

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA

MAGISTRSKO DELO

ANAMARIJA KOFOL

LJUBLJANA, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA MATERIALE IN METALURGIJO

**MAGNETNO STARANJE NEORIENTIRANIH
ELEKTROPLOČEVIN**

MAGISTRSKO DELO

ANAMARIJA KOFOL

LJUBLJANA, september 2016

UNIVERSITY OF LJUBLJANA
FACULTY OF NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING
DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGY

MAGNETIC AGING OF NON-ORIENTED ELECTRICAL STEEL SHEETS

MASTER's THESIS

ANAMARIJA KOFOL

LJUBLJANA, september 2016

IZJAVA LEKTORJA

Aleksandra Gačić, rojena 1. junija 1981, izjavljam, da sem
lektorirala magistrsko nalogo Anamarije Kofol z naslovom

MAGNETNO STARANJE NEORIENTIRANIH ELEKTROPLOČEVIN.

Laško, 21. junij 2016

Podpis: *Aleksandra Gačić*

IZJAVA

Izjavljam, da je magistrsko delo rezultat mojega raziskovalnega dela.

Anamarija Kofol



PODATKI O MAGISTRSKEM DELU

Število listov: 65

Število strani: 130

Število slik: 102

Število preglednic: 6

Število literaturnih virov: 55

Število prilog: /

Študijski program: Materiali in metalurgija

Smer: Materiali

Komisija za zagovor diplomskega / magistrskega dela:

Predsednik: *prof. dr. MILAN BIZJAK, UL NTF*

Mentor: *izr. prof. dr. ALEŠ NAGODE, UL NTF*

Somentorica: *dr. DARJA STEINER PETROVIČ, višja znanstvena sodelavka, IMT*

Član: *prof. dr. BOŠTJAN MARKOLI, UL NTF*

Delovni somentor: *dr. GAŠPER NOVAK, SIJ Acroni d. o. o.*

Ljubljana, september 2016

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Alešu Nagodetu ter somentorici dr. Darji Steiner Petrovič za nesebično pomoč, potrpežljivost in vodenje pri opravljanju magistrskega dela.

Zahvala tudi somentorju in sodelavcu dr. Gašperju Novaku in sodelavcem iz RCJ in SIJ Acroni d.o.o. Jesenice.

Hvala tudi partnerju Mateju za podporo.

POVZETEK

Eden od pogojev za zagotavljanje kakovostne elektropločevine je nizek delež magnetnega staranja, zato mora biti vsebnost ogljika in prostega dušika v elektropločevinah zelo nizka. Nizka vsebnost ogljika je pomembna zato, ker se ogljik v obliki ε -karbida pri temperaturah nad 150 °C izloča znotraj kristalnih zrn in skupaj z nitridi predstavlja ovire za gibanje Blochovih sten ter bistveno poslabša elektromagnetne lastnosti. Ta proces imenujemo magnetno staranje. V splošnem na mobilnost in rotacijo magnetnih domen močno vpliva število nekovinskih vključkov in izločkov, ki predstavljajo ovire za gibanje magnetnih domen.

Opredelili smo magnetno staranje pri izbranih temperaturah (225 °C in 300 °C) in časih (12 h in 24 h) za štiri različne kakovosti industrijske neorientirane elektropločevine (EV21, EV18, EV15 in EV12) in preučili vpliv magnetnega staranja na njihove magnetne lastnosti.

Na delež magnetnega staranja neorientirane elektropločevine različnih kakovosti pri temperaturah 225 °C in 300 °C najbolj pomembno vpliva vsebnost ogljika v jeklu. Na delež magnetnega staranja vpliva tudi vsebnost bakra.

Magnetna koercitivnost po žarjenju je najbolj stabilna v najbolj legirani neorientirani elektropločevini (EV21); praviloma se bolj spreminja v vzorcih z višjo vsebnostjo ogljika. Spreminjanje frekvence v območju od 50 Hz do 700 Hz za nestarane in magnetno starane vzorce pokaže, da je ne glede na vsebnost ogljika koercitivnost maksimalna pri najmanj legirani neorientirani elektropločevini EV12. Vrednost koercitivnosti je sicer odvisna od skupnih izgub magnetenja $P_{\text{skup.}}$, z zmanjševanjem skupnih izgub pri magnetenju pa se tudi koercitivnost zmanjšuje.

Izmerjene magnetne lastnosti pred in po različnih ciklih magnetnega staranja smo z uporabo modificirane Steinmetzove enačbe razdelili na komponente vrtničnih, histereznih in anomalnih magnetnih izgub in določili vpliv posamezne komponente na magnetno staranje. Skupne izgube pri magnetenju se spreminjajo ne le na račun histereznih, temveč tudi na račun anomalnih magnetnih izgub.

Ključne besede: Magnetno staranje, neorientirane elektropločevine, magnetne lastnosti

ABSTRACT

One of the conditions for obtaining high-quality electrical steel is a minimal amount of magnetic aging. So the electrical steel must be free of carbon and contain only small quantities of nitrogen. A low carbon content is important because the carbon that is in the form of ϵ -carbide at temperatures above 150 ° C is eliminated within the crystal grains, and with the nitrides acting as a barrier to the movement of Bloch walls, there is a substantial deterioration in the electromagnetic properties. This process is called magnetic aging. In general, the mobility and rotation of the magnetic domains greatly affect the number of non-metallic inclusions and precipitates, which constitute barriers to the movement of the magnetic domains.

We defined the magnetic aging for two temperatures (225 ° C and 300 ° C) and two time periods (12 h and 24 h) for four different qualities of industrial non-oriented electrical steel (EV21, EV18, EV15 and EV12), and examined the impact of the magnetic aging on the magnetic properties.

In terms of the magnetic aging of non-oriented electrical steel of different qualities at temperatures of 225 ° C and 300 ° C, the most significant impact comes from the carbon content in the steel. The extent of the magnetic aging is also affected by the copper content.

The magnetic coercivity after annealing is the most stable in the high-alloyed non-oriented electrical steel (EV21). As a general rule, there are more changes in the samples with a high carbon content. When changing the frequency range from 50 Hz to 700 Hz for non – aged and the aged sample, it can be evident that, irrespective of the carbon content, the coercivity is a maximum for the low-alloyed non-oriented electrical steel EV12. The values of the coercivities depend on the total magnetization losses P_{tot} . By reducing the total magnetization losses the coercivity decreases.

The measured magnetic properties before and after the various cycles of magnetic aging are, when using a modified Steinmetz equation, divided into the components of the eddy losses, the hysteresis losses and the anomalous. The impact of an individual component of magnetic losses on magnetic aging was determined. It was shown, that the overall losses in magnetization are not only due to hysteresis, but are also the result of the anomalous magnetic losses.

Keywords: Magnetic aging, non-oriented electrical steel, magnetic properties

VSEBINSKO KAZALO

1 UVOD	1
1.1 Namen in cilji dela	2
2 LITERATURNI PREGLED.....	3
2.1 Magnetni materiali	3
2.2 Razdelitev elektropločevin	3
2.2.1 Orientirane elektropločevine.....	5
2.2.2 Neorientirane elektropločevine	6
2.2.2.1 Lastnosti neorientiranih elektropločevin.....	6
2.2.2.2 Kemijska sestava	7
2.2.2.3 Mikrostruktura.....	8
2.2.2.4 Tekstura.....	10
2.3 Magnetno staranje	13
2.4 Merjenje elektromagnetnih lastnosti neorientiranih elektropločevin	15
2.5 Izgube pri magnetenju	16
3 EKSPERIMENTALNI DEL	20
3.1 Materiali in vzorčenje.....	20
3.2 Žarjenje za magnetno staranje	22
3.3 Merjenje elektromagnetnih lastnosti	23
3.4 Razdelitev magnetnih izgub.....	24
3.5 Metalografska analiza.....	25
4. REZULTATI	26
4.1 Vpliv žarjenja na magnetno staranje	26
4.1.1 Vpliv stopnje legiranja na magnetno staranje	28
4.2 Vpliv magnetnega staranja na koercitivno magnetno poljsko jakost	34
4.2.1 Vpliv koercitivne magnetne poljske jakosti v odvisnosti od frekvence.....	35
4.2.2 Vpliv koercitivne magnetne poljske jakosti v odvisnosti od kakovosti in pogojev magnetnega staranja	41
4.3 Razdelitev magnetnih izgub glede na pogoje magnetnega staranja	44
4.3.1 Temperatura 225 °C in čas žarjenja 24 h (standard SIST EN 10106:2015)	45
4.3.1.1 Vzorci kakovosti EV21	45
4.3.1.2 Vzorci kakovosti EV18	48
4.3.1.3 Vzorci kakovosti EV15	50
4.3.1.4 Vzorci kakovosti EV12	53
4.3.2 Temperatura 225 °C in čas žarjenja 12 h.....	56
4.3.2.2 Vzorci kakovosti EV18	59
4.3.2.3 Vzorci kvalitete EV15.....	62
4.3.2.4 Vzorci kakovosti EV12	65
4.3.3 Temperatura 300 °C in čas žarjenja 24 h.....	67

4.3.3.1 Vzorci kakovosti EV21	67
4.3.3.2 Vzorci kakovosti EV18	70
4.3.3.3 Vzorci kakovosti EV15	72
4.3.3.4 Vzorci kakovosti EV12	74
4.3.4 Temperatura 300 °C in čas žarjenja 12 h.....	77
4.3.4.1 Vzorci kakovosti EV21	77
4.3.4.2 Vzorci kakovosti EV18	79
4.3.4.3 Vzorci kakovosti EV15	82
4.3.4.4 Vzorci kakovosti EV12	84
4.4 Metalografska analiza.....	87
4.4.1 Mikrostruktura vzorcev EV21.....	87
4.4.2 Mikrostruktura vzorcev EV18.....	88
4.4.3 Mikrostruktura vzorcev EV15.....	89
4.4.4 Mikrostruktura vzorcev EV12.....	90
5 RAZPRAVA.....	91
6 SKLEPI	97
7 LITERATURA	98

SEZNAM SLIK

Slika 1: Razdelitev elektropločevin.....	3
Slika 2: Razdelitev elektropločevin glede na teksturo [4]	4
Slika 3: Shematski prikaz Gossove teksture [1].....	5
Slika 4: Mikrostruktura hladno valjanega traku iz a) industrijske zlitine Fe-Si-Al in b) gotove NOEP, jedkalo: nital.....	9
Slika 5: Magnetilne krivulje monokristala prostorsko centrirane kubične mreže železa kot funkcija kristalografske smeri [1]	11
Slika 6: Lega pomembnih teksturnih vlaken v t.c.k. kristalih [37]	12
Slika 7: Glavne teksture in teksturna vlakna neorientirane elektropločevine pri: a) $\varphi_2 = 0^\circ$ in b) $\varphi_2 = 45^\circ$ [19]	12
Slika 8: Zgradba 180° Blochove stene [1].....	14
Slika 9: Shematski prikaz Epsteinovega jarma [14].....	16
Slika 10: a) Magnetilni proces in smeri domen magnetnega polja in b) Magnetilna krivulja ter histerezna zanka gostote magnetnega pretoka in magnetne polarizacije [15]	17
Slika 11: Konvencionalna razdelitev magnetnih izgub v elektropločevini [1]	19
Slika 12: Laboratorijska sušilna peč EUP-KV105/300, v kateri smo magnetno starali vzorce.....	22
Slika 13: Epsteinov jarem, v katerem smo merili elektromagnetne lastnosti vzorcev pred in po magnetnem staranju	23
Slika 14: Merilnik elektromagnetnih lastnosti MPG 200D	23
Slika 15: Svetlobni mikroskop.....	25
Slika 16: Odvisnost magnetnega staranja od a) vsebnosti ogljika in b) bakra, za vzorce pri vseh pogojih magnetnega staranja	28
Slika 17: Odvisnost magnetnega staranja od vsebnosti bakra pri a) nizkih vsebnostih ogljika ($< 0,0018$ mas. % C) in b) visokih ($> 0,0020$ mas. % C) vsebnostih ogljika, pri vseh pogojih magnetnega staranja	29
Slika 18: Diagrami magnetnega staranja v odvisnosti od vsebnosti ogljika za kakovost EV21 pri vseh pogojih magnetnega staranja	30
Slika 19: Diagrami magnetnega staranja v odvisnosti od vsebnosti ogljika za kakovost EV18 pri vseh pogojih magnetnega staranja	31
Slika 20: Diagrami magnetnega staranja v odvisnosti od vsebnosti ogljika za kakovost EV15 pri vseh pogojih magnetnega staranja	32
Slika 21: Diagrami magnetnega staranja v odvisnosti od vsebnosti ogljika za kakovost EV12 pri vseh pogojih staranja	33
Slika 22: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvenca za kakovost EV21 za vzorec z $0,0014$ mas. % C.....	35
Slika 23: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvenca za kakovost EV21 za vzorec z $0,0033$ mas. % C.....	35
Slika 24: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvenca za kakovost EV18 za vzorec z $0,0013$ mas. % C.....	36
Slika 25: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvenca za kakovost EV18 za vzorec z $0,0039$ mas. % C.....	37
Slika 26: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvenca za kakovost EV15 za vzorec z $0,0012$ mas. % C.....	38
Slika 27: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvenca za kakovost EV15 za vzorec z $0,0025$ mas. % C.....	38
Slika 28: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvenca za kakovost EV12 za vzorec z $0,0015$ mas. % C.....	39
Slika 29: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvenca za kakovost EV12 za vzorec z $0,0037$ mas. % C.....	40
Slika 30: Koercitivna magnetna poljska jakost, odvisna od kakovosti pri nestaranih in magnetno staranih vzorcih, pri pogojih $T = 225^\circ\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$	42

Slika 31: Koercitivna magnetna poljska jakost, odvisna od kakovosti pri nestaranih in magnetno staranih vzorcih, pri pogojih $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 12\text{ h}$	42
Slika 32: Koercitivna magnetna poljska jakost, odvisna od kakovosti pri nestaranih in magnetno staranih vzorcih, pri pogojih $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$	43
Slika 33: Koercitivna magnetna poljska jakost, odvisna od kakovosti pri nestaranih in magnetno staranih vzorcih, pri pogojih $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 12\text{ h}$	43
Slika 34: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C	45
Slika 35: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C	46
Slika 36: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C.....	47
Slika 37: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C.....	47
Slika 38: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C	48
Slika 39: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C	48
Slika 40: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C.....	49
Slika 41: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C.....	50
Slika 42: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C	51
Slika 43: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C	51
Slika 44: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C.....	52
Slika 45: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C.....	53
Slika 46: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C	54
Slika 47: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C	54
Slika 48: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C.....	55
Slika 49: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C.....	55
Slika 50: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C	56
Slika 51: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C	57
Slika 52: Razdelitev izgub magnetenja v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C	58
Slika 53: Razdelitev izgub magnetenja v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C	58
Slika 54: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C	59
Slika 55: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C	60
Slika 56: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C.....	61
Slika 57: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C.....	61
Slika 58: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C	62
Slika 59: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C	63
Slika 60: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C.....	64
Slika 61: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C.....	64
Slika 62: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C	65
Slika 63: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C	65
Slika 64: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C.....	66

Slika 65: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C.....	67
Slika 66: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C	68
Slika 67: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C	68
Slika 68: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C.....	69
Slika 69: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C.....	69
Slika 70: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C	70
Slika 71: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C	70
Slika 72: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C.....	71
Slika 73: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C.....	71
Slika 74: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C	72
Slika 75: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C	73
Slika 76: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C.....	73
Slika 77: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C.....	74
Slika 78: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C	75
Slika 79: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C	75
Slika 80: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C.....	76
Slika 81: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C.....	76
Slika 82: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C	77
Slika 83: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C	78
Slika 84: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C.....	78
Slika 85: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C.....	79
Slika 86: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C	80
Slika 87: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C	80
Slika 88: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C.....	81
Slika 89: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C.....	81
Slika 90: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C	82
Slika 91: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C	82
Slika 92: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C.....	83
Slika 93: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C.....	84
Slika 94: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C	85
Slika 95: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C	85
Slika 96: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C.....	86
Slika 97: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C.....	86
Slika 98: Feritna mikrostruktura vzorca EV21 a) z nizkim 0,0014 mas. % C, b) z visokim 0,0033 mas. % C	87

