-aeg. Joonisel 1.5 on erineva kiirusega jahutatud puhta metalli jahtumiskõverad. Väikesel jahtumiskiirusel (v_3) on allajahutusaste (ΔT_3) väike ja kristallumine toimub tasakaalutemperatuurile T_m lähedasel temperatuuril (Joonis 1.5, kõver v_3). Iseloomulik horisontaalne lõik jahtumiskõveral (jahtumine seiskub ja jahtumiskiirus on null, vaatamata sooja äravoolule jahtumisel) on tingitud kristallisatsioonisoojuse eraldumisest. Jahtumiskiiruse kasvades (joonis 1.5, kõverad v_2 ja v_1) suureneb ka allajahutusaste ja kristallumine toimub tasakaalutemperatuurist märgatavalt madalamal temperatuuril. Mida puhtam on metall, seda enam kaldub ta allajahutusele. [5]



Joonis 1. 5 Metalli jahtumiskõverad erinevatel jahtumiskiirustel[5]

1.5. Materjalide omadused

Materjalide valikul ja nende kasutusalaade määratlemisel pakuvad eelkõige huvi materjalide omadused, mis on ühelt poolt määratud nende struktuuriga, teiselt poolt nende saamise ja neist detailide valmistamise tehnoloogiaga. Materjalide omadused võib grupeerida füüsikalisteks, mehaanilisteks ja tehnoloogilisteks. Materjali kasutusomadusi iseloomustavad talitlusomadused (tabel 1.1).[6]

Tabel 1.1 Materjalide omadustetabel

Füüsikalised omadused	Mehaanilised omadused	Tehnoloogilised omadused	Talitusomadused
Tihedus	Tugevus	Valatavus	Korrosioonikindlus
Sulamistemperatuur	Kõvadus	Survetöödeldavus	Kulumiskindlus
Soojuspaisumine	Sitkus	Lõiketöödeldavus	Pinnaomadused
Soojusjuhtivus	Plastsus	Termotöödeldavus	Tulekindlus
Elektrijuhtivus		Keevitatavus	Soojuspüsivus Ohutus
Magnetism		Joodetavus	Keskkonnasõbralikkus

2. MAGNETISM

Magnetism on füüsikaliste nähtuste kogum, mis avaldub kehade vastastikusel mõjus magnetvälja kaudu. Aineid, mis on võimelised reageerima neile mõjuvale magnetväljale, nimetatakse magneetikuteks.[13]

Püsिमagnetitel on püsiv magnetväli, mida põhjustab ferromagnetism ja mis on ühtlasi ka tugevaim ja tuntuim magnetismi liik. Magnetväljad mõjutavad kõiki materjale, kuid mõju tugevus on erinev. Mõnda materjali tõmbab magnetväli ligi (paramagnetism), mõnda tõukab eemale (diamagnetism) ja teiste puhul on magnetvälja mõju seotud keerulisemate nähtustega (näiteks antiferromagnetism). Materjale, millele magnetväli avaldab tühist mõju, nimetatakse mittemagnetilisteks. Sellised on näiteks vask, alumiinium, gaasid ja plast. Puhtal hapnikul avalduvad magnetilised omadused siis, kui seda vedeldumiseni jahutada.

Magnetilistes materjalides on magneetumise põhjuseks elektronide tiirlemine ümber tuuma ja elektronide loomuomane magnetmoment. Teisteks allikateks on tuumade magnetmomendid, mis on tavaliselt tuhandeid kordi väiksemad elektronide magnetmomendist ja seega magneetumise seisukohast tühised. Tuumade magnetmomendid on olulised teistel puhkudel, näiteks magnetresonantstomograafia puhul. [3]

2.1. Magnetismi allikad

Magnetväli on elektromagnetilise välja üks komponent. Teine komponent on elektriväli. Elektromagnetiline väli on ruumi omaduste teatud muutus, mille sügavam olemus pole teada. Inimese meeleorganid tajuvad nähtavat valgust ja infrapunast soojuskiirgust, mis mõlemad on väga kõrge sageduse ja lühikese lainepikkusega elektromagnetilised väljad. Elektrimasinates kasutatakse magnetväli on kas muutumatu suurusega staatiline väli (näiteks alalisvoolumasina ergutusväli) või siis suhteliselt väikese sagedusega (0,1 Hz ... 1 kHz) muutuv väli. Sellist välja inimese meeleorganid ei taju.

Magnetvälja ainsaks teadaolevaks põhjustajaks on elektrivälja muutus. Kui näiteks elektron liigubruumis, siis tekib magnetväli, sest elektroni elektrivälja asend ruumis muutub. Elektrimasinates saadakse magnetväli mähiseid läbiva voolu abil. Elektrivool mähises on elektronide liikumine piki mähisetraati.[12]

2.2. Pika sirge juhtme magnetväli

Iga vooluga juhtme ümber on magnetväli. Pika ja sirge juhtme ümber oleva välja tugevuse H saab leida järgnevalt:

Valem 2.1 Juhtme ümber tekkiv välja tugevus

$$H = \frac{i}{2\pi R} \quad (2.1)$$

kus H – magnetväljatugevus, A/m;

i – vool, A

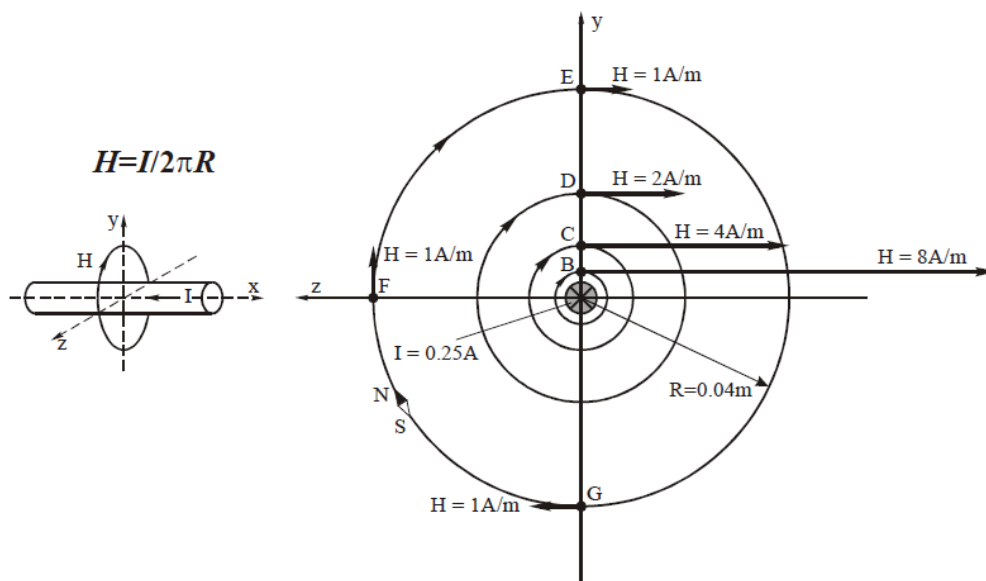
R – kaugus juhtme teljest jõujoonini, m

Valem (2.1) iseloomustab igat ruumpunkti juhtme ümbruses. Ta annab magnetvälja tugevuse jaotuse kirjelduse. Kui me tahaksime näiteks kirjeldada temperatuuri jaotust toas, siis saaksime seda teha temperatuurivälja kirjeldavate matemaatiliste avaldiste abil. Magnetvälja tuleb mõista kui teatud omadustega ruumi piirkonda. Magnetvälja võib käsitleda elektrivoolu nähtamatu koostisosana, mis on alati koos vooluga.

Mida tugevam on vool juhtmes ja mida ligemal on ruumpunkt juhtme pinnale, seda tugevam on väli. Kõige tugevam väli on juhtme pinnal.

Peale tugevuse iseloomustab magnetvälja suund. Magnetväli on vektorväli. Temperatuurile ei saa omistada suunda. Temperatuuriväli on skalaarväli. Magnetvälja suuna saab määrata näiteks väikese püsimagneti abil. Maa magnetvälja suuna määramiseks kasutatavas kompassis on magnetnõel, mille üks ots pöörduv maa magnetilise põhjapooluse poole ja teine lõunapooluse poole. Magnetnõela suund näitab magnetvälja suunda. Kompassinõela põhjapoolus osutab Maa geograafilisele põhjapoolusele, mille vahetus läheduses on Maa magnetiline lõunapoolus.

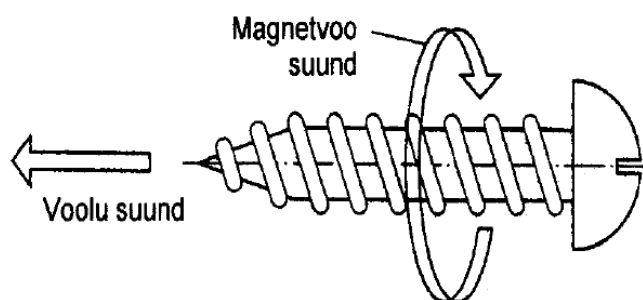
Visuaalse ettekujutuse saamiseks ruumis oleva magnetvälja tugevusest ja suunast on kasutusele võetud magnetvälja jõujoone mõiste. Jõujoone suund näitab magnetvälja suunda.



Joonis 2.1 Pika sirge juhtme väli, kui juhtmes on vool 0,25A [12]

Joonisel 2.1 on näidatud sirge juhtme välja jõujooned tasapinnal, mis on risti juhtme teljega. Jõujoonte suund näitab magnetvälja suunda. Magnetvälja tugevuse vektorid (punktides B, C, D, E, F, G) on jõujoonte puutuja suunalised. Mida tugevam on väli, seda tihedamalt paigutatakse jõujooned. Sellepärast on juhtmele ligemal jõujooned tihedamalt. Pika sirge juhtme magnetvälja jõujooned on ringjooned, mille keskpunkt asub juhtme teljel. Seega on kõik jõujooned vooluga juhett haaravad kinnised kõverad. Liikudes juhtme teljega paralleelselt välja tugevus ja suund ei muutu. Ülejäänud suundades liikudes aga juhtme väli muutub nii suuruselt kui suunalt. Sellist välja nimetatakse mittehomogeenseks. Kui välja suund ja tugevus on teatud ruumi osas igal pool ühesugune, siis sellist välja nimetatakse homogeenseks. Elektrimasinate õhupilu väli on ligikaudu homogeenne.

Juhtme voolu suund ja magnetvälja suund on omavahel seotud kruvireegli kaudu. Kui paremkeermega kruvi liigub voolu I suunas, siis kruvi pöörlemis-suund ühtib juhet ümbritseva magnetvälja H jõujoonte suunaga. See on näidatud joonisel 2.2. [12]



Joonis 2.2 Kruvireegel[12]

2.3. Magnetvootiheduse väli ja magnetvoog

Kui meil on kaks vooluga juhett, siis tekib nende juhtmete vahel mehaaniline jõud. Seda nimetatakse välja poolt indutseeritud (põhjastatud) jõuks. See on sarnane kahe püsimagneti vahelisele jõule. Kui me valime sellise voolude vahekorra, et üks vool on hästi suur ja teine vool hästi väike, siis selle väikese voolu väli ei muuda märkimisväärselt suure voolu välja. See annab meil võimaluse suure voolu välja erinevaid punkte iseloomustada selle järgi kui tugevat jõudu avaldavad need punktid väikesemõõtmelisele ja nõrga väljaga juhtmele.

Erinevaid punkte mõõtes saame me ruumi iseloomustuse seal tekkiva mehaanilise jõu seisukohalt. See ruumi iseloomustus on väli. Antud juhul seda välja nimetatakse magnetilise induktiooni väljaks või magnetvootiheduse väljaks. Kaks erinevat nimetust viitavad ühe ja sama nähtuse erinevatele külgedele. Induktiooni väljaks nimetamine viitab sellele, et tegemist on indutseeritud jõu väljaga. Välja üheks avaldusvormiks on jõu teke.

Magnetvoo tiheduse väljaks nimetamine iseloomustab välja olemuslikku külge. Juhet läbiva voolu magnetväli tekitab juhete ümbritsevas ruumis magnetvoo. Magnetvoog on oma olemuselt sarnane elektrivoolule või vedeliku voolule. Elektrivool on elektronide liikumine. Vedeliku vool on molekulide liikumine. Magnetvoogu põhjustavaid osakesi on nimetatud hüpoteetilisteks magnetlaenguteks. Nende olemasolu viitab magnetvoo ja elektrivoolu omaduste sarnasus. Seni ei ole aga suudetud magnetlaengute olemasolu ei tõestada ega ümber lükata. Vaatamata sisemise ehituse tundmatusele on magnetvoo olemasolu siiski kindel.

Magnetvootiheduse saab avaldada seda esile kutsunud magnetvälja tugevuse kaudu järgnevalt.

Valem(2,2) Magnetvootiheduse arvutamine magnetvälja tugevuse kaudu

$$B = \mu H, \text{ Wb/m}^2 \quad (2.2)$$

Kus B on magnetvootiheduse vektor, mis on igas ruumipunktis samasuunaline teda esile kutsuva magnetvälja suunaga. Magnetvootiheduse mõõtühikuks on veebrit ruutmeetritele (Wb/m^2). Mõõtühiku Wb/m^2 jaoks kasutatakse ka teist nimetust – tesla (tähis T). $1\text{T}=1\text{WB/m}^2$. μ kujutab endast keskkonda iseloomustavat tegurit, mida nimetatakse magnetiliseks läbitavuseks ehk permeaabluseks. Vaakumi permeaabluse tähiseks on μ_0 ja tema väärtuseks on $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. Õhu permeaablus on küllalt suure täpsusega võrdne vaakumi permeaablusega.

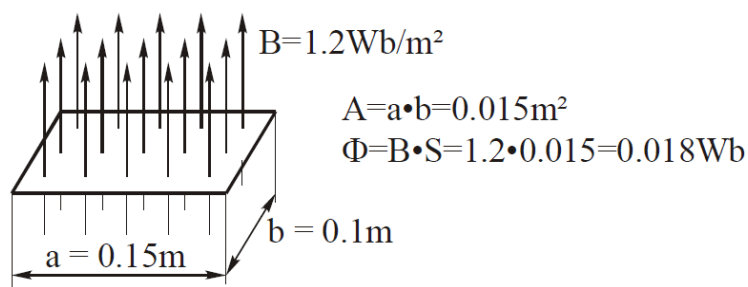
Magnetväljatugevus H ja magnetvootihedus B iseloomustavad mingit ruumi punkti. Magnetvoog iseloomustab ruumis olevat pinda.

Kõige lihtsamal juhul, kui magnetvootiheduse B väli on homogeenne ja jõujooned on risti pinnaga A (joon. 2.3), saab magnetvoo (tema tähis on Φ) leida magnetvoo tiheduse ja pinna suuruse korrutisena.

Valem 2.3 Magnetvoo arvutamine kui väli on homogeenne

$$\Phi = BA, [\text{Wb}] \quad (2.3)$$

Magnetvoo ühikuks on veeber (tähis Wb). Magnetvoogu vaadatakse piltlikult kui läbi mingi pinna minevate jõujoonte arvu. Tugevam väli annab rohkem jõujooni pinnahüvikule.