Slika 99: Feritna mikrostruktura vzorca EV18 a) z nizkim 0,0013 mas. % C, b) z visokim 0,0039 mas. % C	88
Slika 100: Feritna mikrostruktura vzorca EV15 a) z nizkim 0,0012 mas. % C, b) z visokim 0,0025 mas. % C	89
Slika 101: Feritna mikrostruktura vzorca EV12 a) z nizkim 0,0015 mas. % C, b) z visokim 0,0037 mas. % C	90
Slika 102: Vpliv legirnih elementov na napetost tečenja [54]	94

SEZNAM PREGLEDNIC

Tabela 1: Vzorci neorientiranih elektropločevin za eksperimentalno delo (kakovost, kemijska analiza) .	21
Tabela 2:: Delež magnetnega staranja neorientirane elektropločevine v odvisnosti od temperature in časa žarjenja	27
Tabela 3:: Izbrani vzorci za nadaljnje preiskave z nizkim in visokim deležem ogljika.....	34
Tabela 4: Sprememba skupnih izgub pri magnetenju ($W \cdot kg^{-1}$) v vzorcih neorientiranih elektropločevin a) pred in po magnetnem staranju (glede na največjo gostoto pretoka magnetnega polja 1 T) in b) frekvence 700 Hz.....	93
Tabela 5: Mehanske lastnosti vzorcev neorientirane elektropločevine pred magnetnim staranjem	94
Tabela 6: Povprečne velikosti feritnih kristalnih zrn	96

SEZNAM OKRAJŠAV IN POSEBNIH SIMBOLOV

A	površina preseka lamele (m^2)
B	gostota magnetnega pretoka (T)
$\hat{B}$	največja dosežena gostota magnetnega pretoka (T)
B_r	remanentna gostota magnetnega pretoka (T)
d	debelina elektropločevine (m)
d_1	velikost (premer) kristalnih zrn (m)
f	frekvenca (Hz)
$f(g)$	prostor orientacijske porazdelitvene funkcije
G	Bertottijev parameter za izračun anomalnih magnetnih izgub ($G \sim 0,1356$)
g	orientacija
H	magnetna poljska jakost ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)
H_c	koercitivna magnetna poljska jakost ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)
J	magnetna polarizacija (T)
J_s	magnetna polarizacija nasičenja (T)
k	utrjevalni koeficient
$k_{anom.}$	koeficient anomalnih izgub pri magnetenju
$k_{hist.}$	koeficient histereznih izgub pri magnetenju
$k_{vrt.}$	koeficient vrtilnih izgub pri magnetenju
M_A	magnetno staranje (%)
n	Steinmetzov koeficient
P_a	izgube pri magnetenju po staranju ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)
$P_{anom.}$	anomalne izgube pri magnetenju ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)
P_b	izgube pri magnetenju pred staranjem ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)
$P_{hist.}$	histerezne izgube pri magnetenju ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)
$P_{skup.}$	skupne magnetne izgube pri magnetenju ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)
$P_{vrt.}$	vrtilne izgube pri magnetenju ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)
R_m	natezna trdnost ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
R_0	sila trenja pri zdrsu dislokacij (materialna konstanta) ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
$R_{p0,2}$	napetost tečenja ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
T	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
t	čas (h)
V_0	parameter, odvisen od lokalne stohastične koercitivne poljske jakosti
α	zmesni kristal – ferit

$\alpha, \gamma, \varepsilon, \eta$	teksturna vlakna
ε	karbid, ki se izloči v kristalnem zrnu
π	matematična konstanta ($\pi = 3,14$)
ρ	gostota materiala ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
ρ_r	specifična električna upornost elektropločevin ($\Omega\cdot\text{m}$)
$\varphi_1, \Phi, \varphi_2$	Eulerjevi koti ($^\circ$)
(x,y,z)	koordinate (mikrostrukture materiala)
(hkl)	Millerjevi indeksi ravnin (kubični prostorski sistem)
[uvw]	Millerjevi indeksi smeri (kubični prostorski sistem)
{hkl}	Millerjevi indeksi za družino enakovrednih ravnin
$\langle hkl \rangle$	Millerjevi indeksi za družino enakovrednih smeri
CRNO	linija za razogljčenje in rekristalizacijsko žarjenje v podjetju SIJ Acroni d. o. o.
EBSD	uklon povratno sipanih elektronov
EV21, EV18, EV15, EV12	interna oznaka kakovosti izdelanih NOEP v SIJ Acroni d. o. o.
ND	smer normale – angl. normal direction
NOEP	neorientirane elektropločevine
ODF	orientacijska porazdelitvena funkcija
OEP	orientirane elektropločevine
RD	smer valjanja – angl. rolling direction
TD	prečna smer – angl. transverse direction
XRD	rentgenski uklon

1 UVOD

Elektropločevine so zelo pomembne za gospodarno pretvorbo, distribucijo in uporabo električne energije v električnih napravah. Osnova za izdelavo neorientirane elektropločevine so silicijeva jekla, ki poleg spremljajočih elementov in elementov nečistoč, vsebujejo zelo nizek delež ogljika [1, 2]. Neorientirane elektropločevine vgrajujemo v magnetna jedra različnih električnih motorjev. Na magnetne izgube poleg debeline elektropločevine vplivajo tudi kemijska sestava, prisotnost nečistoč v jeklu, velikost kristalnih zrn, teksturiranost in stanje površine [2].

Zaradi povečevanja potrošnje malih in velikih električnih naprav so elektropločevine zelo pomemben del gospodarstva. V letu 2014 je bila svetovna proizvodnja elektropločevin 13.128.000 ton, od tega v EU 726.000 ton. Slovenski delež izdelanih elektropločevin je okoli 100.000 ton letno [3].

Zagotavljanje kakovostne elektropločevine je pogojeno tudi z nizkim deležem magnetnega staranja. Magnetno staranje je posledica oviranja gibanja in kroženja magnetnih domen zaradi izločenega ogljika v obliki ϵ -karbida in nitridov, zaradi česar morata biti vsebnost ogljika in prostega dušika v elektropločevinah zelo nizki [2, 4–7]. Na gibanje magnetnih domen poleg izločkov močno vpliva tudi veliko število nekovinskih vključkov [1]. Magnetno staranje je pogojeno tudi z ustreznim razogljichenjem [5–7].

Razogljichenje hladno valjanih trakov iz silicijevih jekel poteka med toplotno obdelavo po hladni deformaciji. Razogljichenje poteka v vlažnih plinskih mešanica (npr. $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$) pri temperaturah med $800\text{ }^\circ\text{C}$ in $900\text{ }^\circ\text{C}$. Razogljichenje s plinsko mešanico vodik – vodna para, ki poteka po reakciji $[\text{C}]_{\text{Fe}} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$, je v literaturi opisano kot najbolj učinkovito [2].

Današnja tehnologija izdelave silicijevih jekel omogoča, da je praviloma ves dušik vezan v nekovinske vključke, predvsem v AlN.

Izsledki magistrskega dela, predvsem določitev deleža magnetnega staranja glede na kakovost neorientiranih elektropločevin in vsebnost ogljika, pa tudi določitev vplivnih(e) komponent(e) v skupnih izgubah pri magnetenju bodo namenjeni izboljšanju magnetilnih sposobnosti neorientiranih elektropločevin, to pa pomembno prispeva h konkurenčnosti slovenskega gospodarstva, tako proizvajalca neorientiranih elektropločevin kot tudi porabnika, ki uporablja in predeluje neorientirane elektropločevine.

1.1 Namen in cilji dela

Vplivni mehanizmi magnetnega staranja na magnetenje še niso popolnoma raziskani in pojasnjeni [8–13], zato je namen magistrskega dela preučiti magnetno staranje v neorientiranih elektropločevinah različnih kemijskih sestav.

Ugotovili bomo, katera izmed komponent skupnih magnetnih izgub najbolj pripomore k povišanju letih. Ti izsledki bodo omogočili boljše razumevanje magnetnega staranja.

Cilj dela je opredeliti magnetno staranje pri izbranih temperaturah in časih ter rezultate primerjati za različne kakovosti neorientirane elektropločevine.

Zato bomo v okviru eksperimentalnega dela magistrskega dela izvedli naslednje:

- Izbrali in določili bomo vzorce elektropločevin (različne kakovosti) z različno vsebnostjo ogljika (primerljivih kemijskih sestav, razen silicija). Predpostavljamo, da bo na delež magnetnega staranja najbolj vplival ogljik in da je ves dušik vezan.
- Izvedli analizo podatkov meritev elektromagnetnih lastnosti pred in po magnetnem staranju za različne kakovosti industrijsko izdelanih neorientiranih elektropločevin v odvisnosti od pogojev magnetnega staranja (spremenljivki: temperatura in čas).
- Določili bomo delež magnetnega staranja po kakovosti glede na vsebnost ogljika.
- Izmerjene magnetne lastnosti, pred in po različnih ciklih magnetnega staranja bomo z uporabo modificirane Steinmetzove enačbe razdelili na komponente vrtnčnih, histereznih in anomalnih magnetnih izgub.

2 LITERATURNI PREGLED

2.1 Magnetni materiali

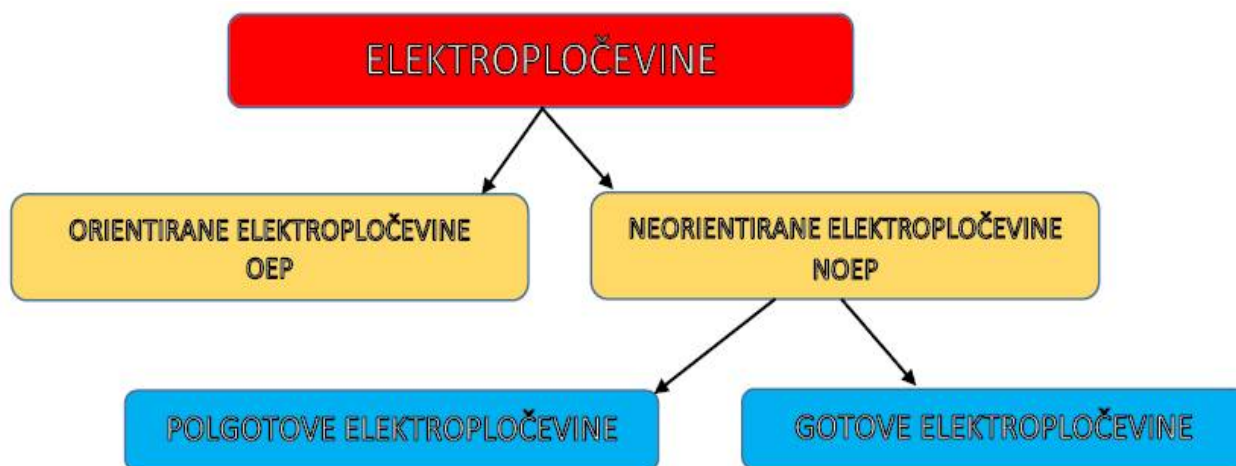
Elektropločevine spadajo v skupino magnetnih materialov, ki jih delimo glede na njihove magnetne lastnosti (koercitivna magnetna poljska jakost H_c , remanentna gostota magnetnega pretoka pri mejni histerezni zanki B_r , magnetna polarizacija nasičenja J_s in druge) [1, 14, 15].

Običajna razdelitev magnetnih materialov je [1, 14, 15]:

- Magnetno mehki materiali so tisti materiali, ki jih magnetimo ali premagnetimo z malo energije. Koercitivnosti teh materialov so majhne ($1 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$) in tudi magnetne izgube so majhne.
- Magnetno trde materiale je mogoče magnetiti ali premagnetiti le z veliko energije. Ko magnetimo trdomagnetne materiale, ostanejo namagneteni. Histerezne zanke so široke, izgube magnetenja velike, zato jih redko uporabljamo v izmeničnih poljih. Koercitivnosti teh materialov so velike, od $1 \cdot 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ in večje.
- V današnjem času se vse bolj uveljavlja skupina magnetno poltrdih materialov, ki imajo lastnosti magnetno mehkih in magnetno trdih materialov – to so v glavnem zlitine FeCoNi, ki jih uporabljajo pri gradnji posebnih zadrževalnih relejev.

2.2 Razdelitev elektropločevin

Mehkomagnetni materiali so izdelani iz tehnično čistega železa, zlitin Fe-Si in Fe-Si-Al. Večina elektropločevin se uporablja v debelinah 0,35 mm, 0,50 mm in 0,65 mm.



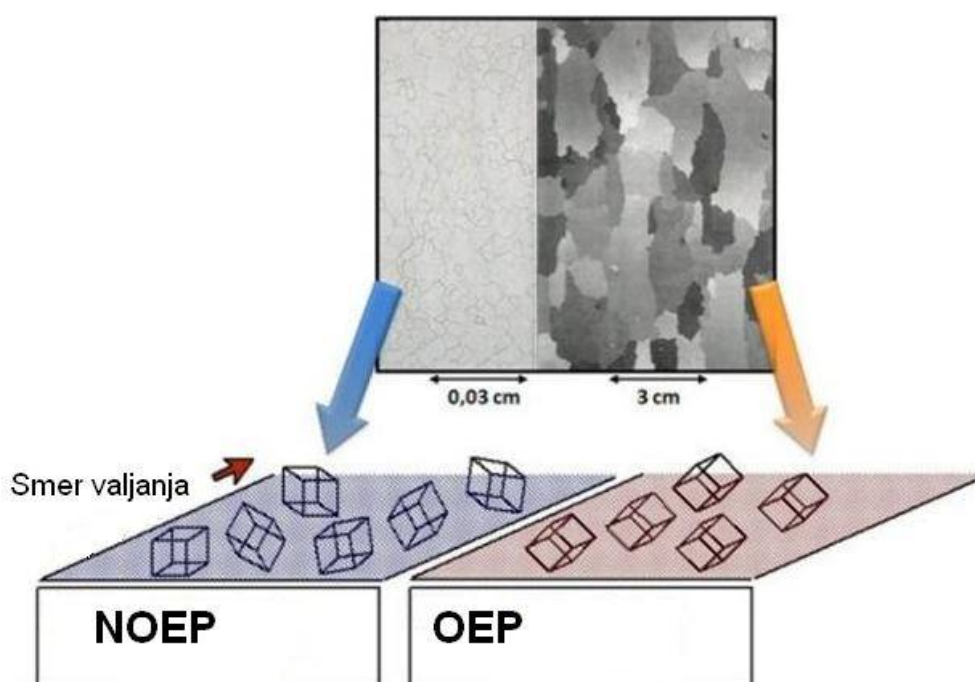
Slika 1: Razdelitev elektropločevin

Med procesi predelave in končne toplotne obdelave se izoblikuje tekstura, s katero spreminjamo lastnosti elektropločevin. Kristalna tekstura je populacija kristalografskih orientacij, katerih posamezne komponente pripadajo mestom v mikrostrukturi in jo lahko opišemo v smislu statistične porazdelitve.

Elektropločevine glede na teksturo delimo na [1]:

- orientirane elektropločevine in
- neorientirane elektropločevine.

Slika 2 prikazuje značilne lege kristalnih zrn pri hladno valjani pločevini z legami elementarnih celic.

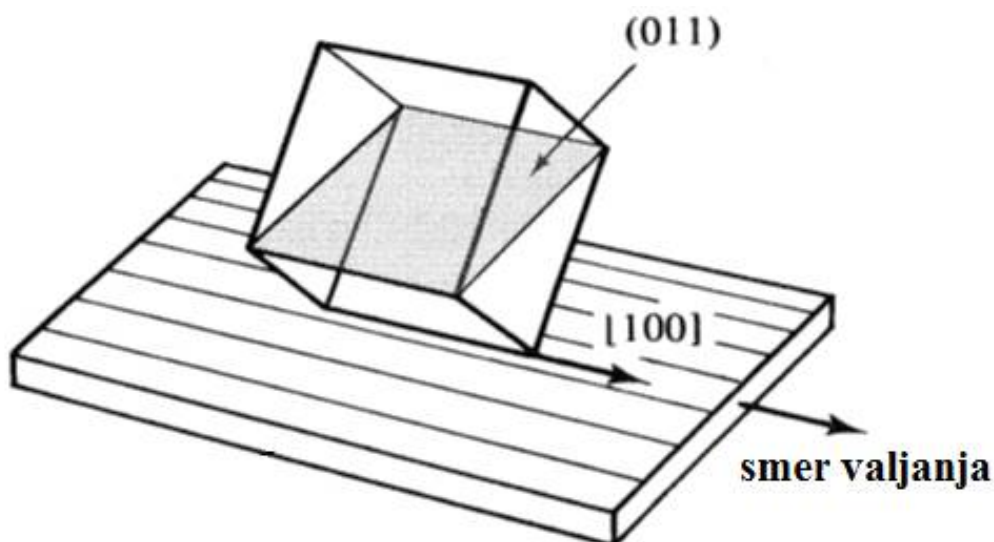


Slika 2: Razdelitev elektropločevin glede na teksturo [4]

Dodatna delitev neorientiranih elektropločevine je na gotovo in polgotovo elektropločevino, ki je za proizvajalca elektropločevin končni izdelek. Za kupca gotove elektropločevine je izdelek primeren za uporabo in vgradnjo izdelka v električne naprave. Kupec polgotove elektropločevine pa mora zagotoviti ustrezno toplotno obdelavo za izdelke, preden jih vgradi v električne naprave.

2.2.1 Orientirane elektropločevine

Orientirano elektropločevino uporabljamo za izdelavo magnetnih jeder transformatorjev. Pločevino izdelujejo po posebnem postopku (žarjenje za razogljichenje in rekristalizacijo ter končno žarjenje na visoki temperaturi), s katerim dosežejo želeno teksturo.



Slika 3: Shematski prikaz Gossove teksture [1]

Orientirane elektropločevine imajo Gossovo teksturo, ki se imenuje tudi rebrasta tekstura (110) [001]. V pločevini s to teksturo je prostorska lega kristalnih zrn taka, da se ploskev (110) ujema s površino pločevine, smer [001] pa je vzporedna s smerjo valjanja [1]. Kristalna zrna orientiranih elektropločevin so zelo velika in so lahko večja od debeline izdelane elektropločevine. Orientirana elektropločevina ima zaradi enotne orientiranosti kristalnih zrn nižje magnetne izgube (od neorientirane).

2.2.2 Neorientirane elektropločevine

Neorientirane elektropločevine glede na namembnost končnega proizvoda delimo na gotove in polgotove (slika 1). Pri izdelavi polgotove in gotove elektropločevine uporabljamo postopke, s katerimi dosežemo načrtovane mehanske in magnetne lastnosti ter zahtevano kakovost. Ti postopki so:

- izdelava jekla ustrezne kemijske sestave,
- kontinuirano ulivanje jekla,
- vroče preoblikovanje (vroče valjanje neorientirane elektropločevine do debeline 2,4 mm),
- mehansko čiščenje površine neorientirane elektropločevine in
- hladno preoblikovanje na končno dimenzijo (hladno valjanje).

Za izdelavo **polgotove** elektropločevine nato sledita:

- rekristalizacijsko žarjenje in
- dresiranje (vnos kritične deformacije).

Pločevina je v nežarjenem stanju (surovo stanje), zato mora kupec po izsekovanju (štancanju) izdelke (lamelje) razogljčiti in končno žariti, da se razvijejo ustrezna kristalna zrna in se odpravijo notranje napetosti.

Za izdelavo **gotove** elektropločevine po hladnem valjanju na končno dimenzijo sledita:

- kontinuirano žarjenje (razogljčenje, rekristalizacija in rast kristalnih zrn) in
- nanos izolacije na površino pločevine glede na zahteve kupca.

Idealna tekstura neorientirane elektropločevine je (100) [uvw] [1].

2.2.2.1 Lastnosti neorientiranih elektropločevin

Najbolj pomembna lastnost neorientiranih elektropločevin je njihova sposobnost magnetenja. Zaradi te lastnosti je cilj vsakega proizvajalca neorientiranih elektropločevin izdelati pločevino z nizkimi magnetnimi izgubami, visoko magnetno permeabilnostjo in nizko magnetno koercitivnostjo.

Vrsto neorientirane elektropločevine, ki je za določeno uporabo primerna, uporabnik lahko izbere s pomočjo standarda SIST EN 10106:2015 [16]. V mednarodnem standardu so klasificirane neorientirane elektropločevine glede na debelino elektropločevine, največje dovoljene magnetne izgube ter najnižjo dovoljeno polarizacijo pri določeni vrednosti magnetne poljske jakosti.

Na lastnosti neorientiranih elektropločevin pomembno vpliva naslednje [1, 2, 17–34]:

- kemijska sestava,
- velikost kristalnega zrna,
- tekstura,
- nekovinski vključki in
- oksidacija površine.

2.2.2.2 Kemijska sestava

Kemijska sestava neorientiranih elektropločevin s standardom [16] ni določena in je prepuščena proizvajalcu. Le-ta doseže zahtevane magnetne lastnosti s prilagajanjem tehnologije in izkušenj [24]. Dodatki elementov silicija, aluminija, fosforja in mangana povečujejo specifično električno upornost jekla ter tako vplivajo na zmanjšanje magnetnih izgub zaradi manjših vrtničnih tokov, istočasno pa ti elementi vplivajo na druge lastnosti materiala (velikost kristalnega zrna, teksturiranost, prisotnost nečistoč), ki prav tako posredno vplivajo na magnetne lastnosti.

Fosfor zvišuje specifično električno upornost železa, vendar vsebnosti nad 0,14 mas. % niso priporočljive zaradi pokanja jekla med valjanjem [20]. Če pa so v jeklu prisotni še drugi površinsko aktivni elementi ali elementi, ki povzročajo krhkost jekla, je treba delež fosforja še zmanjšati. Neorientiranih elektropločevin, ki so legirane z več kot 3 mas. % Si, ne legiramo s fosforjem [20].

Silicij ima ugoden vpliv na specifično električno upornost. Njegova vsebnost v standardnih neorientiranih elektropločevinah je do 3,5 mas. % [20], medtem ko jekla, ki vsebujejo večje deleže silicija, uporabljamo za izdelavo orientiranih elektropločevin. Silicij ima pozitiven učinek na stabilizacijo faze α in izboljšanje mehanskih lastnosti. Z večjim deležem silicija se razmerje med $R_{p0,2}$ in R_m manjša, kar omogoča kakovostnejše izsekovanje (štancanje). Pri izsekovanju nastane manjša igla, manjša deformacija mikrostrukture v reznem delu, s čimer dosežemo manjše poslabšanje magnetnih lastnosti. Silicij ima negativen vpliv na magnetno nasičenje in Curiejevo temperaturo [18]. Vemo, da vsak odstotek silicija v železu poviša specifično električno upornost za približno dvakrat, zmanjša pa gostoto nasičenja za približno 0,05 T [15].

Aluminij ima podoben vpliv na specifično električno upornost kot silicij, jo povečuje, zato je pri izdelavi neorientiranih elektropločevin zelo pomemben dejavnik skupna vsebnost silicija in aluminija v jeklu (% Si + % Al).

Mangan prav tako povečuje specifično električno upornost. V elektropločevinah, ki ne vsebujejo dodatnih legirnih elementov, povečuje magnetno permeabilnost in zmanjšuje magnetne izgube v železu [20].

Žveplo se veže v nekovinske vključke MnS v matica ferita, prosto žveplo pa segregira na proste površine (meje zrn, površino). Tako kot žveplo ima tudi dušik podoben učinek v elektropločevinah, saj se veže v vključke AlN [1, 2, 20].

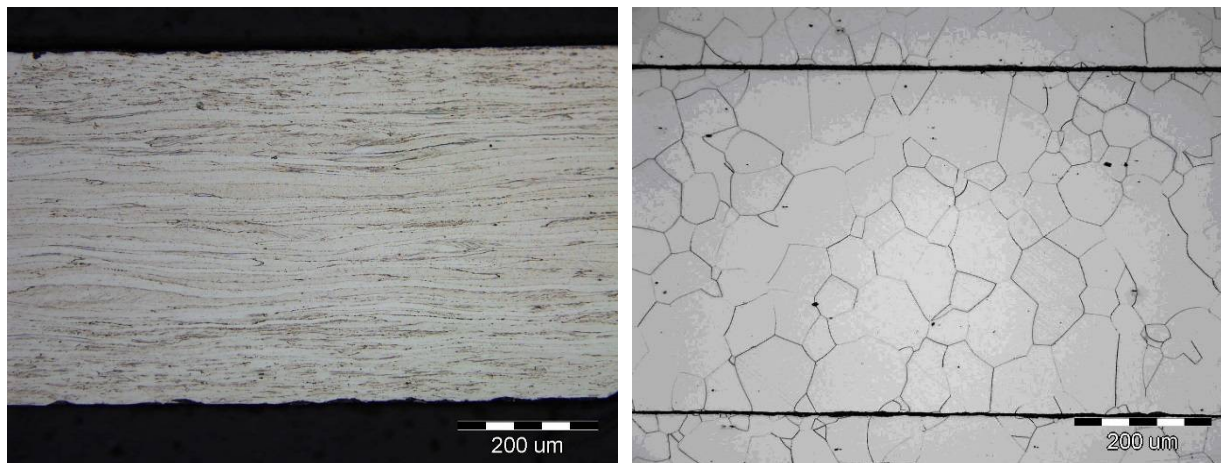
Vključki MnS in AlN so osnovni gradniki značilne mikrostrukture v elektropločevinah in imajo vlogo inhibitorjev rasti kristalnih zrn, kar je pomembno za izoblikovanje Gossove kristalne teksture, predvsem v orientiranih elektropločevinah.

Zaradi potrebe po proizvodnji visokopermeabilnih elektropločevin je postalo jasno, da sta prisotnost nečistoč v jeklu in tvorba ugodne teksture ena od ključnih dejavnikov, ki pripomoreta k izboljšanju kakovosti elektropločevin [17].

2.2.2.3 Mikrostruktura

Neorientirane elektropločevine spadajo med proizvode, pri katerih lahko z optimizacijo mikrostrukture in teksture dosežemo veliko izboljšanje magnetnih lastnosti [2].

Po hladni deformaciji je elektropločevina plastično deformiran polikristalen material s povišano gostoto dislokacij in točkastih defektov, ki so v termodinamičnem neravnotežju [13, 16]. Elektropločevina ima močno razpotegnjena kristalna zrna v smeri valjanja (slika 4a).



a)

b)

Slika 4: Mikrostruktura hladno valjanega traku iz a) industrijske zlitine Fe-Si-Al in b) gotove NOEP, jedkalo: nital

Da v neorientirani elektropločevini dobimo ustrezno vsebnost ogljika in ustrezno velikost kristalnega zrna (slika 4b), je treba izvesti razogljicevalno in rekristalizacijsko žarjenje trakov. V SIJ Acroni d. o. o. elektropločevino razogljicuemo in rekristalizacijsko žarimo na liniji CRNO.

V prvem delu linije CRNO potekata poprava in razogljicenje jeklenih trakov. Ker je vsebnost končnega ogljika določena z mejo pod 0,0035 mas. %, je treba trak razogljiciti v vlažni mešanici vodik / dušik. V razogljicevalnem delu je cca. 60 % H_2 , drugo sta N_2 in vodna para. Delež vode v analizirani mešanici mora znašati toliko, da je v ugodnem medsebojnem razmerju z deležem H_2 , kar omogoča dobro razogljicenje. Temperatura razogljicenja je med 800 °C in 900 °C.

Med razogljicenjem že nastopi začetek rekristalizacije. Rekristalizacijsko žarjenje poteka v suhi atmosferi, običajno v H_2 ali N_2 . Za rast rekristaliziranih zrn žarimo trakove pri temperaturah od 1000 °C do 1050 °C [17]. Po razogljicenju in rekristalizacijskem žarjenju imajo neorientirane elektropločevine rekristalizirano feritno mikrostrukturo [2].

Končna velikost kristalnih zrn je odvisna od vrste pločevine, in sicer od stopnje legiranja (deleža silicija in aluminija), hladne deformacije, temperature, časa žarjenja in vsebnosti ogljika.

V mikrostrukturi elektropločevin so majhne količine vključkov (sulfidov, silikatov in aluminatov). Poleg vključkov pa najdemo tudi izločke – precipitate, ki jih intersticijska elementa ogljik in dušik tvorita z železom in aluminijem. To so karbidi in nitridi [1, 2, 6, 7, 9, 11, 12, 14].

Nekovinske vključke ločimo na primarne in sekundarne vključke. Primarni vključki nastanejo pri izdelavi jekla, sekundarni nekovinski vključki pa nastanejo med strjevanjem in pri nadaljnjih fazah predelave neorientiranih elektropločevin [2].

Velikost nekovinskih vključkov je zelo različna, praviloma reda velikosti μm (lahko so tudi večji ali manjši). Zelo majhni vključki velikosti reda nm , ki se izločajo v trdni matici, najbolj vplivajo na magnetne lastnosti elektropločevin s tem, da motijo gibanje magnetnih domen [2]. Najpomembnejši vključki za tvorbo teksture v neorientiranih elektropločevinah so AlN in MnS. Karbidi, ki tudi nastajajo, so velikosti 10–400 nm in imajo ob večji gostoti / v primeru večje gostote delcev na enoto volumna zelo škodljive posledice. Proces rasti kristalnih zrn med primarno rekristalizacijo je odvisen od števila in razpršenosti primarnih vključkov. Sekundarni vključki imajo lahko negativni učinek na sekundarno rekristalizacijo in s tem vplivajo na razvoj teksture. Tako lahko razvoj teksture nadzorujemo z vsebnostjo vključkov AlN in MnS.

2.2.2.4 Tekstura

Tekstura je populacija kristalografskih orientacij, katerih posamezne komponente pripadajo mestom v mikrostrukturi in jo lahko opišemo v smislu statistične porazdelitve [35].

Teksturo materialov lahko določamo z uklonskimi metodami, s pomočjo uklona rentgenskih žarkov, elektronov ali nevtronov. V silicijevih jeklih je možen tudi način s kemijskim jedkanjem (»metoda jedkalnih figur«). Najbolj uveljavljeni metodi sta, glede na literaturne vire, rentgenski uklon XRD in uklon povratno sipanih elektronov EBSD [35, 36].

Z uklonsko metodo polikristalnega vzorca dobimo (makro)teksture, medtem ko nam meritve teksture po posameznih zrnih dajo mikrotekture [35, 36].

Teksture prikazujemo v različnih oblikah:

- v obliki polovih figur,
- v obliki inverznih polovih figur in
- v obliki orientacijske porazdelitvene funkcije v Eulerjevem prostoru.

Orientacija zrn je lahko podana kot orientacijska matrika, s kristalografskimi indeksi ali z Eulerjevimi koti.

Elektropločevini lahko določamo teksturo tudi z rentgenskim uklonom. Geometrijske parametre njene mikrostrukture opišemo s koordinatami (xyz), ki so najbolj odvisni od smeri valjanja RD (slika 5). Kristalna zrna imajo tudi različno kristalografsko orientacijo glede na ravnino vzorca, ki jo podamo s kotnimi koordinatami φ_1 , Φ , φ_2 [36].