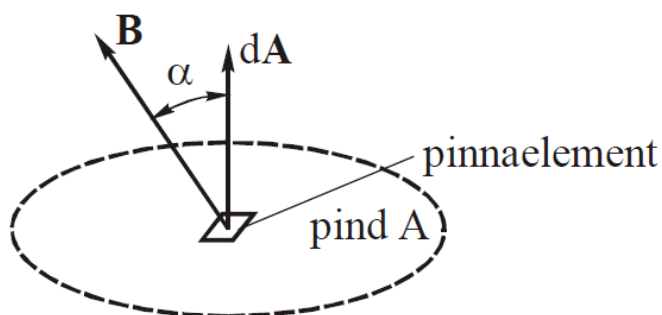
Joonis 2.3 Magnetvoog läbi pinna, kui magnetvootiheduse B väli on homogeenne ja pinnaga risti[12]

Magnetvoole ei omistata suunda ruumis, magnetvoog on skalaar. Siiski magnetahelas eristatakse magnetvoo positiivset ja negatiivset suunda nii nagu elektrivoolulgi. Üldjuhul, kui väli on ebaühtlane ehk mittehomogeenne ja ei ole pinnaga risti, saab magnetvoo leida integreerimisega üle pinna A (joonis 2.4).

Valem 2.4 Magnetvoo arvutamine kui väli on ebaühtlane

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} d\mathbf{A} = \int_A \cos \alpha dA, \text{ Wb} \quad (2.4)$$

Kus $d\mathbf{A}$ on pinna A elemendi vektor, mis on suunalt selle pinnaelemendiga risti, $\mathbf{B}d\mathbf{A}$ on vektorite \mathbf{B} ja $d\mathbf{A}$ skalaarkorrutis ja α on vektorite \mathbf{B} ja $d\mathbf{A}$ vaheline nurk.[12]



Joonis 2.4 Magnetvoo leidmine vektorite \mathbf{B} ja $d\mathbf{A}$ skalaarkorrutise integreerimisega üle pinna A[12]

2.4. Rõngaspooli magnetväli ja ülekandesuhe

Rõngaspool ehk toroid moodustub sõrmusekujulisest südamikust, millele on ühtlaselt mähitud mähised keerdude arvuga N_1, N_2 . Kui toroidi mähist läbib vool I , siis magnetvälja tugevus võrdub:

Valem 2.5 Magnetvälja tugevus

$$H = \frac{IN_1}{l} \text{ [A/m]} \quad (2.5)$$

kus l – magnetahela keskmine pikkus.

Magnetvälja tihedus võrdub valemiga :

Valem 2.6 Magnetiline induksioon

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int_t v(t) dt \text{ [T]} \quad (2.6)$$

kus S - südamiku ristlõikepindala ruutmeetrites

Eeldades, et magnetvoo tihedus kogu rõngassüdamikus on sama suur kui telgjoonel, on magnetvoog võrdub (valem 2.6)

Valemist 2.6 magnetvoog võrdub:

Valem 2.7 Magnetvoogu arvutamine

$$\varphi_n = \int_{t_1}^{t_2} \text{edt} = (t_2 - t_1) \left(\frac{(v_2 + v_1)}{2} \right) + (\varphi_{n-1}) \text{ [Wb]} \quad (2.7)$$

kus t_1, t_2 – ajaperiood;

v_1, v_2 – pinged ajahetkel t_1, t_2 .

Rõngaspooli omapäraks on asjaolu, et magnetväli tekib ainult rõngassüdamikus. Väljaspool rõngaspooli magnetvälja ei teki.

Rõngaspooli põhiosad on mähised ja südamik. Südamik moodustab magnetahela ja mähised elektrialelad. Lihtsaim toroid koosneb ferromagnetilisest südamikust ning kahest vasktraadist keritud mähisest – primaarmähisest ja sekundaarmähisest).

Muundatava vahelduvvoolu energia antakse primaarmähisesse, millest see siirdub sekundaarmähisesse mähisevahelise vastastikuse induksiooni vahendusel: primaarmähises kulgev vahelduvvool tekitab südamikus perioodiliselt muutuva magnetvoo, mis indutseerib sekundaarmähises vahelduva elektromotoorjõu. Kui sekundaarmähis ühendada energiat tarbiva elektrialelaga, läbib seda elektrivool.

Sekundaarmähises kujuneva pinge – sekundaarpinge – suuruse määrab mähiste keerdude arvu suhe. Ideaalse (energiakadudeta) toroidi korral võrdub primaarpinge ja sekundaarpinge suhe primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvu suhtega, mida nimetatakse ülekandesuhteks (valem 2.8):

Valem 2.8 Toroidi ülekandesuhe

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} \quad (2.8)$$

kus N_1, N_2 – keerdude arv primaar- ja sekundaarmähistes;

U_1, U_2, I_1, I_2 – pinged ja voolud primaar- ja sekundaarmähistes.

2.5. Magnetilised domeenid

Magnetiline domeen on mingi osa magnetilisest materjalist, millel on ühesugune magnetisatsioon. See tähendab, et aines olevate aatomite individuaalsed magnetmomendid on üksteisega paralleelsed ja ka samasuunalised. Kui magnetilise materjali temperatuuri langetada alla Curie temperatuuri, jaguneb see erinevate magnetisatsioonidega piirkondadeks, mida nimetatakse magnetilisteks domeenideks. Domeenisiseselt on magnetisatsiooni suund sama, aga domeenide vahel võib see suund olla erinev. Domeenide struktuur mõjutab ferromagnetiliste materjalide, nagu raua, nikli, koobalti, ja nende sulamite magnetilisi omadusi. Domeenide omavahelisi piire

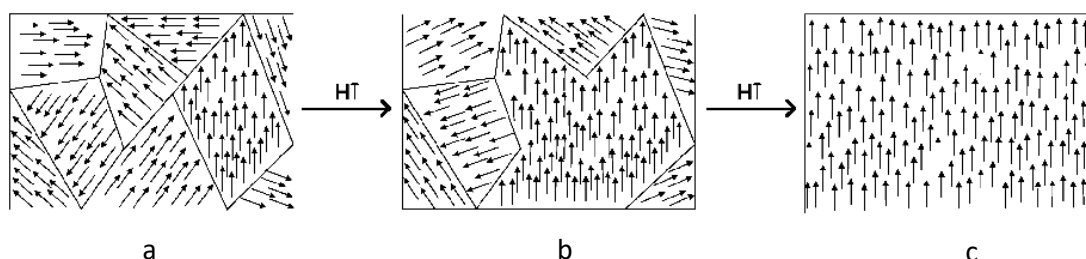
nimetatakse domeeni seinteks, mida ületades muutub magnetisatsiooni suund ühe domeeni omast teise omaga samasuunaliseks.

Magnetmoment ferromagnetilise materjali aatomites paneb aatomid käituma sarnaselt pisikeste püsिमagnetitega. Nad hoiavad kokku ja organiseeruvad väikesteks enam-vähem sama suunaga regioonideks, mida tuntakse magnetiliste doomenite ehk Weissi doomenitena. Mitmete teaduslike eksperimentidega on võimalik demonstreerida magnetväljade olemasolu.

Kui doomen sisaldab liiga palju molekule, siis muutub see ebastabiilseks ja jaguneb kaheks vastassuunas orienteeritud doomeniks, mis püsivad palju stabiilsemalt koos.

Sattudes magnetvälja mõju alla, doomenite piirid nihkuvad ja magneti järgi orienteerunud doomenid kasvavad suuremaks (joonis 2.5.b). Kui magnetväli eemaldada, siis ei pruugi doomenite endised piirid taastuda, mis toob kaasa materjali magneetumise: niimoodi tekivad püsिमagnetid.

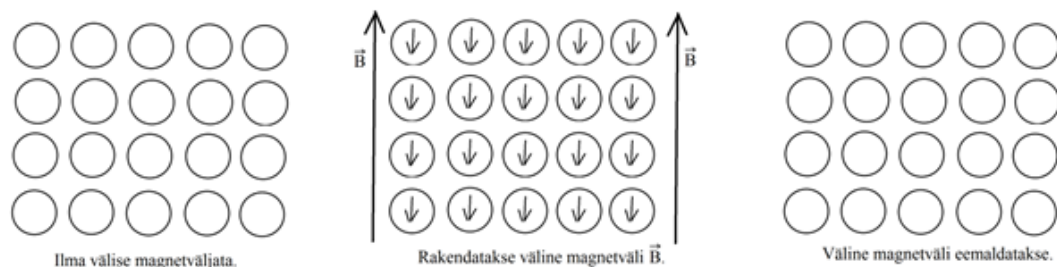
Kui magnetvälja mõju on piisavalt tugev, nii et üks doomen neelab kõik teised, siis on materjal magnetiliselt küllastunud (joonis 2.5.c). Kui magneeditud ferromagneetikut kuumutada Curie punktini, siis molekulide ergastumise tõttu doomenite organiseeritus kaob ja magnetilised omadused kaovad. Kui materjal maha jahutatakse, siis doomenite organiseeritus taastub, umbes sama moodi nagu külmutatud vedelikult taastub tahkes olekus kristallstruktuur.[3]



Joonis 2.5 Orientatsiooni pöörlemine ja suuruse kasv magnetilistes domeenides välise välja mõjul[3]

2.6. Diamagnetism

Diamagnetism on materjali omadus tekitada välises magnetväljas sellele vastu töötavat magnetvälja (joonis 2.6). Välise magnetvälja ja materjali vahel tekib tõukumine. Selle omaduse tõttu avaldub diamagnetism vaid välise välja olemasolul. Üldjuhul on diamagnetism üpris nõrk nähtus, kuid ülijuhtides avaldub tugevat efekti. Diamagnetismile vastandlik nähtus on paramagnetism, mille käigus vaadeldav materjal tõmbub välise magnetvälja poole.[8]

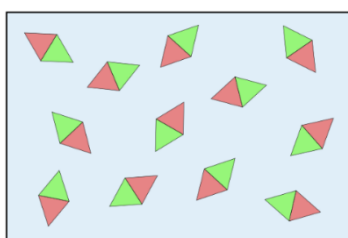


Joonis 2.6 Diamagnetilise materjali magnetdomeenid reageerimas välisele magnetväljale[8]

2.7. Paramagnetism

Paramagnetism on magnetismi vorm, mille korral paramagnetilises aines elektronid orienteeruvad välises magnetväljas magnetväljaga samas suunas ning seega võimendavad seda. Nähtus on vastupidine diamagnetilisele ainele, mis välisesse välja asetatuna nõrgendab välist magnetvälja. Paramagnetilistel ainetel on suhteline magnetiline läbitavus suurem või võrdne ühega (st magnetiline vastuvõtlikkus on positiivne), seetõttu nad tõmbuvad magnetväljaga. Välise välja poolt indutseeritud magnetmoment on väljatugevusega lineaarne ja seetõttu suhteliselt nõrk.

Paaris elektronid peavad Pauli printsiibi kohaselt orbitaalile paiknema vastassuunaliste spinnidega, mistõttu nad vastastikku oma magnetväljad nullivad (joonis 2.7). Üksikute elektronide magnetmoment võib olla orienteeritud vabalt valitud suunas. Kui sellisele ainele rakendada välist magnetvälja, orienteeruvad need välise väljaga samas suunas ja võimendavad sellega magnetvälja.[9]



Joonis 2.7 Lihtsustatud paramagnetilise aine mudel[9]

2.8. Ferromagnetism

Ferromagnetism on baasmehhanism, millega teatud materjalid (näiteks raud) moodustavad püsिमagnetiteid või tõmbuvad magnetitega. Füüsikas eristatakse mitut erinevat tüüpi magnetismi. Ferromagnetism (koos ferrimagnetismiga) on kõige tugevamat tüüpi ja see on ainuke tüüp, mis tekitab küllalt tugevaid jõudusid, et neid tunda. Muud ained reageerivad nõrgalt paramagnetismi

ja diamagnetismi poolt tekitatud magnetilistele väljadele. Nende väljade jõud on nii nõrgad, et neid saab kindlaks teha ainult tundliku aparatuuriga laboratooriumis.

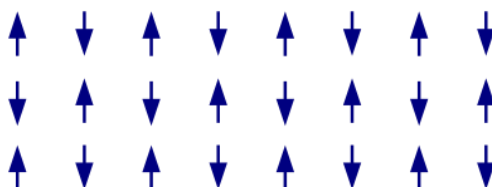
Igapäevane näide ferromagnetismist on külmkapimagnet, mida kasutatakse märkmete hoidmiseks külmkapi uksele. Magneti ja ferromagneetiku vaheline tõmme on "magnetismi esimene ilmne omadus antiikmaailmale ja meile tänapäeval"

Püsimagnetid (materjalid, mida saab magnetiseerida välise magnetvälja poolt ja mis püsivad magnetiseerunud pärast välise välja eemaldamist), on kas ferromagneetikud või ferrimagneetikud, nagu ka materjalid, mis nähtavalt nende poole tõmbuvad. Üksikud ained on ferromagneetikud. Neist tuntumad on raud, nikkel, koobalt ja suurem osa nende sulameid, mõned haruldaste muldmetallide ühendid ja mõned looduslikult esinevad mineraalid nagu magnetiseerunud magnetiit.

Ferromagnetism on väga tähtis tööstuses ja modernses tehnoloogias ning on aluseks paljudele elektrilistele ja elektromehaanilistele seadmetele nagu näiteks elektromagnetid, elektrimootorid, elektrigeneraatorid, transformatorid ja magnetsalvestuses nagu näiteks magnetofonid ja kõvakettad.[7]

2.9. Antiferromagnetism

Erinevalt ferromagneetikute valentselektronide magnetmomentid naaberelektronide omadega võrreldes vastassuunalised. Kui kõik aine aatomid on naabriga võrreldes vastassuunaliselt orienteeritud, siis on aine summaarne magnetmoment null ja aine antiferromagnet (Joonis 2.8). Antiferromagneetikud on haruldased, kui teistsuguste magnetiliste omadustega materjalid ja esinevad tavaliselt madalate temperatuuride juures. Kõrgemate temperatuuride puhul võivad antiferromagnetid näidata dia- ja ferrimagnetilisi omadusi.[4]

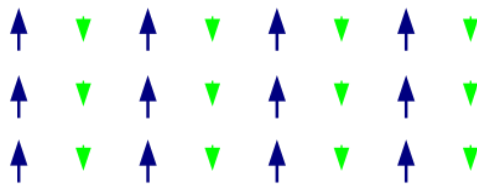


Joonis 2.8 Magnetmomentide joondumine antiferromagnetilises materjalis[4]

2.10. Ferrimagnetism

Füüsikas nimetatakse ferrimagnetiliseks materjali, milles esinevate osakeste magnetmomentid on vastassuunalised nagu antiferromagnetismis, kuid ferrimagnetites ei ole vastassuunalised

momentid võrdsed, seetõttu esineb spontaanne magneetumine (joonis 2.9). See nähtus esineb siis, kui osakesteks on erinevad materjalid või ioonid (näiteks Fe_2^+ ja Fe_3^+). [11]



Joonis 2.9 Magnetmomentide joondumine ferrimagnetilises materjalis [11]

3. MAGNETMATERJALID

Magnetilisteks materjalideks nimetatakse materjale millised magnetvälja toimel magneetuvad st. omandavad erilised omadused, milliseid nimetatakse magnetilisteks omadusteks. Neid materjale kasutatakse magnetahelates, millised on paljude elektriseadmete oluliseks osaks. Magnetahelatega on võimalik suunata mähise ümber voolu toimel tekkivat magnetvälja. Põhilisteks magnetilisteks materjalideks on raud, nikkel, koobalt ja mõned raua sulamid.

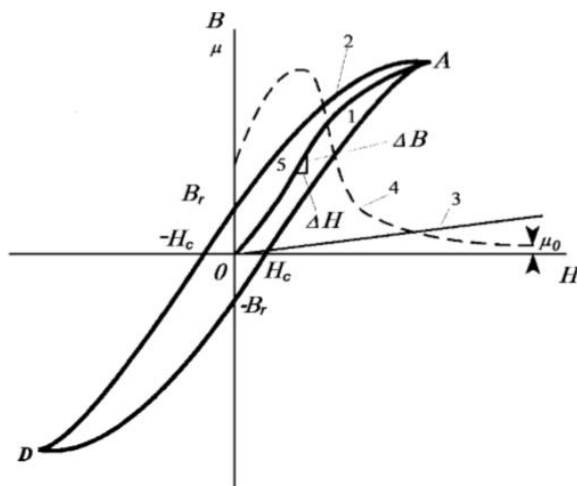
Peaaegu kõik magnetmaterjalid sisaldavad rauda (Fe). Magnetmaterjale liigitatakse pehmeteks ja kõvadeks. Pehmed magnetmaterjalid on suure magnetilise läbitavusega aga nendest ei saa valmistada püsimgneteid. Pehmed magnetmaterjalid sisaldavad põhiliselt rauda, räni, mangaani. Elektrotehniline teras sisaldab 4% räni, permalloi sisaldab 50% või isegi rohkem niklit. Pehmetest magnetmaterjalidest valmistatakse trafode südamikke, elektrimootorite staatoreid- rootoreid, alalisvoolumasinate ankruid jne. Kõvad magnetmaterjalid magneetuvad tugevasti ja säilitavad püsimgneti omadused. Tugevad püsimgnetid valmistatakse sulamitest, mis peale raua sisaldavad (8...15%) alumiiniumi, (15...30%) niklit, (8...12%) vaske, (1...24%) koobaltit. Kasutatakse ka materjale mis rauda ei sisalda näiteks koosnevad Mn, Cu ja Si või Cr ja Pt. [1]

3.1. Magnetmaterjalide magnetilised omadused

Aine magnetiliste omaduste põhjustajateks on laengute liikumised aine elementaarosakestes (elementaarvoolud, ka elementaarosakeste pöörlemine oma telje ümber), mis tekitavad neis osakestes magnetmomente.

Praktikas kasutatakse magnetmaterjalidena ferro- ja ferrimagneetikuid (ferriite), mis koosnevad spontaanselt magneetunud piirkondadest – domeenidest, kus kõik magnetmomentid on orienteerunud paralleelselt. Kuid välise magnetvälja puudumise korral on need domeenid orienteerunud kaootiliselt. Välise magnetvälja rakendamisel need materjalid magneetuvad, st. et väikestel magnetväljatugevustel välise välja suhtes väiksemat nurka omavad domeenid kasvavad

(nende piirid nihkuvad suurenemise suunas), väljatugevuse suurenedesaga hakkavad pöörduma ka teiste domeenide magnetmomendid välise välja suunas. Sõltuvalt materjali koostisest ja struktuurist on domeenide pööramiseks vajalik teatud tugevusega väline magnetväli. Magnetmaterjalides tekkiva magnetilise induktsiooni B (magnetvälja tiheduse) sõltuvust rakendatud välise magnetvälja tugevusest H iseloomustab magneetimiskõver $B=f(H)$.



Joonis 3.1 Magneetimiskõver ja hüstereesisilmus[6]

1 – almagneetimiskõver, 2 – hüstereesisilmus, 3 – vaakumi $B=f(H)$, 4 – magnetilise läbitavuse kõver, 5 – magneetimiskõvera maksimaalse tõusu (materjali maksimaalse magnetilise läbitavuse) punkt.

Magneetumise intensiivsust sõltuvalt rakendatud magnetvälja tugevusest iseloomustab absoluutse magnetilise läbitavuse μ_0 kõver (Joonis 3.1, kõver 4), mis näitab, kui suuri magnetilise induktsiooni B muutusi (ΔB) tekitab teatud väljatugevuse muutus (ΔH). [6]

Valem 3.1 Absoluutne magnetiline läbitavus

$$\mu_a = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad [\text{H/m}] \quad (3.1)$$

Magnetiline läbitavus iseloomustab materjali magneetumist: mida suurem on μ väärtus, seda kergemini magneetub materjal ja mida väiksem ta on seda raskemini magneetub materjal. Magnetiline läbitavus iseloomutab aine magneetumist võrreldes vaakumiga. μ väärtuse poolest on kolme liiki materjale. [1]

1. diamagneetikutel $\mu < 1$
2. paramagneetikutel $\mu > 1$
3. ferromagneetikutel $\mu \gg 1$.

Vaadeldes magneetimiskõverat, näeme, et magnetväljatugevuse suurenedes kasvab induktsioon esialgu aeglasemalt, edasi aga kasv kiireneb. See kasvu kiirus ongi materjali magnetiline läbitavus.

Järsk muutus kõveral näitab kiiret küllastumist. Järsu muutumise piirkonda nimetatakse magneetimiskõvera põlveks. Magneetimiskõvera ligikaudu horisontaalset osa nimetatakse küllastuspiirkonnaks.

Magnetväljatugevuse suurendamisel väheneb pidevalt uute pöörduvate domeenide hulk, sest suurem osa neist on juba välise välja sihis pöördunud. Magneetimiskõvera punktis A on pöördunud juba kõik võimalikud domeenid. Sellist olukorda nimetatakse materjali magnetiliseks küllastuseks. Vaakumis on sõltuvus $B=f(H)$ sirge, tõusuga $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} = 1,25 * 10^{-6}$ H/m, (Joonis 3.1), mida nimetatakse magnetiliseks konstandiks. Praktikas kasutatakse materjali magnetilise läbitavuse hindamiseks tavaliselt suhtelist magnetilist läbitavust:

Valem 3.2 Suhteline magnetiline läbitavus

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} \quad (3.2)$$

kus μ_a – absoluutne magnetiline läbitavus;

μ_0 – magnetiline konstant, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} = 1,25 * 10^{-6}$ H/m.

Kui hakata küllastusolukorras väljatugevust vähendama, ei vähene induksioon algmagneetimiskõverat mööda, vaid kulgeb sellest kõrgemal, st. domeenide tagasipöördumine algolukorda toimub aeglasemalt. Kui väljatugevus on muutunud nulliks, on säilinud teatud jääkinduksioon B_r , mille kaotamiseks on vajalik teatud vastassuunaline magnetväli tugevusega H_c , mida nimetatakse koertsitiivjõuks. Vastassuunaline magneetumine toimub kõvera 2 järgi kuni vastassuunalise küllastumiseni punktis D. Materjali korduval übermagneetimisel saadakse nn. hüstereesisilmus, mille pindala on võrdeline übermagneetimisel tekkivate energiakadudega (valem 3.5), hüstereesikadudega (valem 3.3). Vahelduvas magnetväljas tekivad lisaks hüstereesikadudele ka pöörisvoolukaod (valem 3.4), mis tekivad magnetmaterjalis indutseeritud pöörisvooludest.

Valem 3.3 Hüstereesikaod

$$P_h = k_h f B_m^n \text{ [W/kg]} \quad (3.3)$$

kus k_h – hüstereesi kadude koeffitsent, mis sõltub magnetmaterjali liigist

f – sagedus [Hz];

B_m – magnetvälja induksiooni amplituud;

n – astmenäidik.

Valem 3.4 Pöörisvoolukaod

$$P_p = k_p f^2 B_m^2 \text{ [W/kg]} \quad (3.4)$$

kus k_p – pöörisvoolu kadude koeffitsent, mis sõltub magnetmaterjali liigist

f – sagedus [Hz];

B_m – magnetvälja induktsiooni amplituud.

Valem 3.5 Energiakaod südamikus

$$P_e = P_h + P_p \quad (3.5)$$

Mida suurem on materjali elektriline eritakistus, seda väiksemad on pöörisvoolukaod. Teatud temperatuurist, nn. Curie täpist kõrgemal temperatuuril domeenid kaovad ja aine kaotab oma ferromagnetilised omadused. Magnetmaterjale võib liigitada põhiliselt kahte gruppi: pehmemagnetmaterjalid ja kõvamagnetmaterjalid. [6]

3.2. Magnetiliselt pehmed materjalid

Magnetiliselt pehmetel materjalidel on suur alg- ja maksimaalne magnetiline läbitavus ja väike koertsitiivjõud. Need materjalid magneetuvad ja demagneetuvad kergesti ja neile on iseloomulik väikesed hüstereesikaod, millele vastab kitsas hüstereesisilmus.

Magnetiliste parameetrite väärtused sõltuvad magnetiliselt pehmetel materjalidel aine keemilisest puhtusest ja kristallvõre kujunemisest. Mida vähem on magnetiliselt pehmetes materjalides lisandeid, seda paremad on nende magnetilised parameetrid. Nimetatud põhjustel üritatakse eemaldada materjalist enamkahjulikud lisandid nagu süsinik, fosfor, väävel, lämmastik ja mitmesugused oksiidid. Samaaegselt püütakse mitte deformeerida kristallvõret. Magnetiliselt pehmeid materjale kasutatakse trafode südamikena, elektrimasinate ja releede magnetahelates jmt. [1]

Pehmemagnetmaterjalidest on tähtsaim puhas raud, mida kasutatakse ka lähtematerjalina mitmesuguste teiste magnetmaterjalide valmistamisel. Rauda magnetilised omadused sõltuvad raua puhtusest ja töötlemisviisist (tabel 3.1). Puhta raua kasutamist vahelduvvoolusüdamikes piirab tema suhteliselt väike eritakistus, mis põhjustab suuri pöörisvoolukadusid.

Seetõttu vahelduvvoolusüdamikud (elektrimasinad, trafod, kontaktorid jne.) valmistatakse pöörisvoolukadude vähendamiseks elektrotehnilisest lehtterasest (trafoplekist). Materjali eritakistuse suurendamiseks kasutatakse legeerivaid lisandeid – räni, (tabel 3.2), molübdeeni, kroomi. [6]

Tabel 3.1 Erineva puhtuse ja töötlemisviisiga raua magnetilised omadused[6]

Materjal	$\mu_{\text{maks}}, \text{H/m}$	Koertsitiivjõud $H_c, \text{A/m}$
Tehniliselt puhas raud	7000	64
Elektrolüütraud	15000	28
Karbonüütraud	21000	6,4
Vesinikus töödeldud raud	2000000	3,2
Puhta raua monokristall	1430000	0,8

Tabel 3.2 Raua omaduste sõltuvus ränisisaldusest[6]

Raua ränisisaldus, %	Keskmine tihedus, kg/dm^3	Keskmine eritakistus, $\mu\Omega\text{m}$
0...0,4	7,85	0,14
0,4...0,8	7,82	0,17
0,8...1,8	7,80	0,25
1,8...2,8	7,75	0,40
2,8...3,8	7,65	0,50
3,8...4,8	7,55	0,60

3.2.1. Elektrotehniline lehtteras

Elektrotehniline lehtteras on väikese süsinikusaldusega (süsinikku mitte üle 0,04%) teras millesse on viidud lisandina (0.8...4,8%) räni. Räni lisand suurendab terase eritakistust ja see omakorda vähendab pöörisvoolukadusid. Räni suurendab ka terase kristalle, millega kaasneb kõigi magnetiliste omaduste paranemine. Suur räni sisaldus muudab aga terase hapramaks mis takistab stantsitud detailide valmistamist ja seepärast on ränilisandi praktiliseks piiriks 4.8%. Elektrotehnilist terast valmistatakse lehtedena ja lindina. Lehti valmistatakse kas kuum- või külmaltsimise meetodil. Vastavalt kasutatud meetodile on seetõttu olemas kuumvaltsitud ja külmaltsitud elektrotehnilist terast.

Lindina valmistatakse südamike materjali külmaltsituna. Südamikud valmistatakse nii, et ühtiksid magnetvoo ja valtsimise suund, kuna valtsimise sihis on materjali magnetilised omadused paremad.

Trafo südamikes kasutatakse reeglina külmaaltsitud terast, elektrimasinate magnetahelates aga enamasti kuumaltsitud terast. Elektrotehniline lehtteras on laialt levinud odav materjal, mida valmistatakse paksusega (0,05 ...1 mm). Elektrotehnilise lehtterase parameetrid on $\mu = 300...900$, $\mu_{\text{maks}} = 6000...35000$, $H_C = 10...30$ A/m. Seejuures on külmaaltsiterase omadused paremad kui kuumaltsiterasel.[1]

3.2.2. Permalloi

Permalloi on väga heade magnetiliste parameetritega raua ja nikli sulam, mis sisaldab 36...80 % niklit. Peale selle lisatakse omaduste parendamiseks veel molübdeeni, kroomi või vaske. Permalloid valmistatakse mitmeid sorte mis jagatakse kahte gruppi: madala niklisisaldusega, kus on niklit kuni 36...50% ja kõrge niklisisaldusega, kus on niklit 60...80%.

Permalloi magnetilised parameetrid on orienteeruvalt järgmised: $\mu = 2000...25000$; $\mu_{\text{maks}} = 50000...200000$; $H_C = 0,7...9$ A/m.

Permalloi on küll väga heade magnetiliste omadustega materjal, kuid ta on tehnoloogiliselt väga tundlik ja ka kallis materjal, mistõttu teda kasutatakse siis kui odavamad võimalust pole. Tehnoloogilised probleemid tulenevad sellest, et mehaanilisel töötlemisel (näiteks stantsimisel) magnetilised parameetrid järsult halvenevad ja nendetaastamiseks on vaja küllalt keerulist ja pikka termilist töötlemist.

Madala niklisisaldusega permalloid kasutatakse drosselite ja väiketrafode südamikena kui on oluline väikesed gabariidid ja mass. Suure niklisisaldusega permalloid kasutatakse helisagedusest kõrgematel sagedustel ja ka magnetiliste varjetena. Permalloi omadused on stabiilsed temperatuurivahemikus -60...+60°C.[1]

3.2.3. Alsiferid

Alsiferid on raua, alumiiniumi ja räni sulamid, kus alumiiniumi on 5,5...13%, räni 9...10%, ülejäänud raud. Alsiferide magnetilised parameetrid on järgmised: $\mu = 6000...7000$; $\mu_{\text{maks}} = 30\ 000...35\ 000$; $H_C = 2,2$ A/m.