Prostor orientacijske porazdelitvene funkcije $f(g)$ je določen z že omenjenimi Eulerjevimi koti $\varphi_1\Phi\varphi_2$. Ker je ODF (orientacijska porazdelitvena funkcija) tridimenzionalna porazdelitvena funkcija, teksturo prikažemo kot prerez skozi Eulerjev prostor (slika 7) pri stalnem Eulerjevem kotu φ_1 .

Pri tem je:

$f(g)$ – normirana intenziteta ODF.

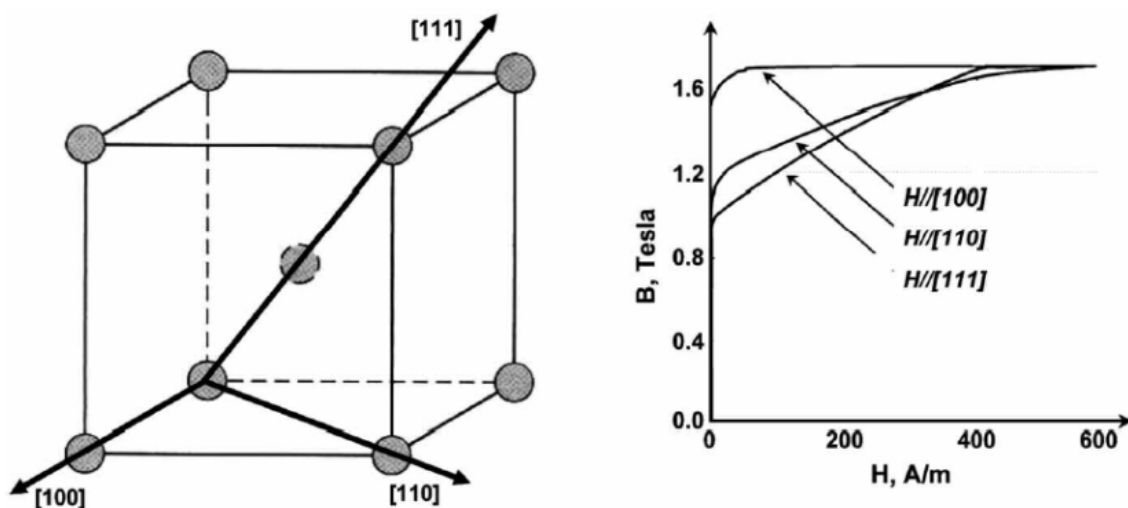
Kadar je $f(g) = 1$ predstavlja verjetnost za vse orientacije v celotnem Eulerjevem prostoru.

Kadar je $f(g) > 1$ je volumenski delež kristalnih zrn, katerih ravnine ležijo vzporedno z ravnino pločevine, večji od statističnega povprečja.

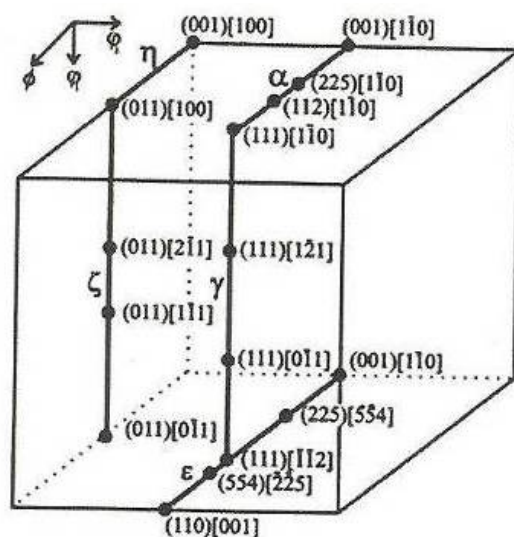
g – orientacija, opisana s tremi Eulerjevimi koti (Bungejeva notacija $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$).

V neorientiranih elektropločevinah je optimalna tekstura naključna kubična tekstura (001)[uv0], kjer ima vsako kristalno zrno ravnino <100> v ravnini elektropločevine [1, 2, 36].

Na sliki 5 so prikazane magnetilne krivulje monokristala prostorsko centrirane kubične mreže železa, v odvisnosti od kristalografske smeri. Vidimo, da so magnetno trde lege (111), ki si jih v mehkomagnetnih materialih, kot so elektropločevine, ne želimo.



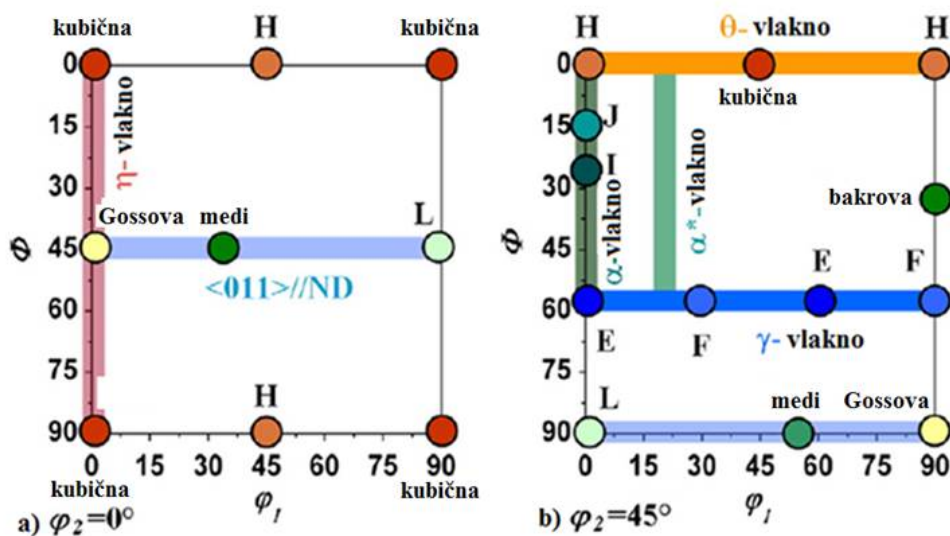
Slika 5: Magnetilne krivulje monokristala prostorsko centrirane kubične mreže železa kot funkcija kristalografske smeri [1]



Slika 6: Lega pomembnih teksturnih vlaken v t.c.k. kristalih [37]

Teksturna vlakna, ki so pomembna za neorientirane elektropločevine in orientacije, ki jih spremljamo, so [19, 37]:

α (alfa):	$\langle 110 \rangle \parallel \text{RD}$	od $\{001\} \langle 110 \rangle$ do $\{110\} \langle 110 \rangle$; kot $\Phi = 0^\circ - 90^\circ$.
γ (gama):	$\langle 111 \rangle \parallel \text{ND}$	od $\{111\} \langle 110 \rangle$ do $\{111\} \langle 112 \rangle$; kot $\varphi_1 = 60^\circ - 90^\circ$.
ε (epsilon):	$\langle 011 \rangle \parallel \text{TD}$	od $\{001\} \langle 110 \rangle$ do $\{110\} \langle 001 \rangle$; kot $\Phi = 0^\circ - 90^\circ$.
η (eta):	$\langle 100 \rangle \parallel \text{RD}$	od $\{001\} \langle 100 \rangle$ do $\{011\} \langle 100 \rangle$; kot $\Phi = 0^\circ - 45^\circ$.



Slika 7: Glavne tekture in teksturna vlakna neorientirane elektropločevine pri: a) $\varphi_2 = 0^\circ$ in b) $\varphi_2 = 45^\circ$ [19]

Najpogosteje uporabljamo prereza pri $\varphi_2=0^\circ$ in $\varphi_2=45^\circ$, saj omogočata spremljanje najpomembnejših teksturnih vlaken v silicijevih elektropločevinah [19].

Izsledki raziskav kažejo [17], da se tekstura v industrijskih vzorcih gotove neorientirane elektropločevine pogosto razlikuje od idealne $\{100\}\langle 0vw \rangle$. Skupna značilnost tekstur industrijskih gotovih neorientiranih elektropločevin je v tem, da se texture izdelanih posameznih kolobarjev medsebojno razlikujejo, vendar pa v določeni meri ohranjajo skupne značilnosti, ki so funkcija ponovljivosti tehnološkega procesa.

Intenziteta teksturiranosti in razmerje med posameznimi teksturnimi komponentami pomembno prispevajo k vrednosti magnetnih izgub. Različna razmerja med teksturnimi vlakni so posledica različnega razvoja texture, ki je v pomembni meri odvisen predvsem od postopkov toplotne obdelave [17].

Veliko avtorjev je že preučevalo procese razvoja texture v elektropločevinah [1, 2, 4, 17, 19, 24, 26, 29–32, 35–37]. Ti procesi so odvisni od stopnje legiranja (največ prispeva silicij), stopnje deformacije in toplotne obdelave hladno valjane pločevine z žarjenjem.

Procesi razvoja texture v elektropločevinah dokončno potečejo med zaključno toplotno obdelavo.

2.3 Magnetno staranje

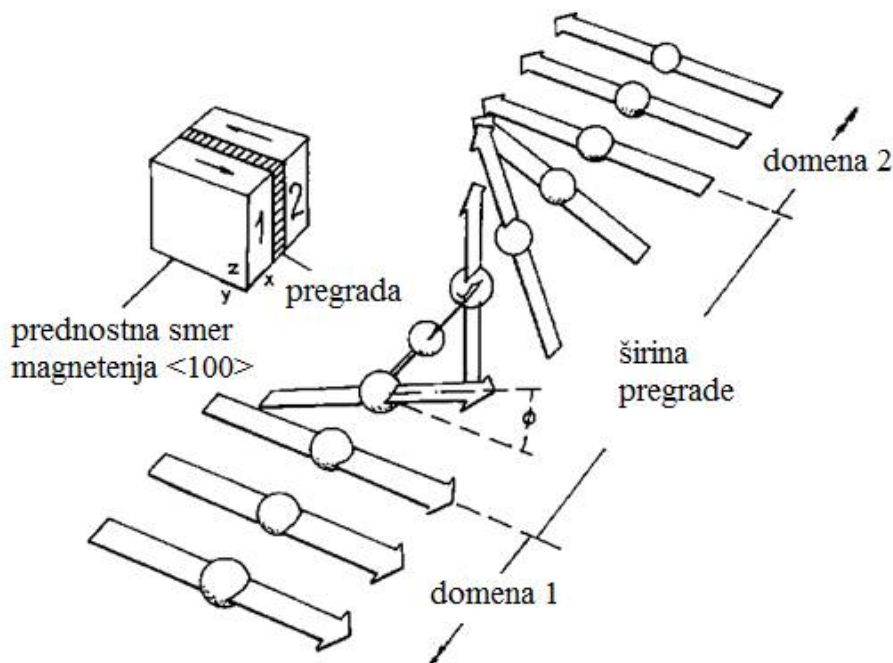
Magnetno staranje [5–7] je rezultat procesa oviranja gibanja Blochovih sten oziroma zmanjšanja mobilnosti in rotacije magnetnih domen [1]. Na gibanje magnetnih domen močno vpliva število nekovinskih vključkov in izločkov. Posledica magnetnega staranja so povišane magnetne izgube.

Ogljik v obliki ϵ -karbida se skupaj z nitridi izloča znotraj kristalnih zrn, s tem pa nastanejo ovire za gibanje Blochovih sten.

Feromagnetno železo sestoji, gledano fizikalno, iz Weissovih področij (domen), v katerih so elektronski spini orientirani paralelno. Ta področja so med seboj ločena z Blochovimi stenami, to je s prehodnimi plastmi, katerih debelina zavzema določen volumen in vsebuje neko višjo energijo kot okoliški kristal [1].

S strani magnetenja se kot vključek v magnetni domeni obravnava vsako področje, ki ima drugačno spontano magnetenje od okoliškega materiala ali pa sploh nima magnetenja [24]. Eden izmed razlogov

za ovirano gibanje meje magnetne domene je v tem, da se magnetna domena želi oprijeti vključka in posledično zmanjšati energijo pregrade. Pregrade med magnetnimi domenami so meje med področji, v katerih ima spontano magnetenje različno usmerjenost. Ob pregradi ali znotraj nje mora magnetenje spremeniti smer kristalografske usmeritve [24].



Slika 8: Zgradba 180 ° Blochove stene [1]

Spini znotraj pregrade, na sliki 8, so usmerjeni izven smeri prednostnega magnetenja, tako da je energija kristalne anizotropije znotraj pregrade večja, kot je v sosednjih magnetnih domenah. Medtem ko izmenjalna energija poskuša ustvariti čim širšo pregrado med magnetnimi domenami, anizotropna energija tanjša pregrado in zmanjša število spinov, ki niso usmerjeni v smeri prednostnega magnetenja [35].

Posledica izločenih karbidov in nitridov je poslabšanje elektromagnetnih lastnosti. Izločki imajo negativen vpliv, ker med drugim omejujejo tudi rast kristalnih zrn med žarjenjem pločevine in vplivajo na koercitivnost železa. Da bi zagotovili dobre magnetne lastnosti, moramo skrbno spremljati in minimizirati vsebnost elementov nečistoč že pri sami izdelavi elektropločevin.

Razogljčenje je namenjeno zmanjšanju vsebnosti ogljika v materialu, da preprečimo magnetno staranje [1, 2, 38].

Mednarodni standard SIST EN 10106:2015 [16] določa, da je treba vzorce neorientirane elektroplöčevine pred merjenjem elektromagnetnih lastnosti magnetno starati. To pomeni, da je treba vzorce segreti na $225 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, za čas 24 h in jih počasi ohladiti na sobno temperaturo [16].

Magnetno staranje ovrednotimo s pomočjo izračuna tako, da ugotovimo spremembo magnetnih lastnosti, in sicer s pomočjo izračuna magnetnega staranja [14]:

$$M_A = \left(\frac{P_a - P_b}{P_b} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

P_a – vrednosti izgub pri magnetenju po magnetnem staranju v $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$

P_b – vrednosti izgub pri magnetenju pred magnetnim staranjem v $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$

2.4 Merjenje elektromagnetnih lastnosti neorientiranih elektroplöčevin

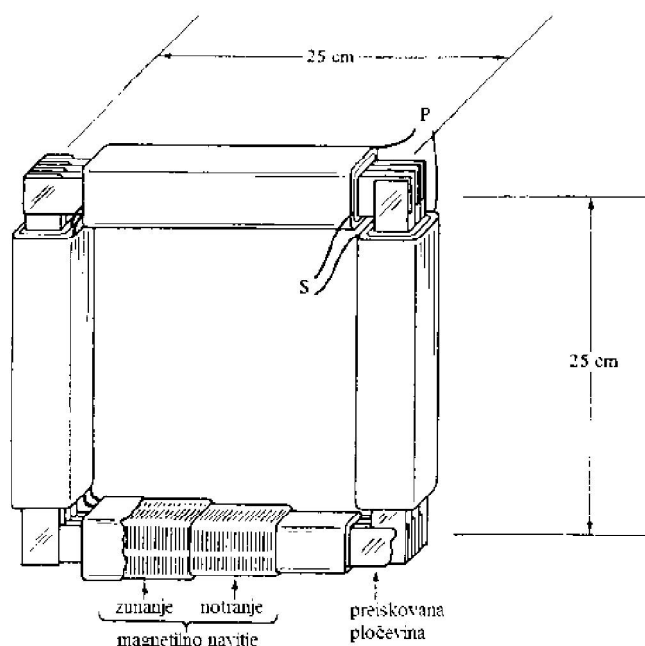
Pogoje merjenja elektromagnetnih lastnosti vzorcev določa standard DIN EN 60404-2:2009 [39].

Standard določa metodo za merjenje elektromagnetnih lastnosti v Epsteinovem jarmu, ki simulira delovanje transformatorja pri ničelni obremenitvi. Standardizirana metoda uporablja za merjenje elektromagnetnih lastnosti vzorec, ki se imenuje Epsteinov paket in je sestavljen iz najmanj 16 ploščic. Polovica ploščic je rezanih v smeri valjanja, polovica ploščic je rezanih pravokotno na smer valjanja.

Zahtevane dimenzije vzorcev (ploščic) so:

- dolžina ploščic $280 \text{ mm} \leq l \leq \text{do } 320 \text{ mm}$, s toleranco $\pm 0,5 \text{ mm}$;
- širina ploščic $30 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$.

Ploščice je treba zložiti v solenoide, ki so razporejeni v obliki kvadrata s stranico 25 cm (slika 9). Vsak solenoid ima vsaj 175 ovojev primarnega in sekundarnega navitja [14, 24, 40].

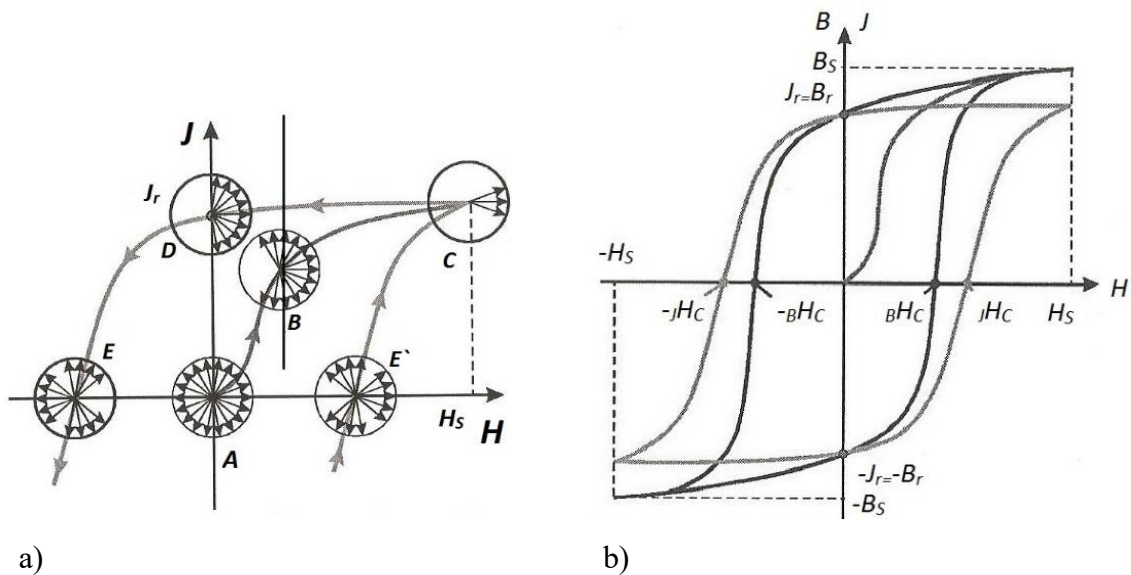


Slika 9: Shematski prikaz Epsteinovega jarma [14]

2.5 Izgube pri magnetenju

Magnetne lastnosti magnetnih materialov običajno opisujemo z magnetilno krivuljo in histereznim zanko, ki grafično ponazarjata odvisnost gostote magnetnega pretoka B od poljske jakosti H (H_c koercitivna magnetna poljska jakost), prva v primeru magnetenja, druga pa v primeru premagnetanja materiala [15]. Če namesto gostote magnetnega pretoka B uporabimo polarizacijo J , dobimo polarizacijsko histereznim zanko, slika 10b. Prikaz magnetilnega procesa je prikazan na sliki 10a. Delu krivulje od točke A do točke C pravimo magnetilna krivulja. Delu krivulje od točke D do točke E pravimo razmagnetilna krivulja, ki je pomembna za trdomagnetne materiale, saj je na njej delovna točka.

Za merjenje normalne magnetilne krivulje se uporablja razmagnetni vzorec v odsotnosti magnetnega polja, tako da je $H = 0$ in $B = 0$. V praksi vzorec razmagnetimo s tem, da ga izpostavimo izmeničnemu magnetnemu polju, ki se mu zmanjšuje amplituda, dokler ne doseže ničnega stanja [24]. Pri $H = 0$ in $B = 0$ je merilnik magnetnega pretoka nastavljen na nično vrednost. Z naraščajočo jakostjo magnetnega polja znotraj glavne histerezne zanke dobimo neskončno število majhnih simetričnih zank. Z združitvijo njihovih konic dobimo magnetilno krivuljo (slika 10b) [24].



Slika 10: a) Magnetilni proces in smeri domen magnetnega polja in b) Magnetilna krivulja ter histerezna zanka gostote magnetnega pretoka in magnetne polarizacije [15]

Osnovno enačbo za izračun magnetnih izgub je predstavil C. P. Steinmetz [41]. Steinmetzova enačba z dodanim Bertottijevem členom anomalnih magnetnih izgub se imenuje modificirana Steinmetzova enačba [42] in temelji na statistični teoriji magnetnih izgub s fizikalno razlago za delitev izgub na komponento vrtilnih, histereznih in anomalnih magnetnih izgub. Vrtinčne magnetne izgube opisuje kot s kvadratom odvisne od frekvence magnetenja, anomalne magnetne izgube pa z opisom dinamike magnetenja v smislu naključnih interakcij med pregradami magnetnih domen.

Z Epsteinovo metodo izmerimo skupne izgube $P_{skup.}$ pri magnetenju. Splošna razdelitev izgub pri magnetenju je prikazana z enačbo 2 [15]:

$$P_{skup.} = P_{hist.} + P_{vrt.} + P_{anom.} \quad [\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2)$$

$P_{hist.}$ – histerezne magnetne izgube v $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$,

$P_{vrt.}$ – vrtilne magnetne izgube v $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$,

$P_{anom.}$ – anomalne magnetne izgube v $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Histerezne magnetne izgube izračunamo po enačbi 3 [15]:

$$P_{hist.} \cong 0,004 \cdot \frac{f \cdot H_c \cdot \hat{B}}{\rho} \quad [\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3)$$

f – frekvenca v Hz,

H_c – koercitivna magnetna poljska jakost v $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$,

$\hat{B}$ – največja dosežena gostota magnetnega pretoka v T,

ρ – gostota v $\text{g} \cdot \text{cm}^3$.

V statističnem modelu ločitve magnetnih izgub je Bertotti [42] izpeljal formulo za oceno anomalnih magnetnih izgub na cikel magnetenja, kot posledico lokalno induciranih električnih tokov v [24]:

$$P_{anom.} = \frac{8}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{G \cdot A \cdot V_0}{\rho_r}} B^{3/2} \cdot f^{1/2} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4)$$

ρ_r – specifična električna upornost elektropločevine v $\Omega \cdot \text{m}$,

A – površina preseka lamele v m^2

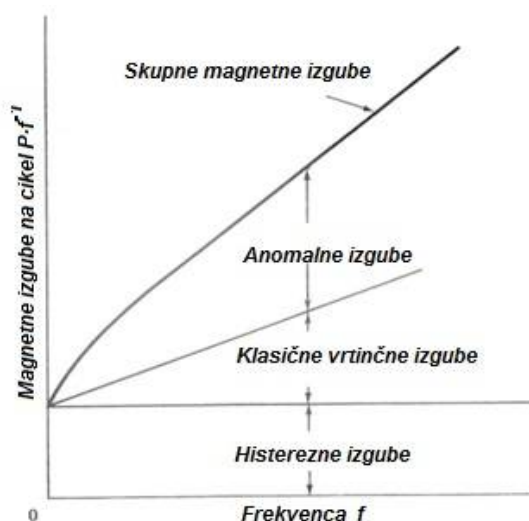
G – Bertottijev parameter za izračun anomalnih magnetnih izgub ($G \sim 0,1356$),

V_0 – parameter, odvisen od lokalne stohastične koercitivne magnetne poljske jakosti,

B – gostota magnetnega pretoka v T.

Formula je validirana samo za materiale, kjer je število aktivnih magnetnih objektov proporcionalno magnetnemu polju, kar velja v primeru neorientiranih elektropločevin. Bertotti omenja, da je faktor V_0 obratno sorazmeren preseku vzorca, zato so v elektropločevinah anomalne magnetne izgube neodvisne od geometrije vzorca [24].

Na sliki 11 je prikazano, kako skupne magnetne izgube na cikel magnetenja linearno naraščajo s frekvenco. Pri nizkih frekvencah je večanje magnetnih izgub nelienarno, oziroma postanejo anomalne magnetne izgube zanemarljivo majhne, in sicer kot posledica mobilnosti magnetnih domen.



Slika 11: Konvencionalna razdelitev magnetnih izgub v elektropločevini [1]

S pomočjo modelov (za napovedovanje magnetnih izgub) lahko proizvajalci motorjev optimalno načrtujejo magnetne izgube in tako ustrezno izberejo ustrezno kakovost elektropločevine. S pomočjo enačb lahko določijo splošne zaključke takrat, ko želijo pri določeni frekvenci in delovni točki (pogoji delovanja motorja) imeti čim manjše magnetne izgube.

Vrtilne magnetne izgube so bile izpeljane iz Maxwelllove enačbe [43] in so zapisane z enačbo 5:

$$p_{vrt.} = \frac{\pi^2 \cdot \hat{B}^2 \cdot f^2 \cdot d^2}{6 \cdot \rho} \quad [\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5)$$

d – debelina elektropločevine v m

Enačba velja ob predpostavki, da je preiskovani material električno in magnetno popolnoma homogen. V praksi magnetni materiali niso homogeni, električna nehomogenost je posledica različne specifične električne upornosti po preseku materiala [44], magnetna nehomogenost pa izvira iz mikrostrukturnih in nanostrukturnih nehomogenosti materiala ter prisotnosti magnetnih domen, ki pa jih enačba ne upošteva [45]. Zaradi teh odstopanj prihaja do razlik med izračunanimi in izmerjenimi magnetnimi izgubami, zato sta R. H. Pry in C. P. Bean leta 1958 izpeljala še tretjo komponento, anomalne magnetne izgube, katerih vrednost izgub je predstavljala razliko med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi ter sta jo razlagala z dinamiko magnetnih domen [46].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

V eksperimentalnem delu smo kot osnovo za študij magnetnega staranja izbrali štiri različne kakovosti neorientirane elektropločevine.

Pogoja staranja, ki ju določa standard SIST EN 10106:2015 [16], sta temperatura magnetnega staranja 225 ± 5 °C in čas magnetnega staranja 24 h. Poleg standardnih pogojev smo v eksperimentalnem delu poleg vzorcev, ki jih nismo magnetno starali, izbrali še tri dodatne pogoje magnetnega staranja.

Glede na kemijsko analizo neorientiranih elektropločevin in njihovega deleža magnetnega staranja smo izbrali še vzorce za nadaljnje eksperimentalno delo, ki je obsegalo metalografsko analizo vzorcev in merjenje magnetnih lastnosti.

3.1 Materiali in vzorčenje

Vzorci, ki smo jih uporabili v magistrskem delu, smo pridobili v SIJ Acroni d. o. o, kjer smo prav tako izvedli vse meritve in analize, potrebne za magistrsko delo.

SIJ Acroni d. o. o. je proizvajalec neorientirane elektropločevine v Sloveniji in v njihovem programu izdelkov je več vrst neorientiranih elektropločevin. V magistrskem delu smo se osredotočili le na najbolj prodajane vrste neorientiranih elektropločev debeline 0,50 mm.

Glede na standard SIST EN 10106:2015 [16] smo izbrali štiri različne industrijske kakovosti debeline pločevine 0,50 mm:

- EV21 ustreza –kakovosti –M310-50A,
- EV18 ustreza – kakovosti M350-50A,
- EV15 ustreza – kakovosti M530-50A in
- EV12 ustreza – kakovosti M600-50A.

V izbranih kakovostih se vsebnost silicija giblje od 1,13 mas.% do 2,15 mas.%, kar opisujejo tudi imena industrijskih vzorcev kakovosti (primer: EV12 vsebuje cca. 1,2 mas. % Si).

Druga smernica za magistrsko delo je bila vsebnost končnega ogljika v pločevini po končnem razogljčenju, zato smo z izborom vzorcev začeli pri rezultatih analize vsebnosti ogljika po razogljčenju. Za določitev kemijske sestave neorientiranih elektropločevin smo uporabili standardne tehnike analize kemije, za analizo ogljika pa instrument LECO CS 200.

V tabeli 1 so zbrani podatki o kakovosti in kemijski analizi za vzorce, ki smo jih izbrali glede na vsebnost končnega ogljika.

Tabela 1: Vzorci neorientiranih elektropločevin za eksperimentalno delo (kakovost, kemijska analiza)

Št. vzorca	Kakovost	mas. % C*	mas. % C**	mas. % Si*	mas. % Al*	mas. % Mn*	mas. % S*	mas. % P*	mas. % Cr*	mas. % Ni*	mas. % Cu*	mas. % N*
1	EV21	0,007	0,0014	2,147	0,555	0,470	0,002	0,069	0,1600	0,3100	0,382	0,0048
2	EV21	0,007	0,0021	2,142	0,554	0,500	0,001	0,069	0,3100	0,2100	0,329	0,0033
3	EV21	0,005	0,0020	2,149	0,596	0,487	0,004	0,064	0,3000	0,2900	0,364	0,0043
4	EV21	0,017	0,0027	2,138	0,483	0,456	0,001	0,062	0,3000	0,3200	0,343	0,0023
5	EV21	0,011	0,0033	2,149	0,598	0,516	0,001	0,076	0,5200	0,2300	0,305	0,0037
6	EV21	0,014	0,0028	2,180	0,543	0,526	0,001	0,065	0,2600	0,2700	0,378	0,0040
7	EV18	0,011	0,0013	1,772	0,579	0,254	0,001	0,017	0,3100	0,1800	0,383	0,0044
8	EV18	0,013	0,0021	1,777	0,479	0,291	0,001	0,013	0,4800	0,2200	0,227	0,0034
9	EV18	0,009	0,0039	1,771	0,528	0,265	0,001	0,042	0,4900	0,2400	0,401	0,0036
10	EV18	0,007	0,0016	1,788	0,566	0,263	0,001	0,012	0,1800	0,2500	0,387	0,0044
11	EV18	0,008	0,0014	1,780	0,586	0,251	0,002	0,018	0,2500	0,2800	0,378	0,0042
12	EV18	0,007	0,0013	1,772	0,498	0,239	0,001	0,019	0,2600	0,2600	0,413	0,0038
15	EV15	0,002	0,0010	1,462	0,221	0,276	0,002	0,015	0,3300	0,4900	0,332	0,0054
16	EV15	0,006	0,0016	1,475	0,247	0,267	0,001	0,021	0,3200	0,2100	0,320	0,0053
17	EV15	0,007	0,0012	1,478	0,255	0,237	0,001	0,016	0,3900	0,2700	0,397	0,0050
18	EV15	0,009	0,0013	1,478	0,216	0,253	0,006	0,022	0,2400	0,2300	0,394	0,0055
26	EV15	0,009	0,0020	1,448	0,247	0,311	0,001	0,015	0,3100	0,3800	0,297	0,0050
27	EV15	0,010	0,0025	1,440	0,224	0,218	0,002	0,015	0,2200	0,2100	0,311	0,0052
19	EV12	0,005	0,0015	1,090	0,121	0,247	0,002	0,012	0,3000	0,2400	0,344	0,0060
20	EV12	0,007	0,0016	1,115	0,083	0,257	0,001	0,012	0,2900	0,2400	0,258	0,0056
21	EV12	0,008	0,0016	1,091	0,096	0,214	0,001	0,013	0,3400	0,2500	0,337	0,0070
22	EV12	0,009	0,0033	1,093	0,133	0,308	0,002	0,008	0,2200	0,1790	0,197	0,0059
23	EV12	0,016	0,0037	1,126	0,128	0,259	0,004	0,009	0,2400	0,2470	0,220	0,0057
24	EV12	0,005	0,0015	1,122	0,103	0,260	0,002	0,028	0,6000	0,3500	0,359	0,0061

* mas. % elementa v saržni analizi

** mas. % C po žarjenju za razogljčenje

Izbrani vzorci za nadaljnje analize z:

nizkim deležem ogljika
visokim deležem ogljika



3.2 Žarjenje za magnetno staranje

Kot smo že omenili, standard SIST EN 10106:2015 [16] predpisuje pogoje magnetnega staranja za neorientirane elektropločevine, in sicer: $225 \pm 5 \text{ °C}$ in $t = 24 \text{ h}$.