Alsifere kasutatakse valatud südamike valmistamiseks, mille töösagedus ei ületa 20 kHz ja kui detaili seinapaksus ei ole väiksem kui 2 mm, kuna alsiferid on mehaaniliselt haprad.[1]

3.3. Magnetiliselt kõvad materjalid

Magnetiliselt kõvadel materjalid on suure koertsitiivjõuga ja suure jääinduktsiooniga. Neid materjale on raske magneetida ja kui nad on magneeditud, siis võivad nad säilitada magneetija energiat mitu aastat, st. neid kasutatakse püsimagneetites.

Püsिमagnetі magnetvoog aja jooksul väheneb. Sellist nähtust nimetatakse magnetі vananemiseks. Kui vananemine tekib vibratsiooni, löökide või järskude temperatuuri muutuste toimel, siis on võimalik püsिमagnetі omadusi korduva magneetimisega taastada. Kui aga vananemise põhjuseks on aine struktuuri muutused, siis ei ole võimalik püsिमagnetі omadusi taastada. On ilmne, et magnetiliselt kõvad materjalid peavad olema võimalikult väikese vananemisega.

Magnetiliselt kõvu materjale on mitmeid, millistest enamlevinud on suure süsinikusisaldusega terased, raud-alumiinium-nikkel sulamid, sulamid muldmetallide (iitrium, samaarium) ning väärismetallidega (plaatina, hõbe) ja metallkeraamilised materjalid nende baasil.[1]

3.3.1. Suure süsinikusisaldusega terased

Suure süsinikusisaldusega terased on odavad püsिमagnetite materjalid mille süsinikusisaldus on 0,9...1,1%. Omaduste parendamiseks lisatakse terasele kroomi, volframit või koobaltit. Vastavalt kasutatavale lisandile nimetatakse neid kroom-, volfram-, või koobaltteraseks.

Süsinikteraste omadused on järgmised – kroomterastel $B_r = 0,95 \text{ T}$; $H_c = 4800 \text{ A/m}$, volframterastel $B_r = 1 \text{ T}$; $H_c = 4800 \text{ A/m}$, koobaltterastel $B_r = 0,8...0,9 \text{ T}$; $H_c = 11\ 000...13\ 000 \text{ A/m}$. [1]

3.3.2. Raud-nikkel-alumiinium sulamid

Raud-nikkel-alumiinium sulamid on legeeritud koobalti, titaani või niobiumiga. Nad on omadustelt oluliselt paremad: $B_r = 0,5...1,4 \text{ T}$; $H_c = 40\ 000...150\ 000 \text{ A/m}$. Nende materjalide puuduseks on tänu haprusele ja kõvadusele raskesti mehaaniliselt töödeldavad, kuna neid saab töödelda ainult lihvimisega.[1]

3.3.3. Metallkeraamilised püsिमagnetid

Metallkeraamilised püsिमagnetid võivad olla väga väikesed ja täpsete mõõtmetega. Metallkeraamilised materjalid saadakse sobivate metallide (raud, nikkel, alumiinium, koobalt) pulbritest millistest pressitakse tooted (magnetid) ja paagutatakse järgnevalt kõrgel temperatuuril. Komponentid jahvatatakse pulbriks osakeste mõõtmeteni 10...75 μm ja seejärel pressitakse tooted rõhuga 1..2 MPa, järgneb paagutamine inertgaasi keskkonnas või vaakumis temperatuuril 1100...1300°C. Valminud magnetid karastatakse jahutatades määratud kiirusega. Koobaltit sisaldavad magnetid töödeldakse termiliselt samaaegse magnetvälja toimega, mille tulemusel paranevad magnetilised omadused.

Valmis kujul on keraamilised magnetid mõnevõrra poorsed (2...5%) ja seetõttu on nende omadused mõnevõrra sulamitest halvemad. Eeliseks on taoliste magnetite täpsed mõõtmed ja hea pinna siledus. Vajadusel saab keraamilisi magneteid töödelda ainult lihvimisega. [1]

3.4. Ferriidid

Ferriidid on magnetsüdamikud mis valmistatakse pulbrite segudest paagutamise ga kõrgel temperatuuril. Ferriidid võivad olla nii magnetiliselt pehmed kui ka kõvad materjalid.

Ferriidi nimetuse määrab kahe või ühevalentne metall, mille oksiid kuulub ferriidi koostisse. Nii näiteks kui ferriidi koostisse kuulub tsinkoksiid ZnO, siis nimetatakse seda ferriiti tsinkferriidiks, kui aga lisatavaks oksiidiks on NiO, siis nikkelferriidiks jne.

Parimate magnetiliste omadustega on keerulised ehk segatud ferriidid, mis kujutavad endast ühe lihtsa ferriidi tahket lahust teises. Nii näiteks annab tsinkja nikkelferriidi tahke lahus nikkel – tsinkferriidi.

Ferriitsüdamikke valmistatakse keraamika tehnoloogiaga st. sobivas vahekorras võetud metallide oksiidid jahvatatakse kuulveskites ja seejärel pressitakse pulbriest briketid, millised allutatakse termilisele töötlemisele. Paakunud briketid jahvatatakse uuesti ja lisatakse plastifikaatorit, milleks võib olla näiteks plüvinüülpürituse lahus. Saadud massist pressitakse tooted (mitmesuguse kujuga südamikud) millised paagutatakse temperatuuril 1000...1400 °C. Saadakse haprad tumehallid või mustad tooted milliseid saab töödelda ainult lihvimisega.

Magnetiliselt pehmete materjalidena on levinud nikkel-tsink, mangaan-tsink ja liitium-tsink ferriidid.

Nikkel-tsink ferriitidel: $\mu = 80..2400$; $\mu_{maks} = 850..3000$; $H_c = 2054$ A/m, $B_r = 0.11..0,29$ T.

Mangaan-tsinkferriitidel: $\mu = 550..25000$; $\mu_{maks} = 2000..35000$; $H_c = 2..24$ A/m; $B_r = 0.09..0,13$ T.

Ferriitide olulisemaks eriomaduseks on suur eritakistus, mille poolest ferriidid kuuluvad eritakistuse poolest pooljuhtide hulka ja tänu sellele omadusele on ferriidid kasutatavad märksa kõrgematel sagedustel kui elektrotehniline teras kuna ferriitides on tänu suurele eritakistusele väikesed pöörivoolu kaod.

Magnetiliselt kõvadest ferriitidest on levinumad baariumferriidid, milliseid nimetatakse ka baariummagnetiteks. Baariumferriitidel $H_c = 125...220$ kA/m, $B_r = 0,2...0,38$ T.

Nii nagu teised magnetilised materjalid nii säilitavad ka ferriidid oma magnetilisi omadusi Curie temperatuurini, mis sõltuvalt ferriidid liigist võib olla küllalt erinev, vahemikus 70...450 °C. Ferriitide takistuse temperatuuritegur on sarnaselt pooljuhtidega negatiivne. Seega temperatuuri tõustes nende takistus väheneb ja pöörivoolu kaod suurenevad.[1]

4. 3D PRINTITUD MAGNETMATERJALIDE MAGNETOMADUSTE UURIMINE

4.1. Uurimuse üldkirjeldus

Antud töös oli uuritud 3D printitud materjalide (punkt 4.3) magnetilised omadused. Need olid erinevaga ränni sisaldusega elektritehnilised terase, mis olid printitud kahes erinevates keskkondades, kasutades SLM-50 3D printerit (joonis 4.4). Uurimust võib jaotada kaheks peamiseks osaks. Esimese osa käigus olid vaadeldud standardse parameetridega printitud katsekehade magnetilised omadused. Teine osa oli suunatud optimeeritud parameetridega printitud katsekehade magnetiliste omaduste määramisele ning täiendamisele. Selleks oli kasutatud 3D printeri printimise parameetrite optimeerimine, metallpulbri kuumenemine ning katsekehade lõõmutamine.

Katsekehade magnetiliste omaduste määramiseks oli vaja neid ettevalmistada mõõtmisteks. Selleks oli vaja neist rõngaspooli valmistada. Peale seda mähitud toroidid olid ühendatud katsekeemiga (joonis 4.8). Sissendvoolu $I(A)$ ja väljundpingete $U(V)$ väärtuste saamiseks oli kasutatud analüüsimissüsteem Dewetron DEWE2-M1 (joonis 4.13).

Esimese nelja katsekehade põhjal oli tehtud kokkuvõtte erinevate 3D materjalide magnetiliste omaduste sõltuvusest ränni sisaldusest. See töö on esimese uurimuse osa. Peale seda oli uuritud 3D metallmaterjalide magnetiliste omaduste täiendamise viise nagu 3D printeri printimise parameetrite muutmine ja kehade lõõmutamine ahjus. Selleks oli kasutatud katsekehad 5,6. Saadud tulemuste põhjal on tehtud lõplik analüüs (peatükk 4.4.2)

Katsetused olid tehtud sagedustel 1, 10 ja 50 Hz. Saadud väärtuste põhjal olid tehtud magnetvoogu (valem 2.7), magnetilise tiheduse (valem 2.6) ning magnetvälja tugevuse (valem 2.5) arvutused. Arvutatud väärtuste abil olid ehitatud MS Excel programmis hüsteres silmused (joonised 4.14-4.19).

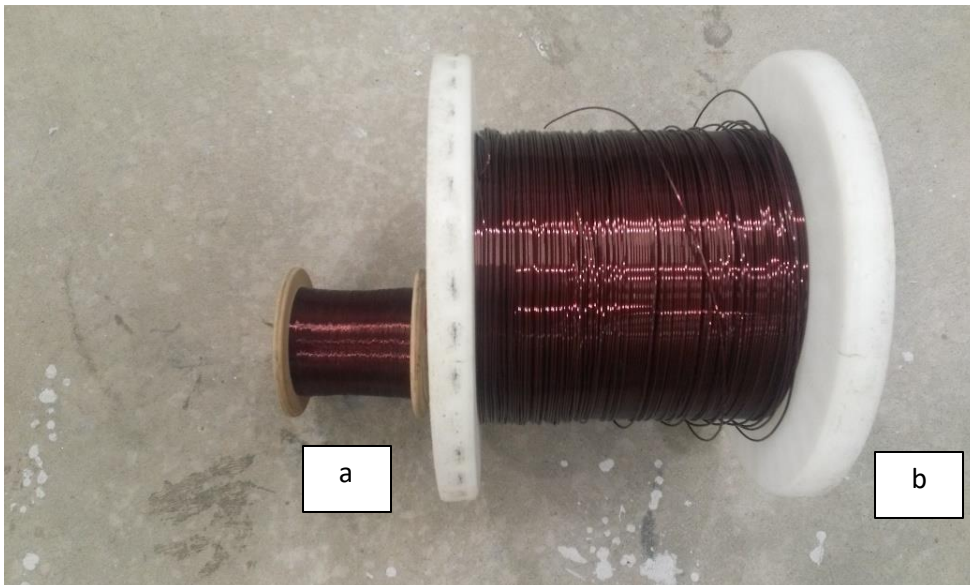
Detalselt uurimuse kohta on kirjutatud peatükis 4.2.



Joonis 4.1 Toroidi südamik enne ja pärast töötlemist (FeSi rõngas)



Joonis 4.2 Mähitud toroid (6,5% rännisisaldusega FeSi)



Joonis 4.3 Vasetraadid

- a) Sekundaaraarmähises kasutatud traat, $d = 0,22\text{mm}$;
- b) Primaarmähises kasutatud traat, $d = 1,13\text{mm}$.

4.2. Katsekehade printimise protsessi kirjeldus

4.2.1. Printimise protsess

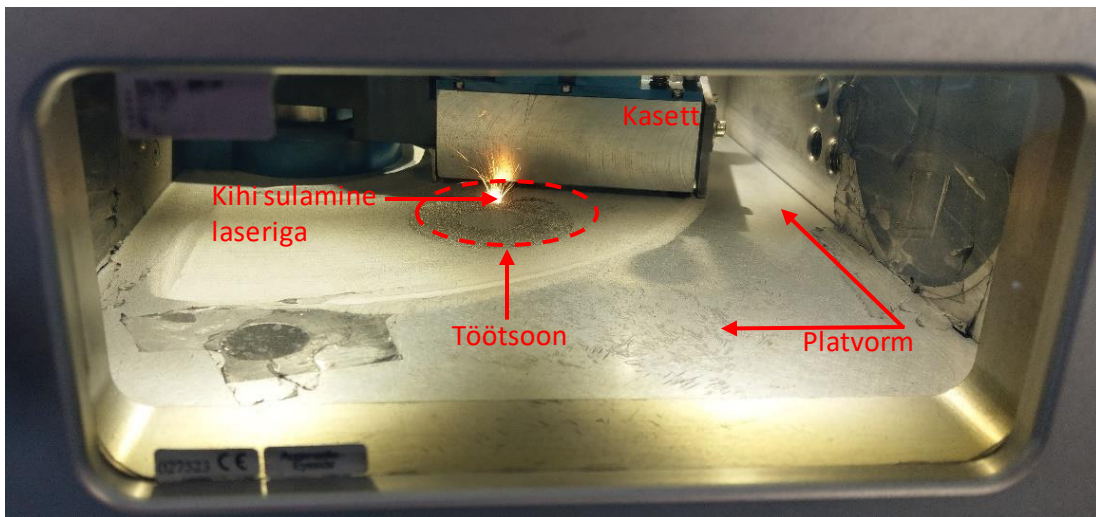
Katsekehade valmistamiseks oli kasutatud Tallinna Tehnikaülikooli 3D printer Realizer SLM-50(joonis 4.4) võimsusega 120W, mis asub U-05B korpuses asuvas laboris. Printer kasutab printimiseks SLM (Selective Laser Melting) tehnoloogiaat. Detailide printimine toimub laaditud 3D mudeli alusel. Printimise materjalideks võivad olla: roostevaba teras ja alumiinium, hõbe ning Fe, Al, Co baasil sulamid. Printimise parameetreid nagu laseri võimsust ja laseriga sulamise kiirust saab seadistada printeri tarkvara abil. Samuti on võimalik teha pulbri kuumutamist temperatuuril kuni 200°C.