Izbrani pogoji so bili:

Nestarani vzorci (končno stanje po razogljichenju in rekristalizacijskem žarjenju na liniji CRNO),

A – vzorci, magnetno starani pri pogojih: $T = 225 \text{ °C}$ in $t = 24 \text{ h}$ (standardni pogoji),

B – vzorci, magnetno starani pri pogojih: $T = 225 \text{ °C}$ in $t = 12 \text{ h}$,

C – vzorci, magnetno starani pri pogojih: $T = 300 \text{ °C}$ in $t = 24 \text{ h}$,

D – vzorci, magnetno starani pri pogojih: $T = 300 \text{ °C}$ in $t = 12 \text{ h}$.

Magnetno staranje ploščic pri vseh pogojih smo izvedli v laboratorijski sušilni peči BOSIO tip: EUP-KV105/300 (slika 12). Vzorce smo ogreli do določene temperature 225 °C oziroma 300 °C in jih na temperaturi zadrževali 12 h oziroma 24 h. Vzorce smo po magnetnem staranju počasi ohladili na zraku. Atmosfera v peči je bila zrak.



Slika 12: Laboratorijska sušilna peč EUP-KV105/300, v kateri smo magnetno starali vzorce

3.3 Merjenje elektromagnetnih lastnosti

Standard DIN EN 60404-2:2009 [39] predpisuje pogoje in način merjenja elektromagnetnih lastnosti neorientiranih elektropločevin v Epsteinovem jarmu, ki je prikazan na sliki 13.



Slika 13: Epsteinov jarem, v katerem smo merili elektromagnetne lastnosti vzorcev pred in po magnetnem staranju

Meritve nestaranih in magnetno staranih vzorcev smo izvedli na merilniku elektromagnetnih lastnosti MPG 200D proizvajalca Brockhaus Messtechnik, ki je prikazan na sliki 14.



Slika 14: Merilnik elektromagnetnih lastnosti MPG 200D

Na merilniku elektromagnetnih lastnosti MPG smo nastavili pogoje, pod katerimi smo izvedli meritve na vseh vzorcih:

- gostota magnetnega pretoka: 0,1 T do 1,0 T, korak 0,1 T in
- frekvenca: 50 Hz do 700 Hz, korak 50 Hz.

Prostorski temperaturni pogoji merjenja: 23 °C.

Na merilniku smo izmerili elektromagnetne lastnosti vseh vzorcev neorientirane elektropločevine (tabela 1). Rezultati deležev magnetnega staranja so zbrani v tabeli 2 (magnetno staranje pri vseh pogojih).

3.4 Razdelitev magnetnih izgub

Rezultate izmerjenih elektromagnetnih lastnosti smo s pomočjo modificirane Steinmetzove enačbe in metodologije modela, ki ga je izpeljal Novak s sodelavci [24, 47], uporabili za razdelitev skupnih izmerjenih magnetnih izgub ($P_{skup.}$) na histerezne, vrtilne in anomalne magnetne izgube [6]:

$$P_{skup.} = P_{hist.} + P_{vrt.} + P_{anom.} \quad (6)$$

Kjer so:

$P_{hist.}$, $P_{vrt.}$ in $P_{anom.}$ histerezne, vrtilne in anomalne izgube pri magnetenju v $W \cdot kg^{-1}$

$k_{hist.}$, $k_{vrt.}$ in $k_{anom.}$ koeficienti histereznih, vrtilnih in anomalnih izgub pri magnetenju

f frekvenca v Hz

n Steinmetzov koeficient

B gostota magnetnega pretoka v T

Koeficienti histereznih, vrtilnih in anomalnih magnetnih izgub so poleg snovnih lastnosti odvisni tudi od zložitvenega faktorja, debeline in izolacije na površini elektropločevine [48].

3.5 Metalografska analiza

Metalografsko smo analizirali izbrane vzorce, pri tem pa uporabili svetlobni mikroskop OLYMPUS DP12 (slika 15). Pred izvedbo metalografske analize smo vzorce metalografsko pripravili z mehanskim brušenjem, poliranjem in jedkanjem. Za jedkanje smo uporabili jedkalo 3 % nital (97 vol. % etanola in 3 vol. % HNO_3). Velikost kristalnih zrn smo določili skladno s standardom ASTM E112-10 (2010) [49].



Slika 15: Svetlobni mikroskop

4. REZULTATI

4.1 Vpliv žarjenja na magnetno staranje

Vzorci so bili magnetno starani pri pogojih:

A – T = 225 °C in t = 24 h (po standardu SIST EN 10106:2015 [16]),

B – T = 225 °C in t = 12 h,

C – T = 300 °C in t = 24 h,

D – T = 300 °C in t = 12 h.

Po magnetnem staranju smo vsem vzorcem, nestaranim in magnetno staranim, izmerili elektromagnetne lastnosti v Epsteinovem jarmu. Delež magnetnega staranja smo izračunali po enačbi 1.

$$M_A = \left(\frac{P_a - P_b}{P_b} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

V tabeli 2 so podani rezultati magnetnega staranja vzorcev neorientirane elektropločevine, v odvisnosti od temperature in časa žarjenja.

Tabela 2: Delež magnetnega staranja neorientirane elektroplöčevine v odvisnosti od temperature in časa žarjenja

Št. vzorca	Kakovost	mas. % C*	Magnetno staranje (%)			
			A T = 225 °C t = 24 h	B T = 225 °C t = 12 h	C T = 300 °C t = 24 h	D T = 300 °C t = 12 h
1	EV21	0,0014	0,01	0,93	1,51	1,09
2	EV21	0,0021	1,78	1,67	1,68	1,06
3	EV21	0,0020	0,67	0,13	1,36	0,28
4	EV21	0,0027	3,76	1,62	1,73	1,75
5	EV21	0,0033	5,52	3,28	0,79	1,35
6	EV21	0,0028	1,62	1,30	0,8 5	0,06
7	EV18	0,0013	0,0013	0,56	0,92	0,59
8	EV18	0,0021	20,32	10,56	0,91	1,10
9	EV18	0,0039	93,32	91,86	19,24	20,76
10	EV18	0,0016	0,21	-0,58	0,08	0,11
11	EV18	0,0014	0,63	1,00	0,65	0,94
12	EV18	0,0013	1,94	0,97	1,58	0,55
15	EV15	0,0010	6,79	1,46	0,88	0,22
16	EV15	0,0016	0,31	0,44	0,49	0,12
17	EV15	0,0012	-1,50	-1,44	-2,08	-2,31
18	EV15	0,0013	0,03	-0,26	-0,29	-0,44
26	EV15	0,0020	2,78	1,24	0,65	1,09
27	EV15	0,0025	18,03	12,98	1,31	1,53
19	EV12	0,0015	-0,08	-0,66	-0,84	-1,34
20	EV12	0,0016	1,45	0,52	0,09	-0,16
21	EV12	0,0016	1,67	1,03	2,25	0,76
22	EV12	0,0033	47,56	47,88	29,75	30,52
23	EV12	0,0037	44,37	44,28	25,72	25,59
24	EV12	0,0015	-0,08	0,88	-0,68	-0,43

* mas. % C po žarjenju za razogljičenje

Izbrani vzorci za nadaljnje analize z:

nizkim deležem ogljika

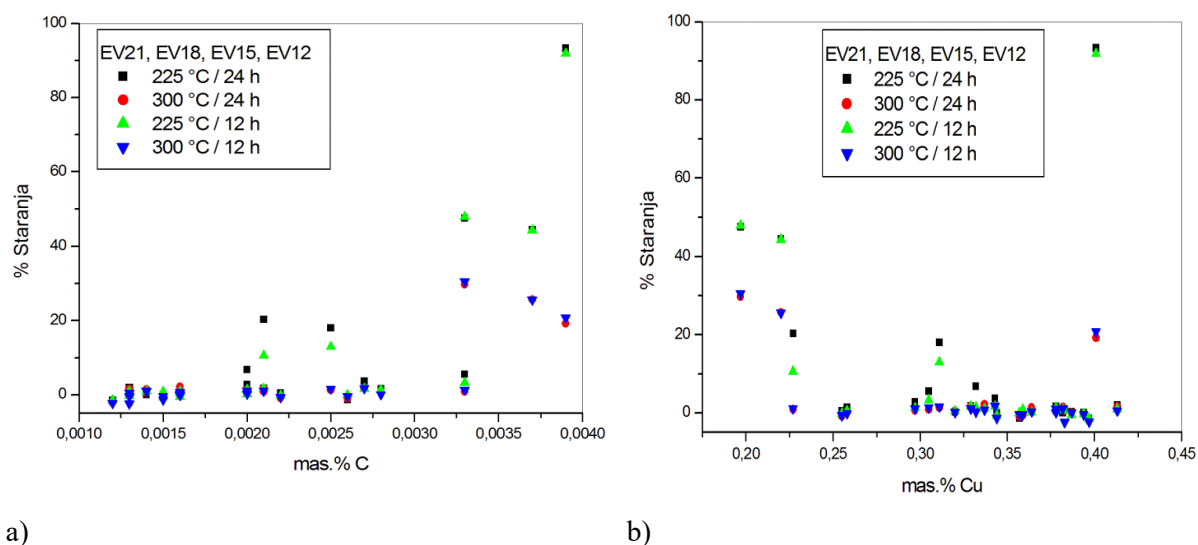
visokim deležem ogljika



4.1.1 Vpliv stopnje legiranja na magnetno staranje

Vrsto elektropločevine določa stopnja legiranja. Ker za izdelavo elektropločevin v SIJ Acroni d. o. o. uporabljamo postopke sekundarne metalurgije, kot vir vložka uporabljamo staro železo in tako v silicijevo jeklo vnesemo različne (oligo) elemente, med njimi tudi baker. Ker vsebnost bakra v silicijevih jeklih narašča [2], smo poleg analize vpliva ogljika naredili tudi analizo vpliva bakra na delež magnetnega staranja v naših vzorcih.

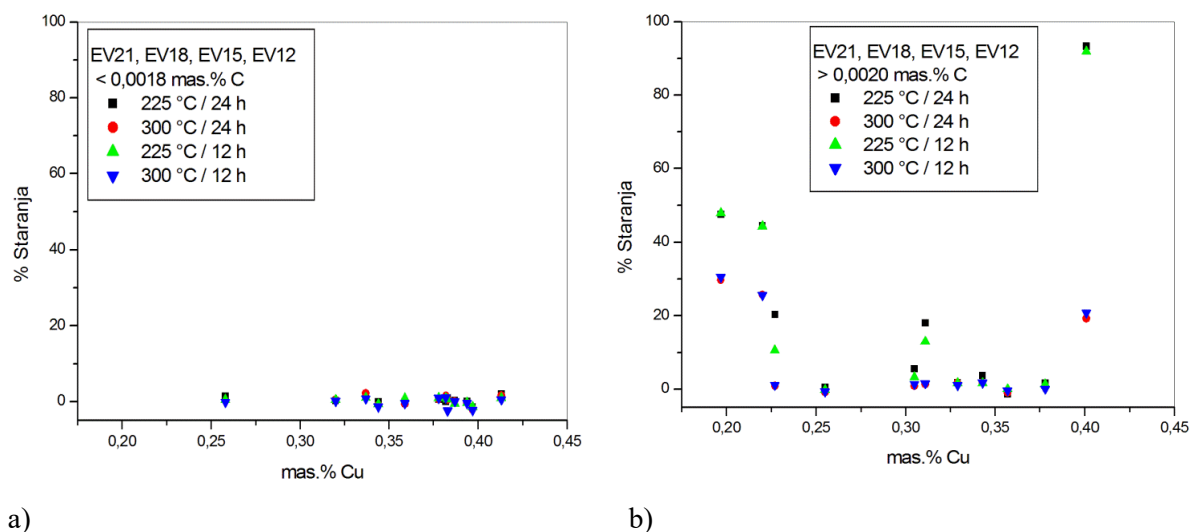
Na sliki 16 je prikazana odvisnost magnetnega staranja od vsebnosti ogljika in bakra. Odvisnosti so prikazane za vse pogoje magnetnega staranja za vzorce, ki so navedeni v tabeli 1 in tabeli 2.



Slika 16: Odvisnost magnetnega staranja od a) vsebnosti ogljika in b) bakra, za vzorce pri vseh pogojih magnetnega staranja

S slike 16a vidimo, kako je delež magnetnega staranja za vse pogoje staranja odvisen od vsebnosti ogljika. Višji kot je delež ogljika, višji je delež magnetnega staranja. Trend rezultatov, prikazanih na sliki 16b, nam nakazuje, da se delež magnetnega staranja znižuje tudi z naraščajočo vsebnostjo bakra v vzorcih.

Slika 17 prikazuje odvisnost magnetnega staranja glede na vsebnost bakra pri različnih vsebnostih ogljika, nizkih ($< 0,0018$ mas. % C) in visokih ($> 0,0020$ mas. % C).

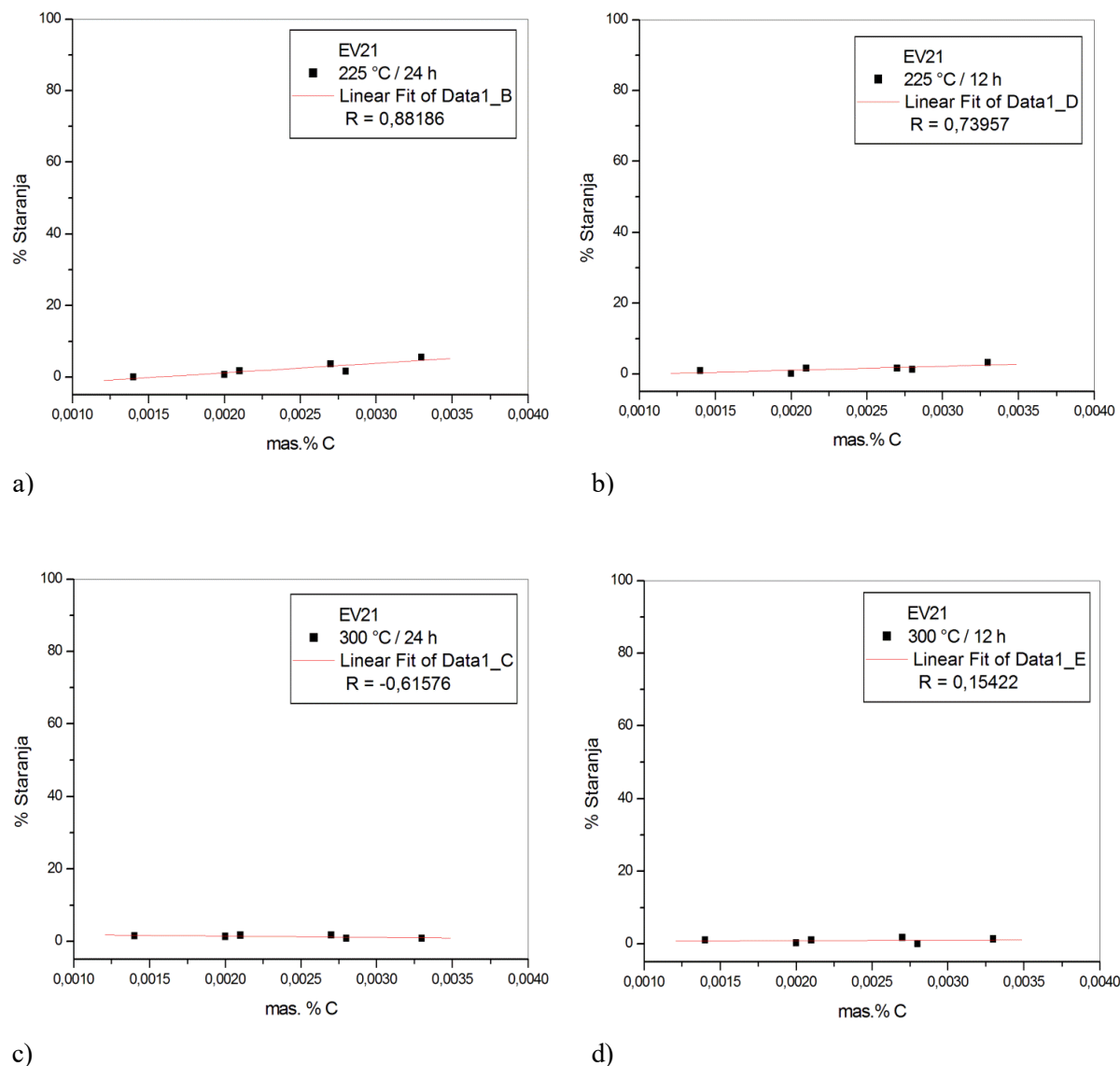


Slika 17: Odvisnost magnetnega staranja od vsebnosti bakra pri a) nizkih vsebnostih ogljika ($< 0,0018$ mas. % C) in b) visokih ($> 0,0020$ mas. % C) vsebnostih ogljika, pri vseh pogojih magnetnega staranja

V vzorcih, v katerih je bil nizek delež ogljika ($< 0,0018$ mas. % C), je bil delež magnetnega staranja majhen (slika 17a). Nasprotno pa na sliki 17b vidimo, da je bil v vzorcih z visokim deležem ogljika ($> 0,0020$ mas. % C) delež magnetnega staranja bolj spremenljiv.