Joonis 4.4 3D printer Realizer SLM-50

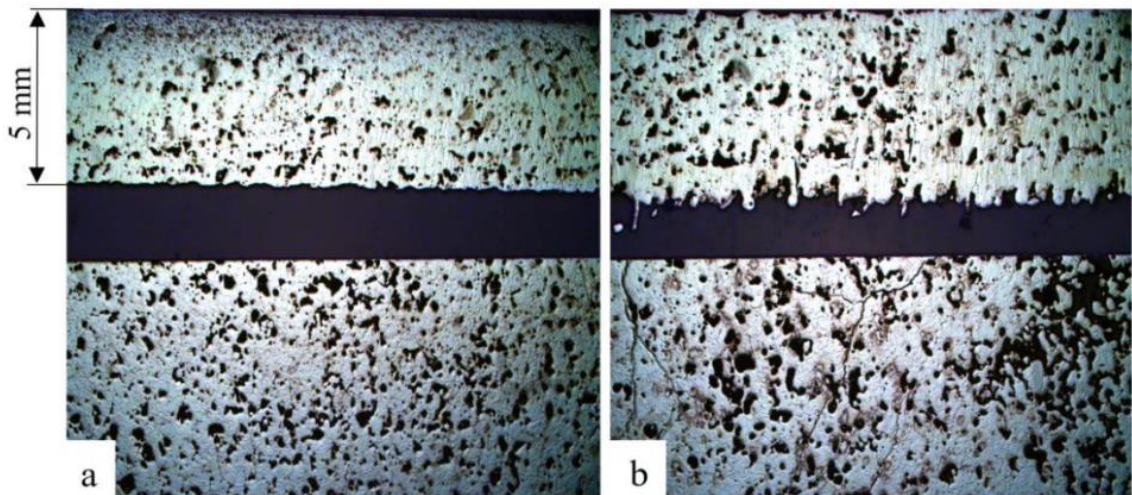
SLM(Selective Laser Melting) – metall pulbri kihiline keevitamine. SLS-i(Selective Laser Sintering) tehnoloogiaga sarnane printimis meetod. Vahe on selles, et SLM-i kasutusel laser sulab materjali täielikult, et saada monoliitse detaili. SLS-i kasutusel materjali sulamine toimub piisavalt materjali paagutamisele.

Tööpõhimõtte on selles, et pulbri tüübist sõltuvalt platvormile printitakse detaili. Pulbrit pannaakse töökasti sees asuva kasseti sisse. Kasutatud printeri töötsoon on ringikujuline, mõõtmetega D75XH75mm. Enne protsessi alustamist töötsooni kambri sees luuakse inertgaasiga täidetud gaasikeskkonda. See on vajalik, et printimise protsessi käigus meaterjal ei oksüdeeruks. Gaasikeskkonna tekitamine toimub poolautomaatselt ja vajab operatori juhendamist printeri tarkvara abil.



Joonis 4.5 Realizer SLM-50 printeri töö kamber

SLM printimise tehnoloogia peamiseks probleemiks on see, et printimise käigus materjali sees tekivad sissepinged, mis põhjustavad printitud kehade ehituse struktuuri halvenemist. See on põhjustatud sellega, et metallpulbri sulamise käigus tekivad keha struktuuri sees väikesed õhuruumid ja mikropraod (joonis 4.6), mis tugevasti mõjutavad magnetilisi omadusi. Defektide tekitamine oluliselt sõltub printimise parameetritest. See on selle uurimustöö üheks peamiseks ülesanneks – leida optimaalseid printimise parameetreid, mille juures katsekehade struktuur ja magnetilised omadused on kõige paremad. Katsekehade printimise parameetrid on toodud tabelis 4.1.



Joonis 4.6 Katsekehade struktuur[13]

- a) 3% räni sisaldusega rauasulam;
- b) 6,5% räni sisaldusega rauasulam.

Tabel 4.1 Katsekehade printimise parameetrid

Katsekeha nr.	Laseri võimsus, W		Laseri kiirus, m/s		Kuumendus
1-4,7	72		1		-
5	50	72	1	0,5	+
6	50	72	1	0,75	+

Töö käigus mitte kõike katsekehasid õnnestunud välja printida. Mõned kehad olid, valesti valitud printimise parameetrite tõttu, defektsed(joonis 4.7). See oli põhjustatud sellega, et metallpulber ei jõudnud täiesti sulama, seetõttu tekisid ebaühtlased kihid.



Joonis 4.7 Defektse keha välise struktuuri näidis

4.2.2. Katsekehade Andmed

Kõik katsekehad olid printitud rõngaste kujul(joonis 4.1), mille suurused on : väline diameeter = 60 mm, sisene diameeter = 50 mm ja kõrgus $h = 5$ mm.(joonis 4.4) Raua katsekeha oli sama sise ja välis diameetriga ning kõrgusega $h = 3,2$ mm.(joonis 4.5). Katsekehad nr. 1-4 olid printitud standardse parameetritega, millest katsekeha nr. 1,2 olid 3% räni sisaldusega elektritehnilised sulamid ning kehad nr. 3,4 olid 6,5% räni sisaldusega sulamid. Kehad nr. 5,6 olid optimeeritud printimise parameetritega ja 6,5% räni sisaldusega. Viimane katsekeha oli puhas raud (Fe).

Selleks, et uurida materjalide magnetilisi omadusi oli vaja paigutada katsekehad vahelduva magnetvälja mõju alla. Selleks oli vaja mähkida rõngasid isoleeritud vasetraadiga, teiste sõnadega teha rõngaspooli ehk toroide (joonis 4.2). Primaarmähised kujutavad ennast paralleelselt mähitud vasetraate paksusega 1,13 mm (joonis 4.3.b) ja sekundaarmähises oli vasetraat paksusega 0,2 mm (joonis 4.3.a). Räni sisaldavate katsekehade mähistes oli 200 keerdu primaaris ja 100 keerdu sekundaaris. Puhta raua mähised olid sellised: 100 keerdu primaaris ja 50 keerdu sekundaaris. Rohkem andmeid on toodud tabelis 4.2.

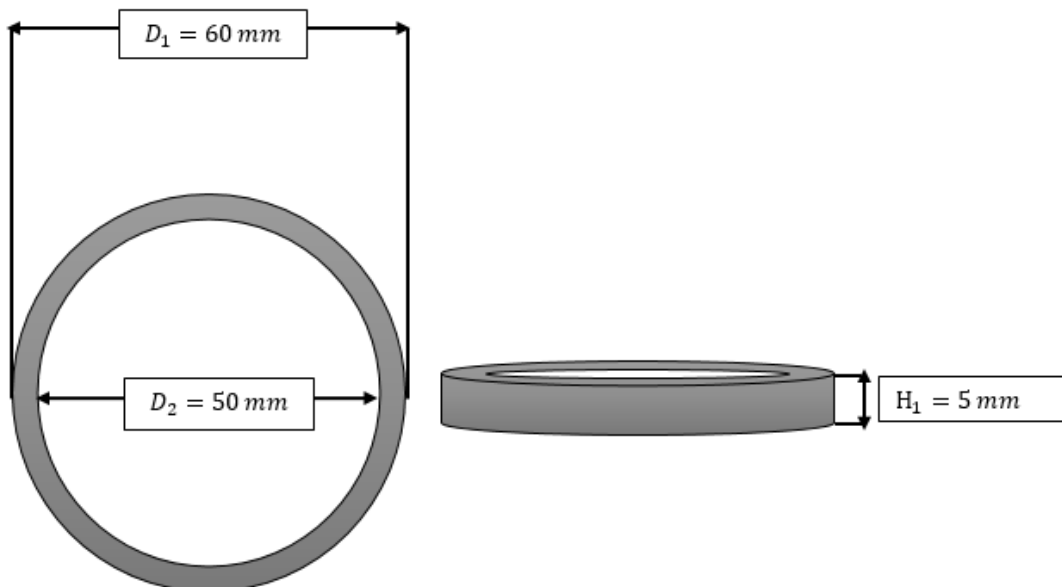
Tabel 4.2 Katseandmed

Primaarmähise keerdude arv N_1	200
Primaarmähiste skeem	paralleelne
Sekundaarmähise keerdude arv N_2	100
Sagedus f , Hz	1, 10, 50
Maksimalne pinge V_{\max} , V	230
Maksimaalne vool I_{\max} , A	25
Voolu määrav shunt	15A, 75mV takistusega shunt
Primaarmähise traadi diameeter, mm	1,18
Sekundaarmähise traadi diameeter, mm	0,2

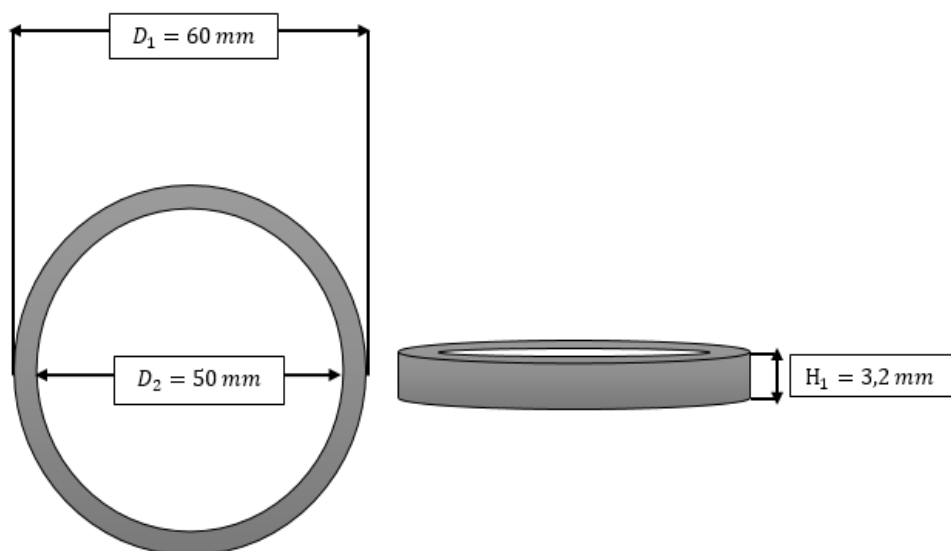
Katsekehade nimikiri:

1. 3 % räni sisaldusega FeSi, prinditud argoni keskkonnas;
2. 3 % räni sisaldusega FeSi, prinditud lämmastikku keskkonnas;
3. 6,5 % räni sisaldusega FeSi, prinditud argoni keskkonnas;
4. 6,5 % räni sisaldusega FeSi, prinditud lämmastikku keskkonnas;
5. 6,5 % räni sisaldusega FeSi, praoga, optimeeritud printimise parameetridega;
6. 6,5 % räni sisaldusega FeSi, optimeeritud printimise parameetridega;
7. Puhas raud(Fe).

Katsekehade mõõtmised:

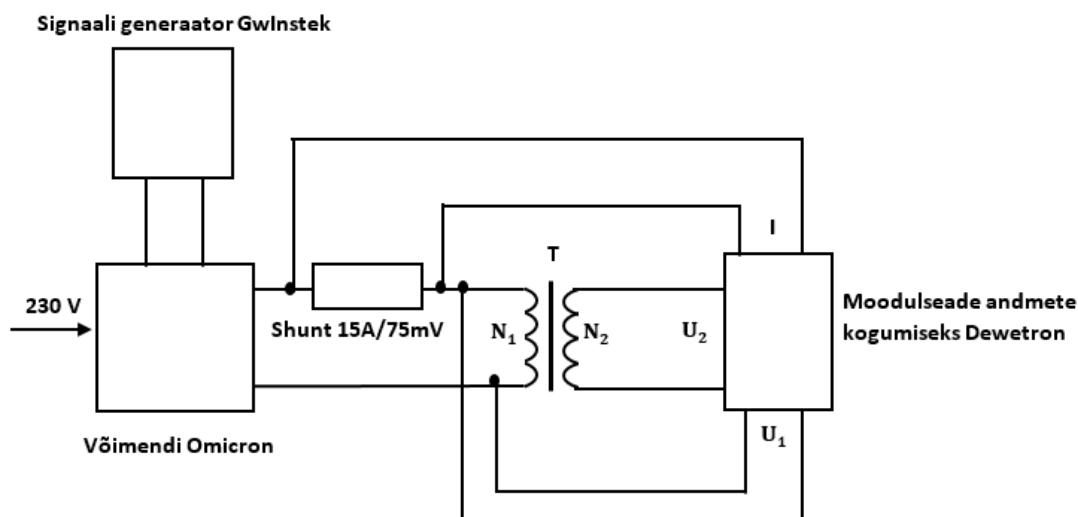


Joonis 4.8 Katsekehade nr.1-6 mõõtmised



Joonis 4.9 Katsekeha nr.7 mõõtmised

4.2.2. Katseskeem



Joonis 4.10 Katsestendi lihtsustatud skeem

4.2.3. Katseskeemi elementide seletus

Signaali generaator GwInstek SFG -2120 (joonis 4.11)

Signaali generaator oli kasutatud elektrilise signaali sagedusega 1, 10 ja 50 Hz loomiseks. Samuti seade oli kasutatud, et reguleerida voolu.

Võimendi Omicron CMS 356 (joonis 4.12)

Seade Omicron CMS 356 oli kasutatud elektrilise signaali pinge ja voolu võimendamiseks.

Moodulseade Dewetron DEWE2-M18 (joonis 4.13)

Seade Dewetron DEWE2-M18 oli kasutatud põhiandmete kogumiseks. Põhiandmete hulka kuuluvad: sisse- ja väljund pinged U_1 , U_2 ning vool I .



Joonis 4.11 Signaali generaator GwInstek SFG-2120



Joonis 4.12 Võimendi Omicron CMS 356



Joonis 4.13 Moodulseade Dewetron DEWE2-M

4.3. Arvutused

Tehtud arvutused olid :

- Toroidi magnetvoogu arvutamine (valem 2.5);
- Magnetvälja tiheduse arvutamine (valem 2.6);
- Magnetvälja tugevuse arvutamine (valem 2.7).

Magnetvoogu, magnetvälja tiheduse ja tugevuses väärtused ei ole pandud ükski tabelitesse, kuna andmete hulk on liiga suur.

4.3.1. Arvutuste näidised

Näidis arvutused on tehtud 3% räni sisaldusega FeSi katsekeha kogutud andemete põhjal.