Vidimo, da na delež magnetnega staranja najpomembneje vpliva delež ogljika v vzorcih. Pri nizkih vsebnostih ogljika je delež magnetnega staranja manjši. Pregled rezultatov vpliva bakra na delež magnetnega staranja (slika 17b) nakazuje na nižanje magnetnega staranja z naraščajočo vsebnostjo bakra, do vsebnosti $< 0,40$ mas. % Cu.

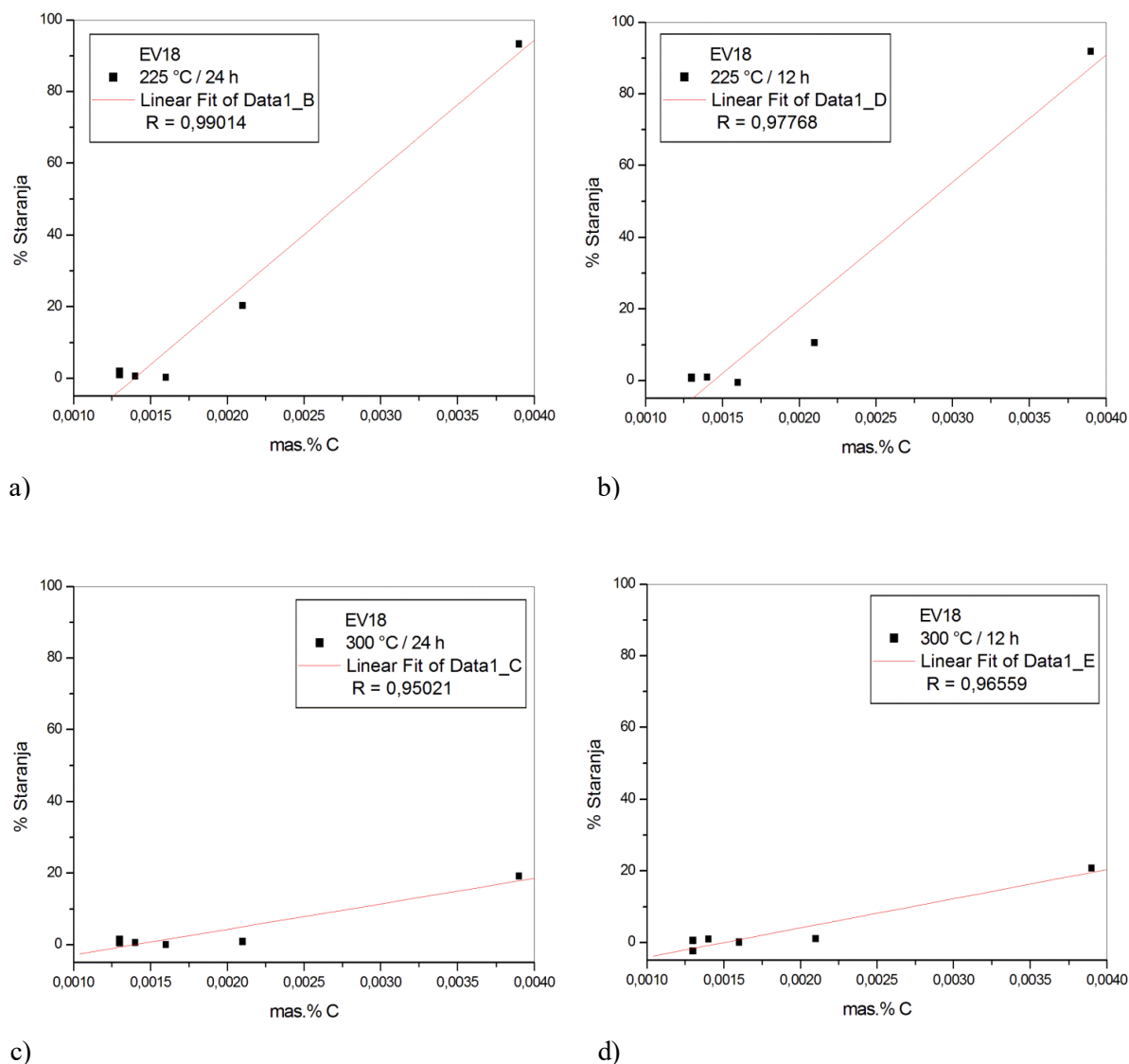
Spodnja slika 18 prikazuje odvisnost magnetnega staranja vzorcev (tabela 2) za kakovost EV21 v odvisnosti od vsebnosti ogljika pri pogojih magnetnega staranja $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter časih $t = 12\text{ h}$ in 24 h .



Slika 18: Diagrami magnetnega staranja v odvisnosti od vsebnosti ogljika za kakovost EV21 pri vseh pogojih magnetnega staranja

Pri kakovosti EV21 se delež magnetnega staranja najbolj poveča pri pogojih: $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = 24\text{ h}$. Pri pogojih magnetnega staranja $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = 12\text{ h}$ je delež magnetnega staranja nekoliko nižji, pri pogojih magnetnega staranja $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h = 24\text{ h}$ in času $h = 12\text{ h}$ pa je delež magnetnega staranja zelo majhen.

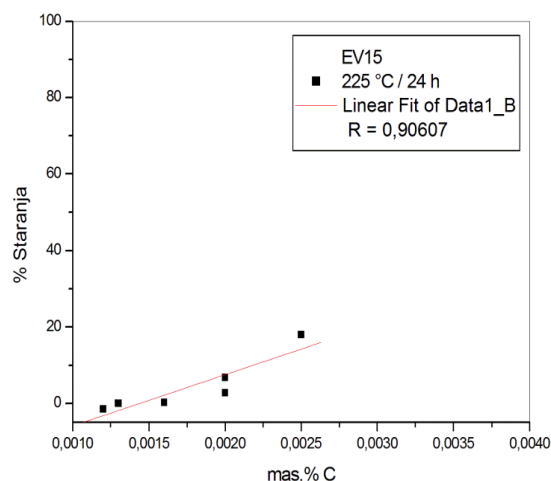
Na sliki 19 je prikazana odvisnost magnetnega staranja za kakovost EV18 pri različnih pogojih magnetnega staranja, za vzorce iz tabele 2 pa v odvisnosti od vsebnosti ogljika.



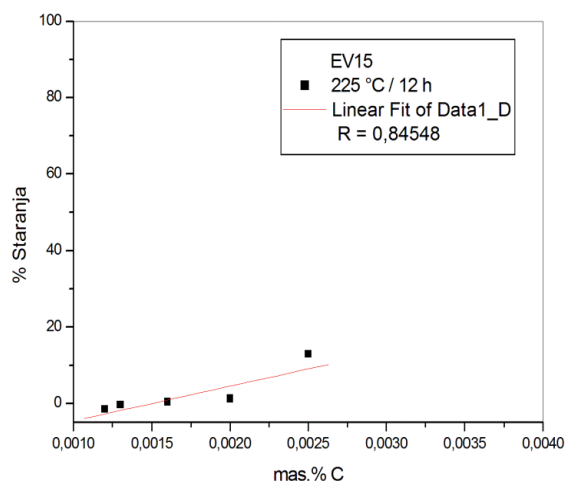
Slika 19: Diagrami magnetnega staranja v odvisnosti od vsebnosti ogljika za kakovost EV18 pri vseh pogojih magnetnega staranja

Pri temperaturi 225 °C in času magnetnega staranja 24 h (slika 19a) in času 12 h (slika 19b) vidimo, da je vzorec z 0,0039 mas. % C v obeh primerih močno magnetno staral (93,32 % in 91,86 %). Na sliki 19c in 19d lahko razberemo, da je isti vzorec z visokim 0,0039 mas. % C pri pogojih magnetnega staranja $T = 300\text{ °C}$ in $t = 24\text{ h}$ ter 12 h manj magnetno staral (19,24 % in 20,76 %).

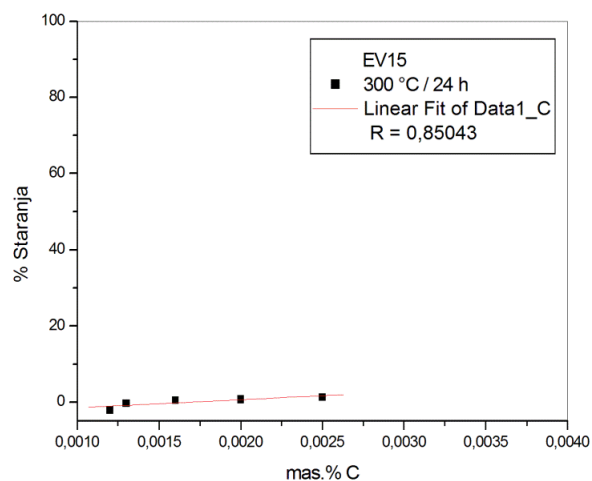
Na sliki 20 so prikazane odvisnosti magnetnega staranja pri vseh pogojih magnetnega staranja za kakovost EV15, za nizke in visoke vsebnosti ogljika.



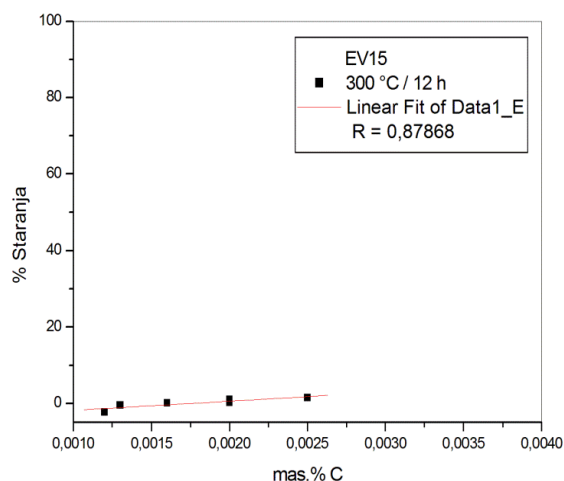
a)



b)



c)

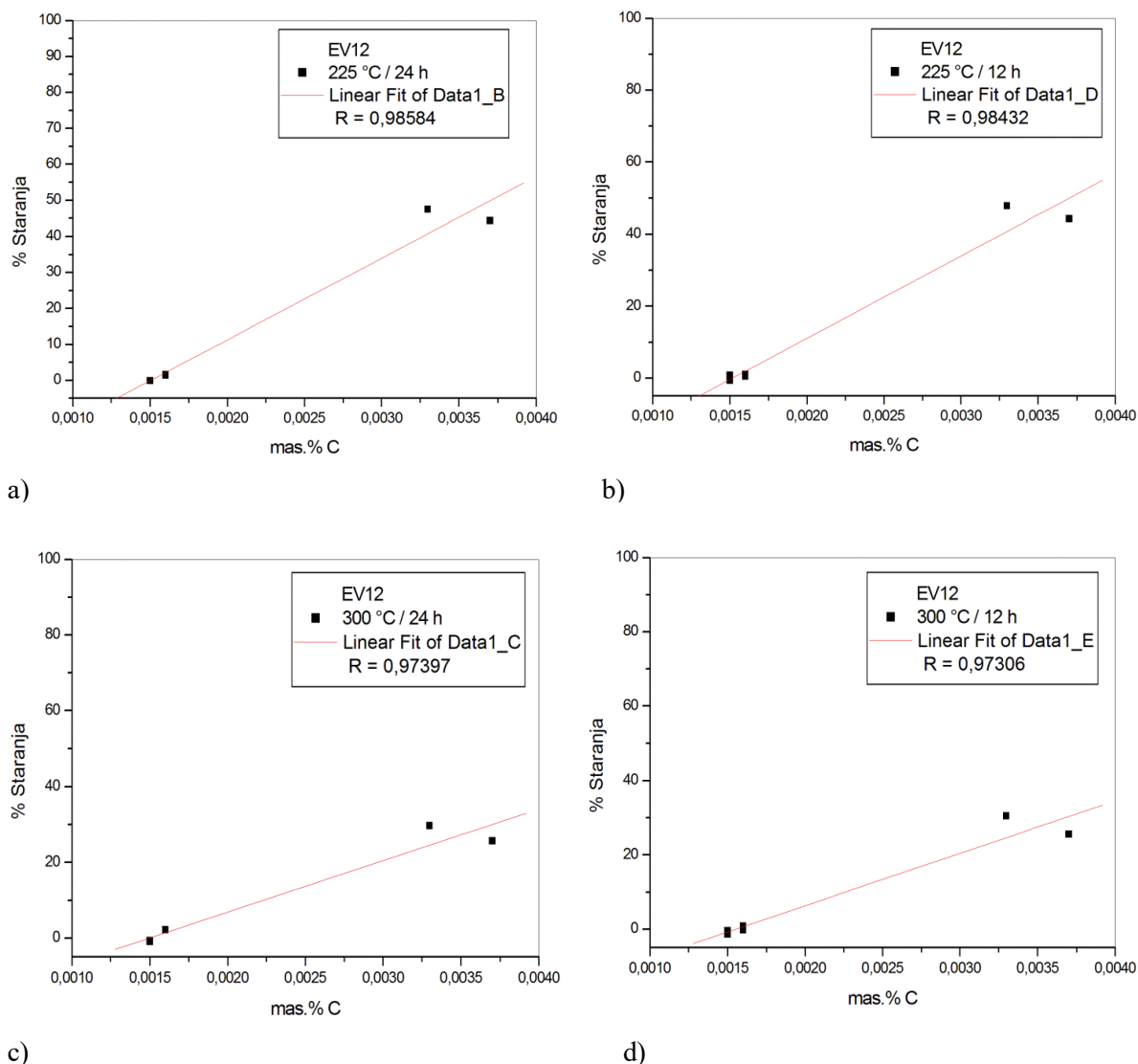


d)

Slika 20: Diagrami magnetnega staranja v odvisnosti od vsebnosti ogljika za kakovost EV15 pri vseh pogojih magnetnega staranja

S slike 20a in slike 20b pri pogojih magnetnega staranja 225 °C ter časih 24 h in 12 h za kakovost EV15 vidimo, da se delež magnetnega staranja povečuje s povišanjem deležem ogljika v vzorcih. Pri pogojih magnetnega staranja 300 °C ter časih 24 h in 12 h pa je glede na enako vsebnost ogljika v vzorcih delež magnetnega staranja nižji.