Toroidi ülekandesuhe arvutamise näidis:

Valemi 2.8 järgi:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1(V)}{U_2(V)} = \frac{200}{100} = \frac{1,027}{0,504} = 2,04$$

Valemist 2.8 tuleneb sekundaarmähise keerdude arv N_2 võrdub:

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} N_1 = \frac{0,504}{1,027} * 200 = 98,15$$

Toroidi magnetvoogu arvutamise näidis:

Valemi 2.7 järgi toroidi magnetvoog võrdub:

$$\varphi_n = \int_{t_1}^{t_2} \text{edt} = (t_2 - t_1) \left(\frac{(v_2 + v_1)}{2} \right) + (\varphi_{n-1});$$

$$\varphi_1 = \int_0^{0,0001} \text{edt} = (0,0001 - 0) \left(\frac{(0,000218 + (-0,000495))}{2} \right) + 0 = 0,1385 * 10^{-7} \text{ Wb}$$

Magnetvälja tiheduse arvutuse näidis:

Valemi 2.6 järgi magnetvälja tihedus võrdub:

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int_t v(t) dt \text{ [T]};$$

Tegemist on rõngaga, seepärast südamikku ristlõige pindala S võrdub:

$$S = \frac{H_1}{1000} \left(\frac{D_1 - D_2}{2} \right) = \frac{5}{1000} \left(\frac{60 - 50}{2} \right) = 0,25 * 10^{-4} \text{ m}^2;$$

Pannes südamikku ristlõige pindalat ja valemist 2.7 saadud magnetvoogu valemisse 2.6 saame:

$$B = \frac{1}{100 * 0,25 * 10^{-4}} * 0,1385 * 10^{-7} = 1,31 \text{ T};$$

Magnetvälja tugevuse arvutamise näidis:

Valemi 2.5 järgi magnetvälja tugevus võrdub:

$$H = \frac{IN_1}{l} \text{ A/m};$$

Tegemist on rõngaga, seega magnetahela keskmine pikkus on:

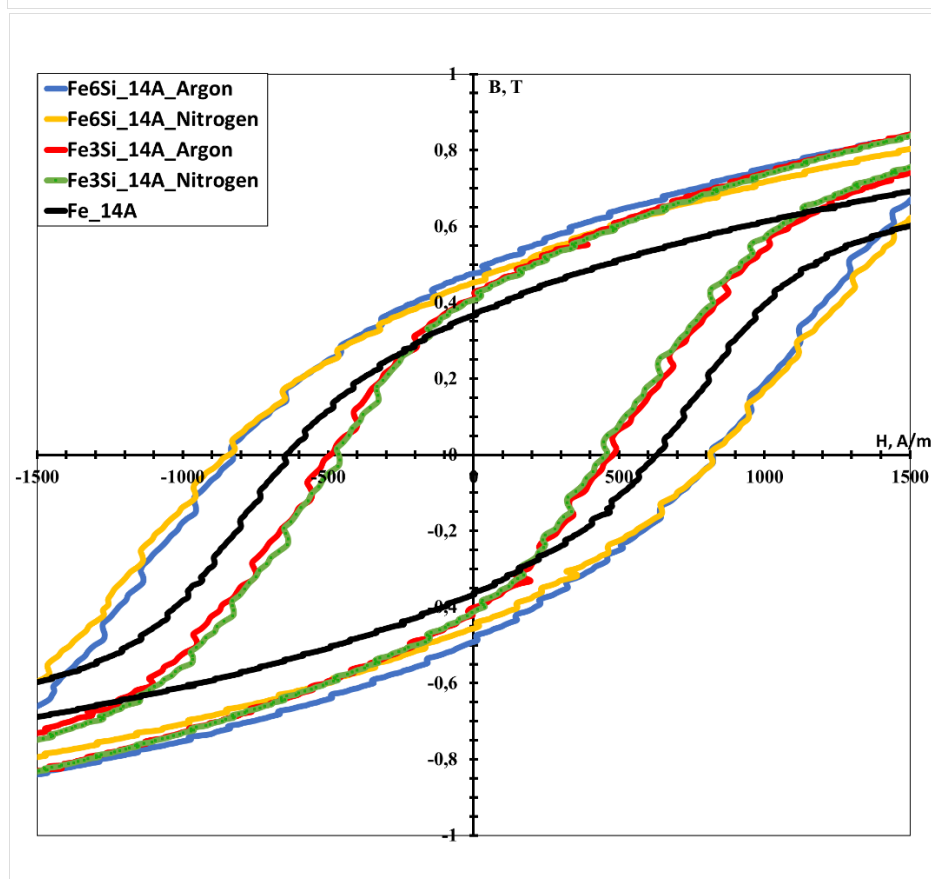
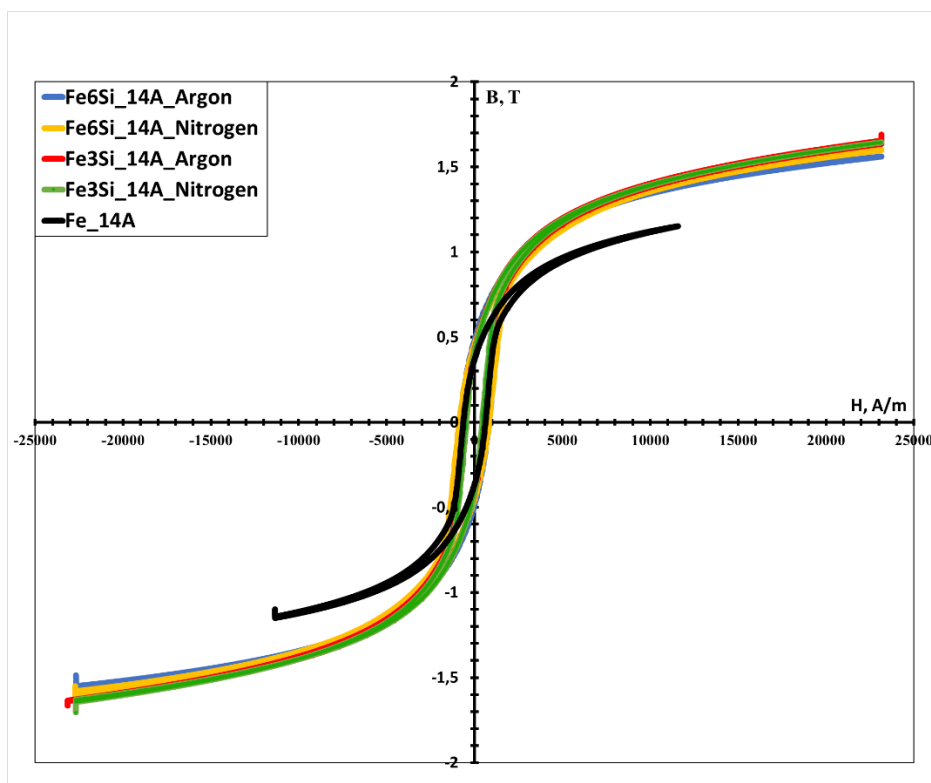
$$l = \pi \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right) = 3,14 \left(\frac{60 + 50}{2} \right) = 0,173 \text{ m};$$

Pannes I valemisse 2.5 saame:

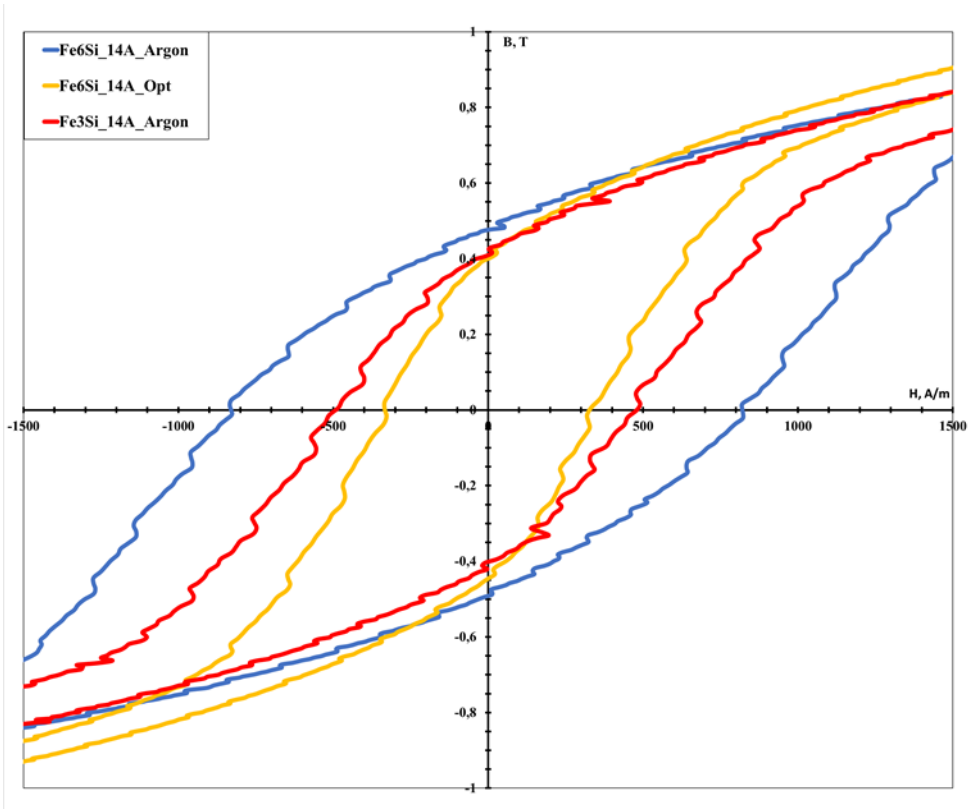
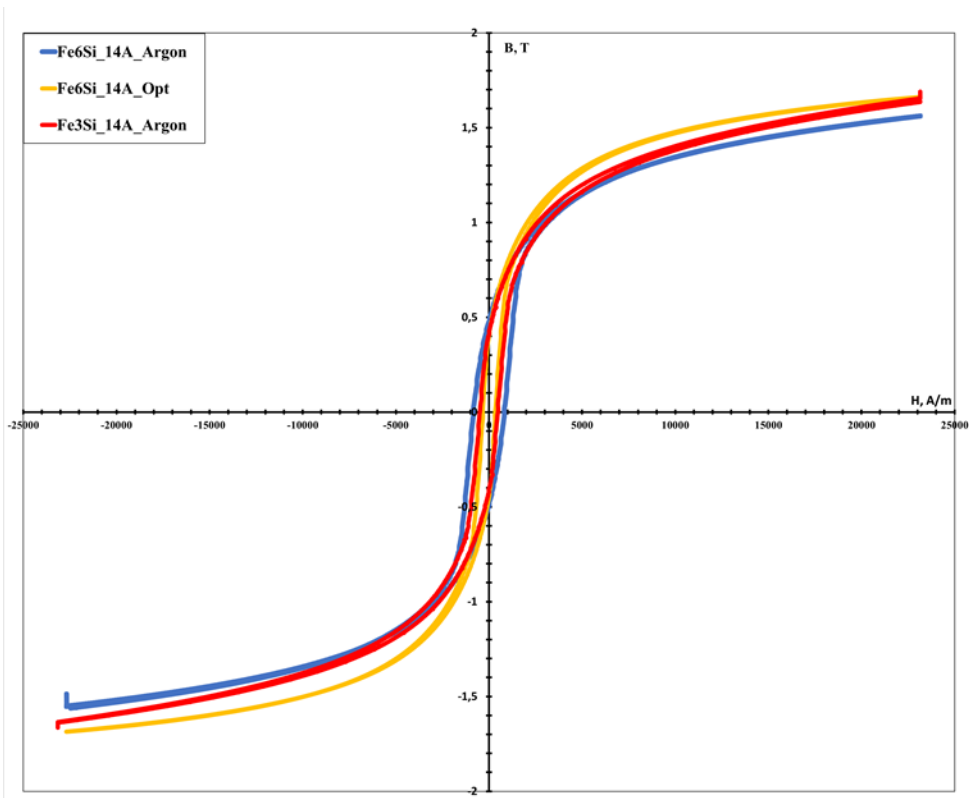
$$H = \frac{-7,02 * 200}{0,173} = -8115,6 \text{ A/m}.$$

4.4. Katsete tulemused

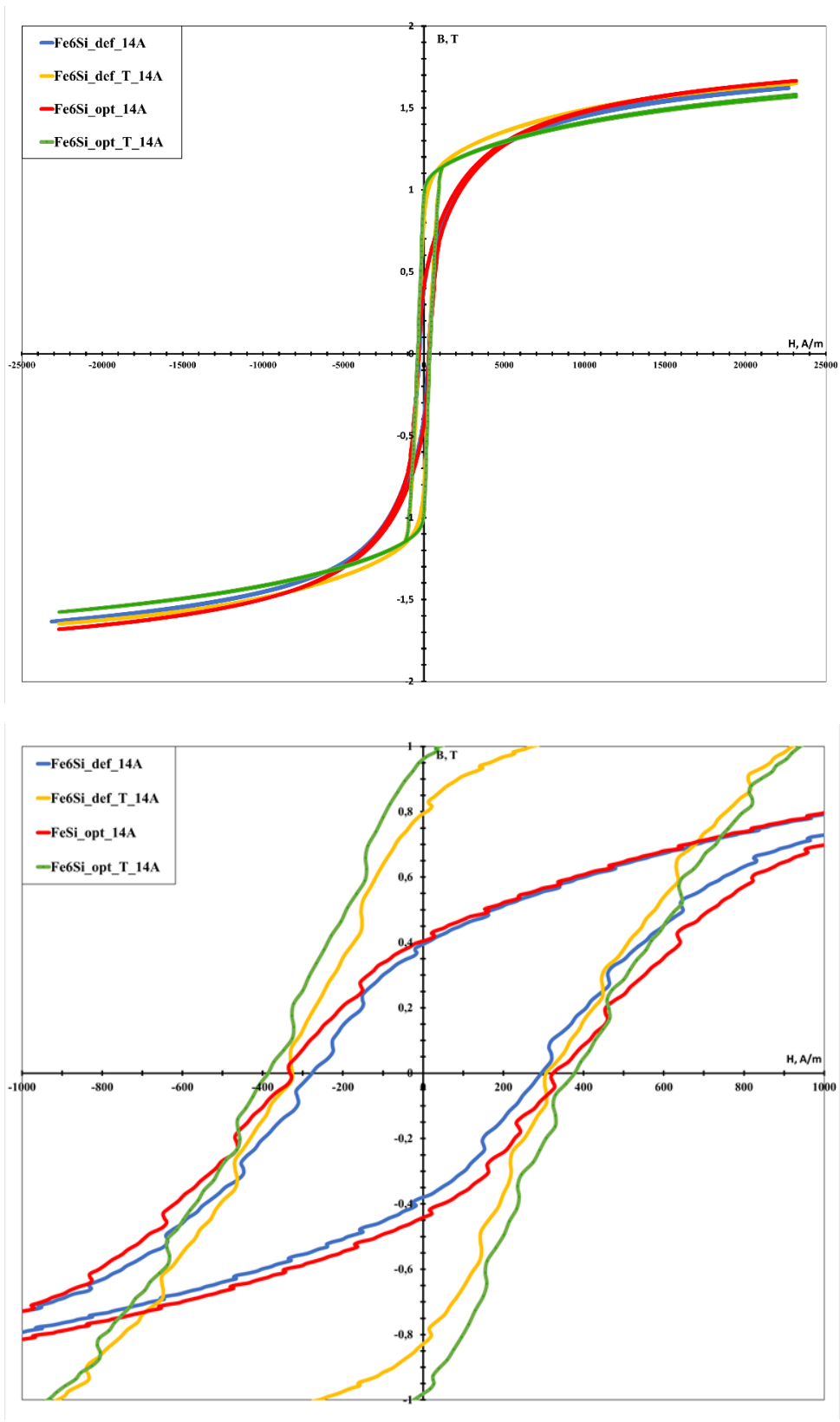
4.4.1. Katsekehade hüsteresisilmused



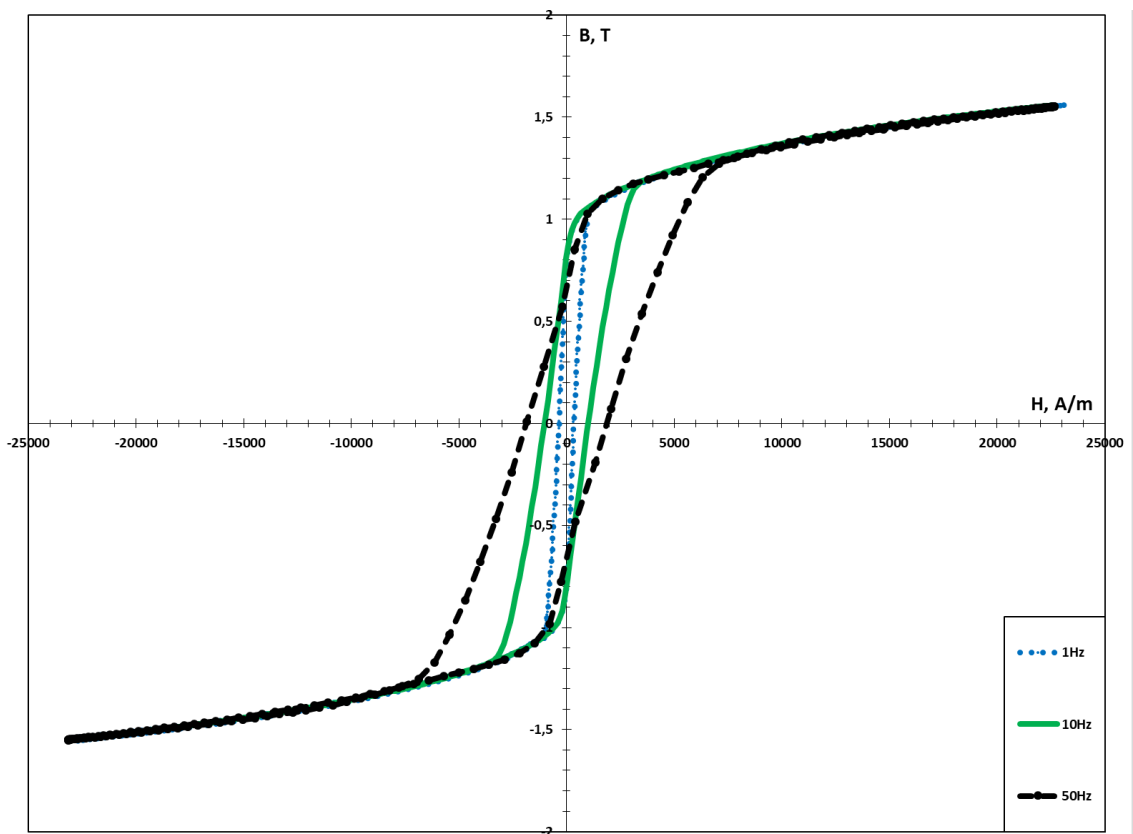
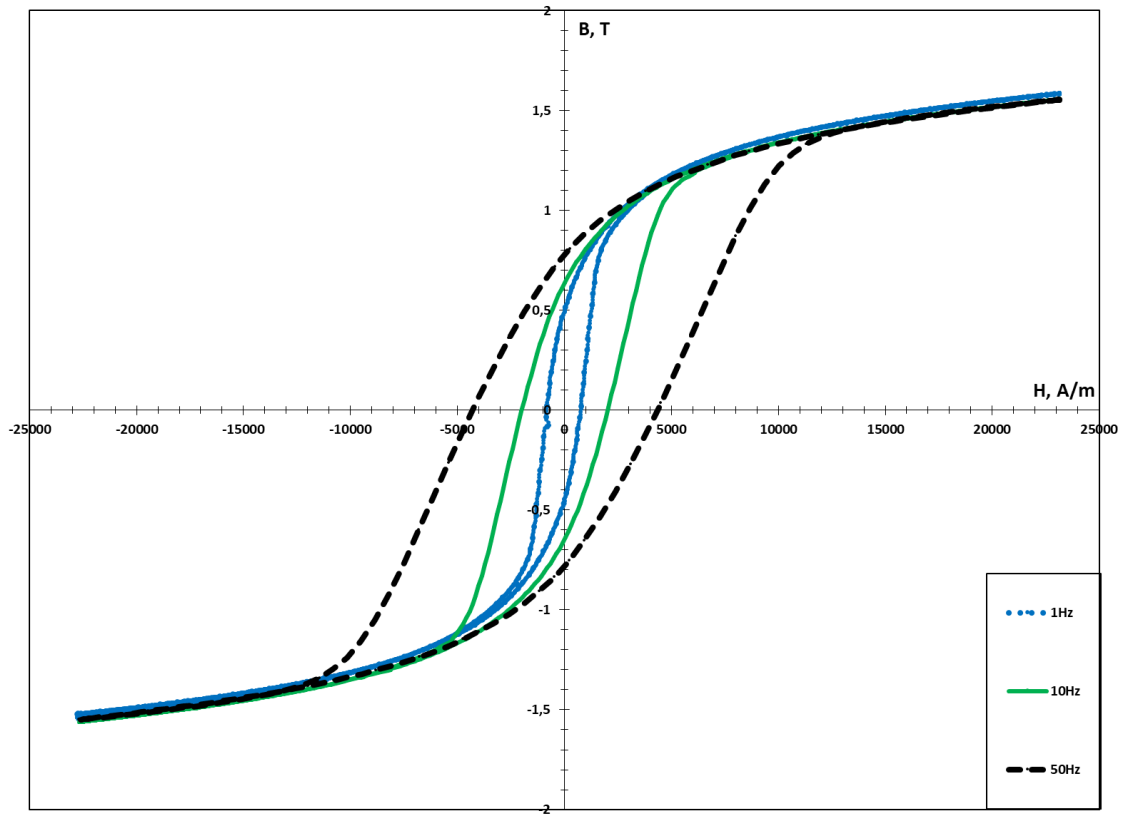
Joonis 4.14 Katsekehade 1-4,7 hüsteresisilmused voolul 14A ja sagedusel 1Hz



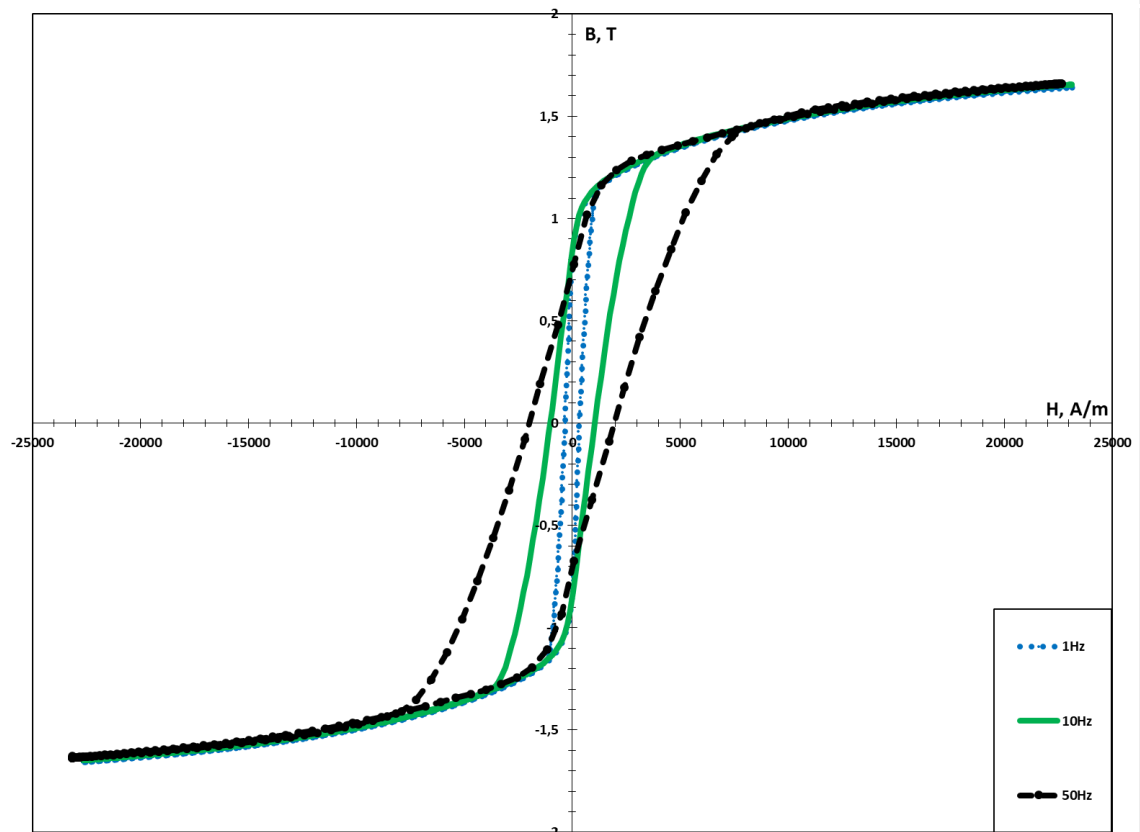
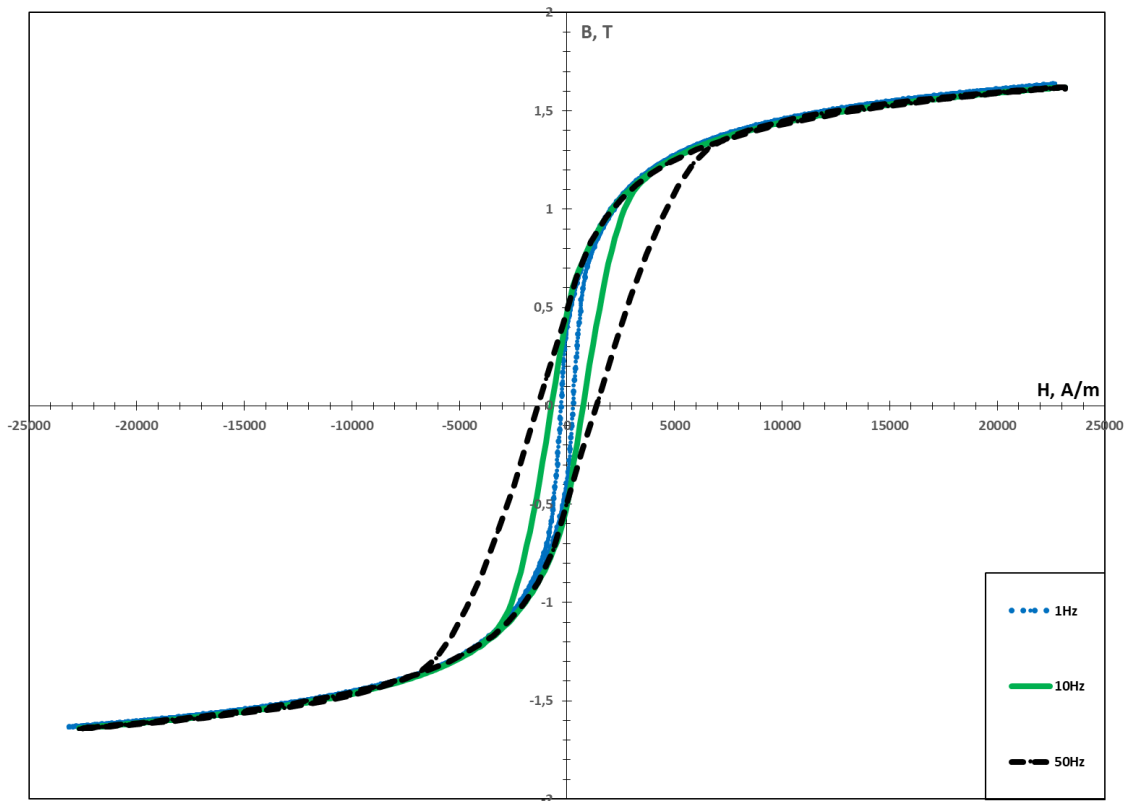
Joonis 4.15 Katsekehade 1, 3, 6 hüstereesisilmused voolul 14A ja sagedusel 1Hz



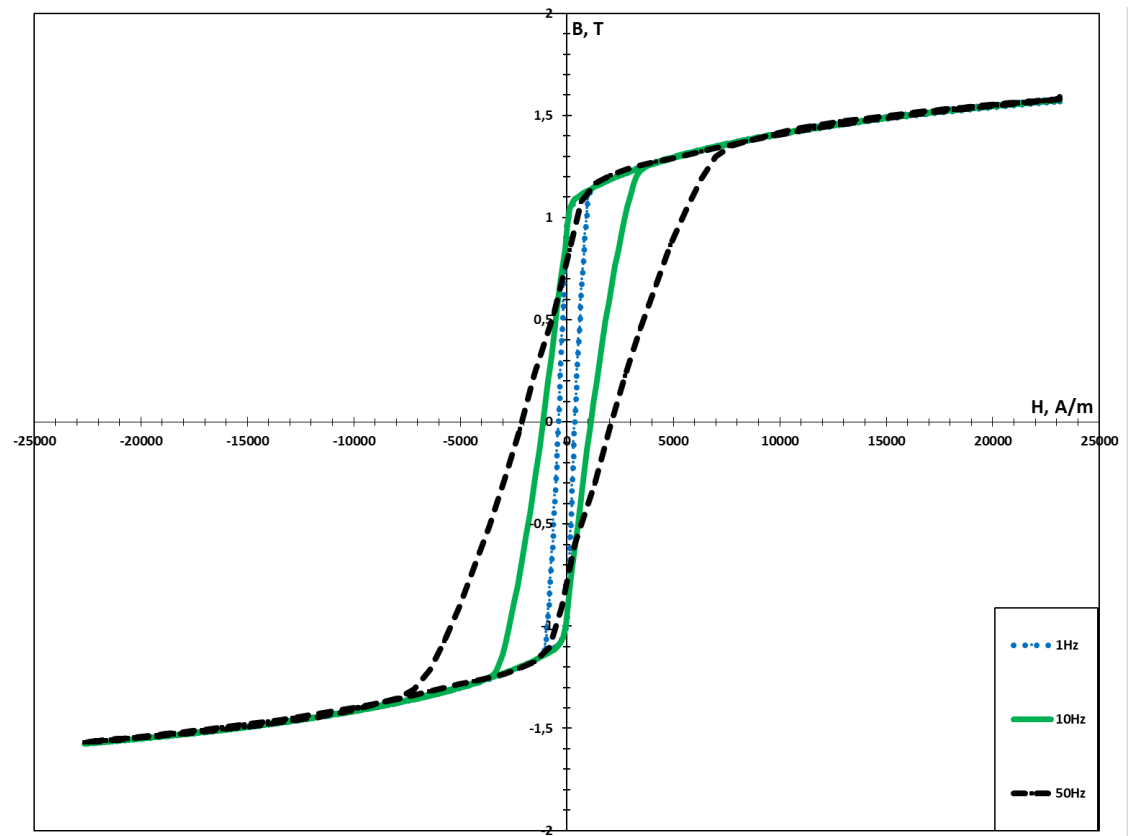
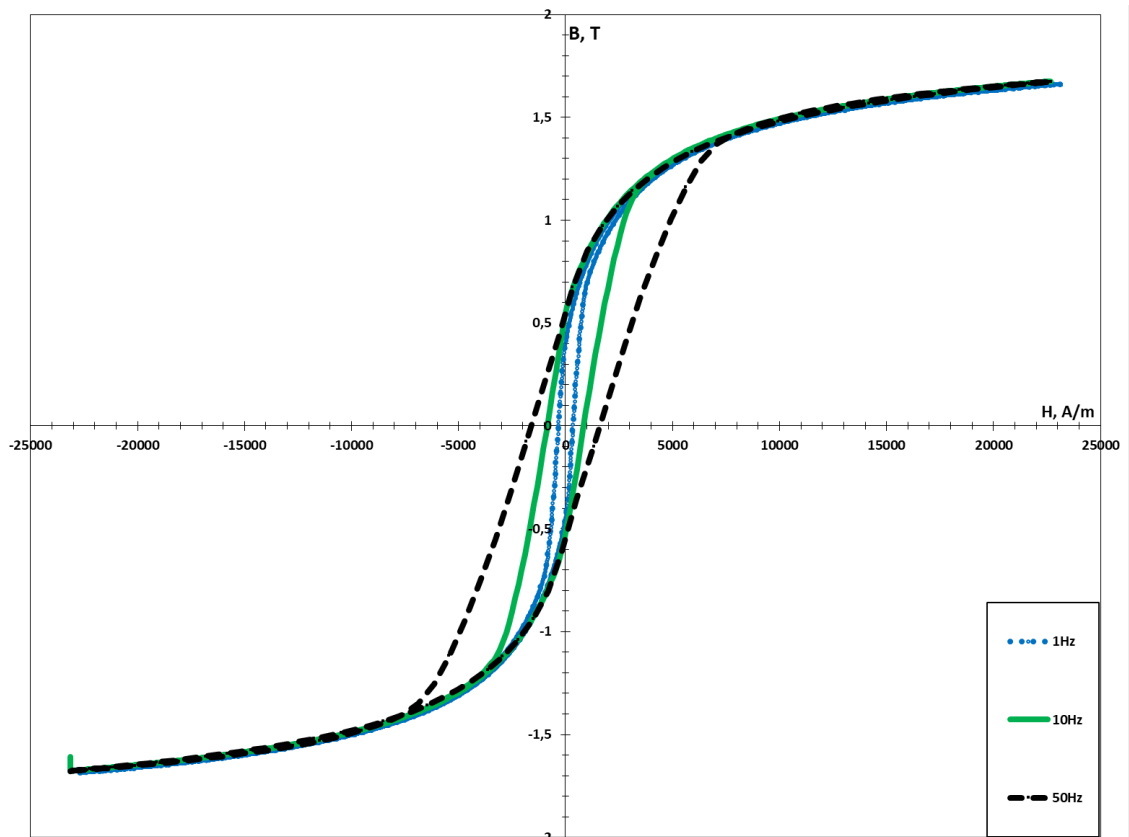
Joonis 4.16 Katsekehade 5,6 hüsteeresisilmused enne ja pärast löömutamist voolul 14A ja sagedusel 1Hz



Joonis 4.17 Katsekeha 3 hüstereesisilmused voolul 14A



Joonis 4.18 Katsekeha nr.5 hüsteressilmused voolul 14A



Joonis 4.19 Katsekeha nr.6 hüstereesisilmused voolul 14A

4.4.2. Hüstereesisilmuste analüüs

Antud töö punktis 4.4.1 on välja toodud kõikide katsekehade hüstereesisilmused erinevatel vooludel ja sagedustel.

Joonisel 4.17 on standardse printimis parameetridega katsekehade nr. 1-4,7 hüstereesisilmused. Joonisel 4.18 on toodud optimeeritud printimis parameetritega katsekeha nr.6 hüstereesisilmuse võrdlus katsekehade nr. 1,3 hüstereesisilmustega. Nimetud graafikutest järeldub, et standardse printimis parameetridega katsekehade magnetilised omadused halvenevad kui katsekehade räni sisaldus ületab 3%. Seeda on võimalik näha vaadates 6,5% räni sisaldavate katsekehade nr.3,4 kõveraid. Nende kehade demagneetumine toimub märgatavalt suurematel magnetvälja tugevuse väärtustel. See on põhjustatud selle kehade struktuuriga. Tuginedes pildile 4.6, b kus on näha vaadeldud 6,5% räni sisaldusega katsekeha struktuur, võib järelda, et selle keha materjali tihedus on oluliselt väiksem, võrreldes 3% räni sisaldava kehaga. See tähendab, et 6,5% räni sisaldusega katsekeha eritakistus on ka suurem, mille tagajärjeks on magnetiliste domeenide pöörlemine magnetvälja suunas muutus keerulisemaks. Saadud tulemused kinnitavad teooriat.

Võrreldes joonisel 4.18 optimeeritud parameetridega katsekeha nr. 6 hüstereesisilmust teiste omadega on näha et olukord on muutunud paremaks. Sest katsekeha materjali tihedus kasvab. Sellega eritakistus on ka vähenenud. Sel põhjusel jääkinduktsiooni B_T ja koertsitiivjõu H_C väärtuseid ka vähenesid, mis omakorda tähendab hüstereesikadude vähenemist.

Analüüsides katsekehade 1-4 hüstereesisilmuseid, on võimalik teha järelduse, et räni sisaldus raua sulamites suurendab katsekehade materjali tihedust ja eritakistust. Seda on hästi näha kui võrrelda puhta raua ja räni sisaldavate sulamite küllastus piirkondi. Selline nähtus on põhjustatud domeenide orienteerumise magnetvälja suunas raskendamisega. Samuti on võimalik teha järelduse, et räni sisaldus raua sulamis mõjutab jääkinduktsiooni B_T ja koertsitiivjõu H_C väärtuseid. Räni sisalduse kasvuga suurendavad ka need väärtused. Kui vaadata sama väärtusi erinevatel vooludel on näha, et voolu suurendamisega jääkinduktsiooni ja koertsitiivjõu väärtused kasvavad ka. See nähtus on põhjustatud energiakadude kasvuga, mis lähevad magnetvoogu tekitamiseks, südamikku magneetumiseks ning mähiste kuumenemiseks.

Analüüsides jooniseid 4.16 – 4.19 on näha, et erinevate printimise parameetrite valik toob olulise kasu, tehes katsekehade magneetilisi omadusi paremaks. See on põhjustatud materjali tihenduse kasvuga ja sisestruktuuri defektide vähendamisega.

Lõõmutamine oluliselt parenes katsekehade magneetili omadusi. See on põhjustatud sellega, et selle protsessi käigus kehade struktuur muutus ühtlasemaks, mis tähendab, et domeenide arv

väheneb ja nende suurus kasvab. Pöörivoolude tõttu koertsitiivjõu H_c väärtused kasvavad ja sellega ka kasvavad hüstereesikaod. Joonistel 4.16-4.19 asuvad kõverad kinnitavad seda. Selleks, et neid kaotusi vältida, vaja teha mõõtmisi madalamatel sagedustel. Näiteks sagedusel 1kHz.

Analüüsidest hüstereesi silmuste suuruseid, saadud tulemused kinnitavad, et tegu on pehmete magnetmaterjalidega, kuna koertsitiivjõu väärtused on päris madalad ja iseennast hüstereesi silmused on kitsad, mis omakorda tähendab, et hüstereesi kaod sellistes katsekehades on madalad.

KOKKUVÖTTE

Koostatud bakalaureusetöö sisu kirjeldab magnetmaterjalide ehitust, liigitust ning magnetilisi omadusi. Uurimustöö eesmärk oli määrata 3D printitud pehmete magnetmaterjalide magnetilisi omadusi, ning uurida viise nende omaduste täiendamiseks. Lõputöö koosneb kahest osast: teoreetilisest ning praktilisest.

Teooria osas on kirjeldatud ainete ehitus ja liigitus struktuuri järgi, põhjalikult seletatud magnetmaterjalide liigitus, sõltuvalt magnetiliste omadustest. Samuti oli tehtud hüstereesisilmuse seletus, tuginedes materjalide magnetomadustele nagu jääkinduksioon ja koertsitiivjõud.

Praktika osa oli kõige mahukam, kuna katsematerjalide ettevalmistamine magnetiliste omaduste määramiseks oli pikaajaline protsess. Esmaselt oli vaja välja printida rõngakujulisi katsekehasid. Ühe katsekeha tootmine kestis umbes pool päeva. Teiseks, et määrata materjalide magnetilisi omadusi oli vaja mähkida printitud kehasid, kasutades erinevate paksusega vase traate. Teiseti öeldes - teha rõngaspoolid. Mähkimise protsess oli vajalik katsekehade ümber vahelduva magnetvälja tekitamiseks. Katsekehade mähkimine võttis keskmiselt 4-6 tundi ja nõudis suurt tähelepanu, kuna vase traadi kaitseisolatsiooni oli kerge kahjustada ning rõngaspooli mähistes pidi olema õige keerdude arv.

Hüstereesisilmuste ehitamiseks olid tehtud saadud andmete põhjal. Andmete töötlemine oli raskendatud arvuliste väärtuste tohutu suure hulkaga. Seepärast töös puuduvad magnetvälja tiheduse ja tugevuse tabelid. Katsekehade magnetiliste omaduste analüüs oli tehtud hüstereesisilmuste alusel. Analüüsides erinevate katsekehade hüstereesisilmusi, võib järeldada, et 3D printitud magnetmaterjalide magnetilised omadused sarnanevad tavaliste magnetmaterjalidega, mis on traditsioonilises tööstuses kasutusel. Eriti sel juhul kui materjalid on printitud optimeeritud parameetridega. Selle töö uurimuse käigus saadud tulemused kinnitavad seda.

Viimastel aastatel 3D printimise valdkonna aktiivselt uuritakse ja pikemas perspektiivis hakkab huvi kasvama. Seepärast vaadeldavast teematst on võimalik edasi arendada palju teisi uuringuid. Antud töö on lühike samm 3D printitud materjalide uurimise suunas, mis võib olla tulevate uuringute aluseks. Näiteks ehitatud uuritavatest materjalidest mootori prototüübi valmistamiseks.

Kokkuvõttes on võimalik väita, et selle töö peamised eesmärgid olid saavutatud, kuna saadud tulemused näitavad, et töös tehtud 3D printimise protsessi optimeerimine oluliselt parandas katsekehade magnetilisi omadusi.

SUMMARY

The content of this paper discusses the construction and classification of magnetic materials as well as their magnetic properties.

The purpose of this paper is to determine the magnetic properties of soft 3D printed magnetic materials, and to investigate the possibilities of improvement of these properties. The paper consists of a theoretical and a practical section.

The structure of the material and the classification by structure is referred to in the theoretical section, in which the magnetic material classifications dependency on magnetic properties is well-defined, as well as the magnetic hysteresis loop, based on different magnetic properties.

The practical section is the most substantial due to the lengthy test piece preparation time. At first we had to print out circular test pieces. The production time of one such piece estimated to be around half a day. Furthermore, to determine the magnetic properties of the materials, it was essential to wrap the test pieces around with different widths of Copper wire to create a toroid.

The wrapping process was necessary to create an alternating magnetic field in the test piece. As the test piece was fairly delicate, it demanded the utmost attention due to which the wrapping process took approximately 4-6 hours.

The collected data was then used to make the magnetic hysteresis. Due to the large quantity of data it was fairly complicated to analyze the data. That is also why the paper lacks the magnetic field density and magnetic field strength charts. The analysis of magnetic properties was based on hysteresis loops.

By analysing different hysteresis graphs, it is safe to assume that the 3D printed test pieces magnetic properties are very similar to the magnetic properties of traditionally used magnetic materials in the industry, especially if the test pieces were printed with optimal parameters. The results of this paper confirm this claim.

In recent years the 3D printing industry is being well researched and the area is gaining plenty of interest in the long term. Thus it is possible to expand on this topic in terms of research. This paper is a small step towards researching 3D printed materials, which could be a gateway for future studies on this topic.

In conclusion we can claim that the main objectives of this research have been achieved, since the analyzed data indicates that the test pieces magnetic properties were drastically improved by optimizing the 3D printing process.

KIRJANDUS

- [1] Magnetmaterjalid, Magnetiliselt pehmed materjalid, Magnetiliselt kõvad materjalid, Ferriidid.[WWW] <https://sites.google.com/site/terased/2-mustad-metallid-ja-nendesulamid/2-3-magnetmaterjalid>(19.03.2019).
- [2] Metallide kristalliline siseehitus - struktuur.[WWW] http://opiobjektid.tptlive.ee/Materjaliopetus/metallide_kristalliline_siseehitus__struktuur.html(20.03.2019).
- [3] David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, Fundamentals of physics, 9th edition, 2012.
- [4] Nicola A. Spaldin, Magnetic materials: fundamentals and device applications, Cambridge University Press, 2006.
- [5] P.Kulu, J. Kübarsepp, A.Laansoo, R. Veinthal, MATERJALITEHNIKA I, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2015.
- [6] P. Kulu, J. Kübarsepp, E. Hendre, T. Metusala, O. Tapupere, Materjalid, Tallinn, 2001.
- [7] Soshin Chikazumi, Physics of Ferromagnetism 2nd edition, Oxford,Oxford University Press, 2009.
- [8] Diamagnetism.[WWW] <https://www.britannica.com/science/diamagnetism>(10.05.2019)
- [9] G.L.Miessler, D.A.Tarr, Inorganic Chemistry 3rd edition, Pearson/Prentice Hall publisher, 2004.
- [10] Ferrimagnetism.[WWW] <https://www.britannica.com/science/ferrimagnetism>(10.05.2019).
- [11] Kuno Janson, Ants Kallaste, Elektromasinate alused, Tallinn, TTÜ kirjastus, 2017.
- [12] Hans Tiismus, Ants Kallaste, Anton Rassõlkin, Toomas Vaimann, Preliminary Analysis of Soft Magnetic Material Properties for Additive Manufacturing of Electrical Machines, Tallina Tehnikaülikool,2018(17.05.2019).
- [13] Eesti nõukogude ensüklopeedia 6 köide, 1992.

LISA 1

rektori 27.02.2014 käskkirja nr 60 juurde

Lihtlitsents lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ja reprodutseerimiseks

Mina Naydis Artem, sünnikuupäev: 23.04.1995

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „3D printitud materjalide magnetiliste omaduste määramine elektrimasinate prototüüpimiseks“, mille juhendaja on doktorant-nooremteadur Hans Tiismus ja kaasjuhendaja on vanem teadur Ants Kallaste.

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas TTÜ raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas TTÜ raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

LISA 2

rektori 27.02.2014 käskkirja nr 60 juurde

METAANDMED

Töö pealkiri (eesti keeles): 3d prinditud materjalide magnetiliste omaduste määramine elektrimasinate prototüüpimiseks

Töö pealkiri (inglise keeles): magnetic properties of 3d printed materials for prototyping electrical machines

Autor: Naydis Artem

Juhendaja(d): Hans Tiismus, doktorant-nooremteadur

Kaasjuhendaja(d): Ants Kallaste, vanemteadur

Kaitsmise kuupäev:

Töö keel: est/ eng / rus:

Asutus (eesti keeles): TTÜ/ TTÜ õppeasutus (nimi): Tallinna Tehnikaülikool.

Asutus (inglise keeles): TTÜ / TTÜ õppeasutus (nimi): Tallinn University of Technology

Teaduskond (eesti keeles): Inseneriteaduskond

Teaduskond (inglise keeles): School of engineering

Instituut (eesti keeles): Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Instituut (inglise keeles): Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Märksõnad /kui on/ (eesti keeles): 3d printitud magnetmaterjalide magnetomadused

Märksõnad /kui on/ (inglise keeles): magnetic propertie of 3d printed materials

Õigused: Ei ole.