Slika 21 prikazuje odvisnost magnetnega staranja pri vseh pogojih magnetnega staranja za kakovost EV12 v odvisnosti od vsebnosti ogljika, za vzorce iz tabele 2 (temperatura 225 °C in 300 °C, časi 12 h in 24 h).



Slika 21: Diagrami magnetnega staranja v odvisnosti od vsebnosti ogljika za kakovost EV12 pri vseh pogojih staranja

Iz diagramov na sliki 21a in 21b vidimo, da se za kakovost EV12 z višjo vsebnostjo ogljika v vzorcih povečuje delež magnetnega staranja, in sicer pri pogojih: 225 °C ter časih 24 h in 12 h. Pri pogojih 300 °C ter časih 24 h in 12 h, slika 21c in 21d, se je delež magnetnega staranja glede na ogljik znižal.

4.2 Vpliv magnetnega staranja na koercitivno magnetno poljsko jakost

Koercitivna magnetna poljska jakost je intenziteta zunanega magnetnega polja, ki je potrebna, da izničimo magnetizacijo danega materiala pri njegovi magnetni nasičenosti. Magnetna koercitivnost je lahko merilo za stabilnost materiala v smislu magnetnega staranja.

Na podlagi tega smo za nadaljnje preiskave s pomočjo podatkov iz tabele 2 izbrali iz vsake kakovosti EV21, EV18, EV15 in EV12 po dva vzorca, in sicer enega z nizkim ogljikom ($< 0,0018$ mas. % C) in enega z visokim ogljikom ($> 0,0020$ mas. % C).

Izbrani vzorci za nadaljnje preiskave so zbrani v tabeli 3, kjer so zbrani tudi podatki o pogojih magnetnega staranja in deležu magnetnega staranja.

Tabela 3: Izbrani vzorci za nadaljnje preiskave z nizkim in visokim deležem ogljika

Št. vzorca	Kakovost	mas. % C*	Magnetno staranje (%)			
			A T = 225 °C t = 24 h	B T = 225 °C t = 12 h	C T = 300 °C t = 24 h	D T = 300 °C t = 12 h
1	EV21	0,0014	0,01	1,51	0,93	1,09
5	EV21	0,0033	5,52	0,79	3,28	1,35
7	EV18	0,0013	0,0013	0,92	0,56	0,59
9	EV18	0,0039	93,32	19,24	91,86	20,76
17	EV15	0,0012	-1,50	-2,08	-1,44	-2,31
27	EV15	0,0025	18,03	1,31	12,98	1,53
19	EV12	0,0015	-0,08	-0,84	-0,66	-1,34
23	EV12	0,0037	44,37	25,72	44,28	25,59

* mas. % C po žarjenju za razogljčenje

Izbrani vzorci za nadaljnje analize z:

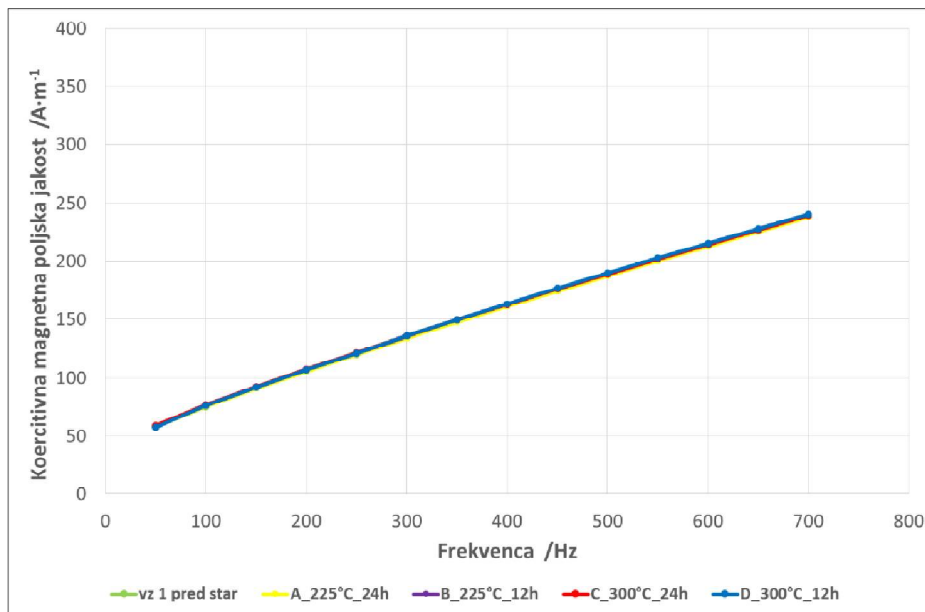
nizkim deležem ogljika	
visokim deležem ogljika	

Preučili smo vpliv koercitivne magnetne poljske jakosti v odvisnosti od:

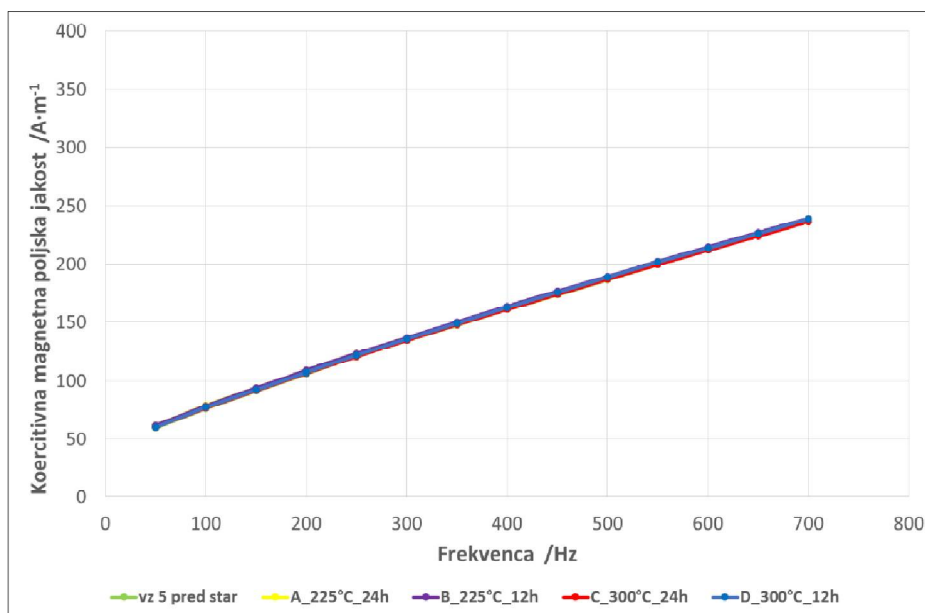
- frekvence od 50 Hz do 700 Hz, pri gostoti magnetnega polja do 1 T, za izbrane vzorce iz tabele 3, pri vseh pogojih magnetnega staranja (T = 225 °C pri času t = 24 h in t = 12 h ter pri T = 300 °C ter času t = 24 h in t = 12 h),
- kakovosti izbranih vzorcev iz tabele 3 (EV21, EV18, EV15 in EV12), pri vseh pogojih magnetnega staranja (T = 225 °C pri času t = 24 h in t = 12 h ter pri T = 300 °C in času t = 24 h ter t = 12 h)

4.2.1 Vpliv koercitivne magnetne poljske jakosti v odvisnosti od frekvence

Spremembo koercitivne magnetne poljske jakosti glede na frekvenco od 50 Hz do 700 Hz in pogoje magnetnega staranja $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$ ter pri $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter času $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$, za kakovost EV21 prikazujeta sliki 22 in 23:



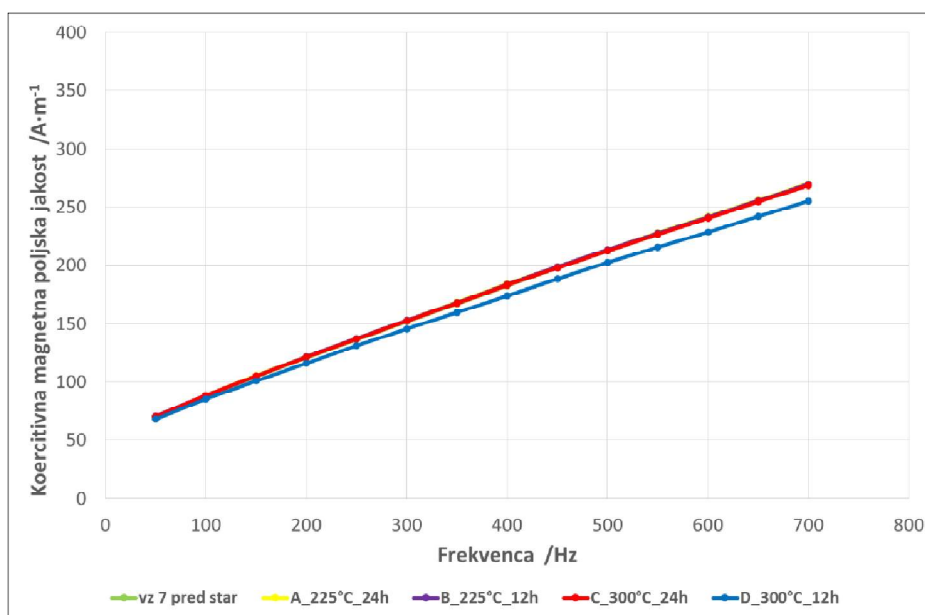
Slika 22: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za kakovost EV21 za vzorec z 0,0014 mas. % C



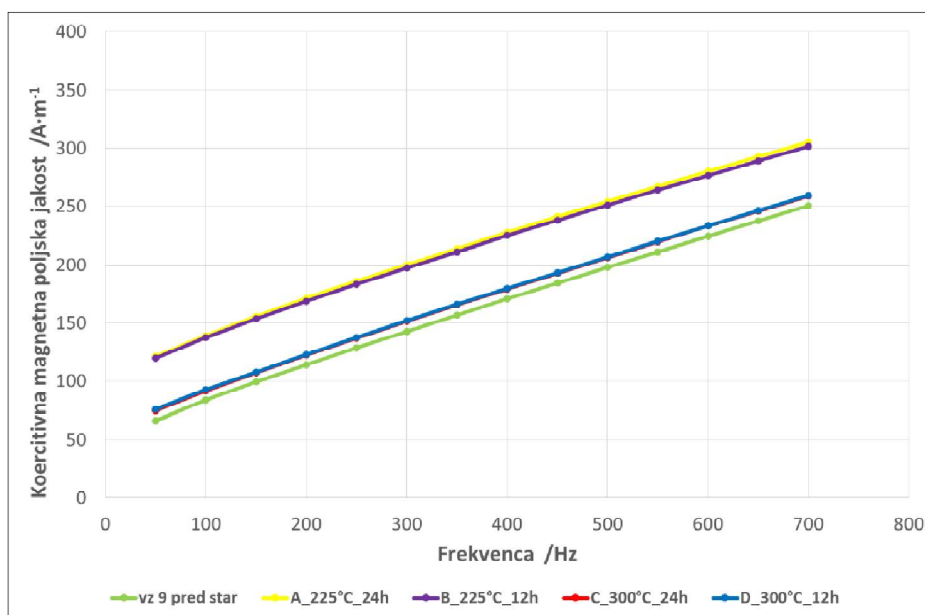
Slika 23: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za kakovost EV21 za vzorec z 0,0033 mas. % C

Diagrama, sliki 22 in 23, jasno pokažeta, da je koercitivna magnetna poljska jakost za kakovost EV21, za vzorec z nizkim (0,0014 mas. % C) in visokim (0,0033 mas. % C), pri vseh pogojih magnetnega staranja $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = 24\text{ h}$ ter $t = 12\text{ h}$, in pogojih $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$, pri frekvencah od 50 Hz do 700 Hz skoraj enaka. To kaže na veliko stabilnost jekla v smislu magnetnega staranja.

Spremembo koercitivne magnetne poljske jakosti za kakovost EV18 glede na frekvenco od 50 Hz do 700 Hz in pogoje magnetnega staranja $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$ ter pri $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter času $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$ prikazujeta sliki 24 in 25:



Slika 24: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za kakovost EV18 za vzorec z 0,0013 mas. % C

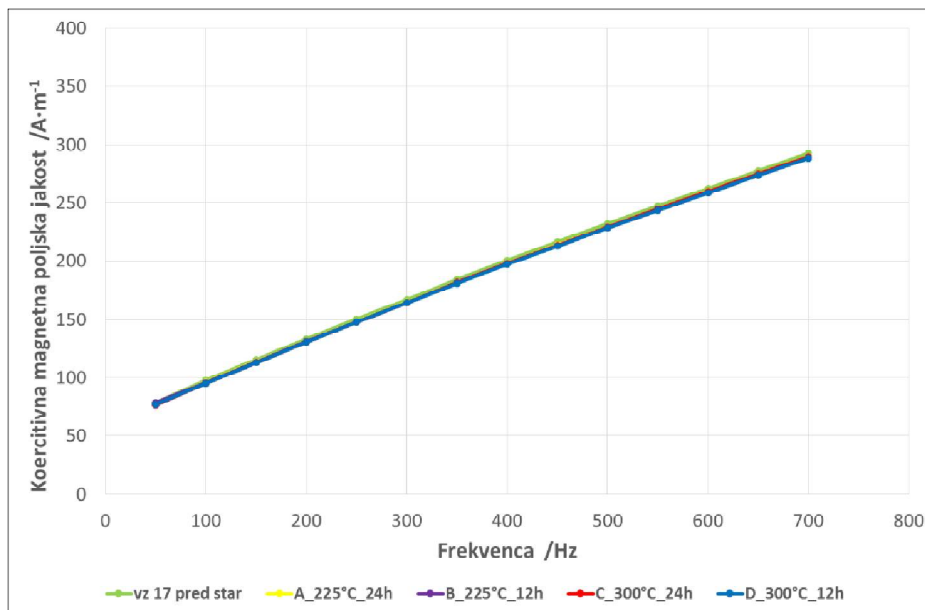


Slika 25: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za kakovost EV18 za vzorec z 0,0039 mas. % C

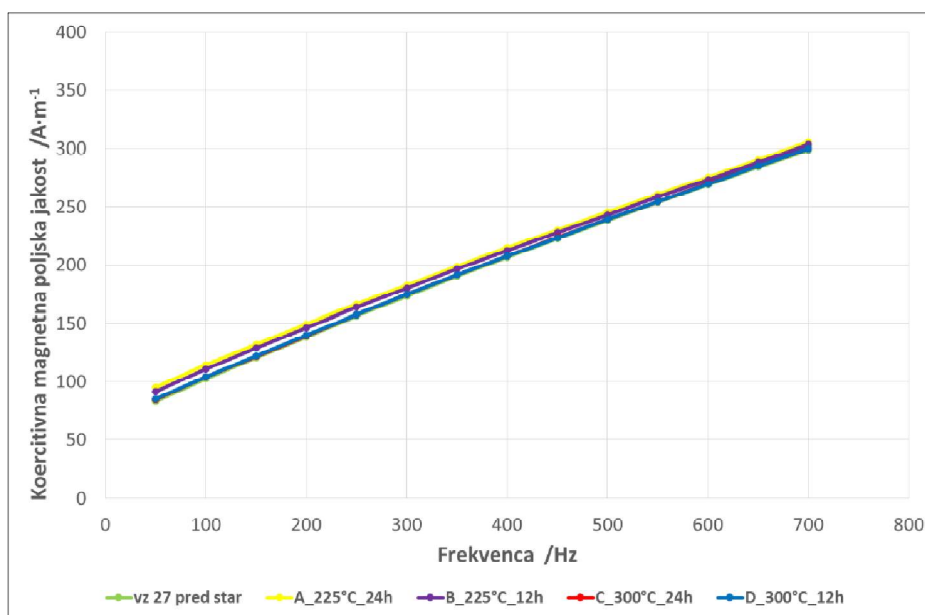
Pri kakovosti EV18 in pri nizki vsebnosti ogljika (0,0013 mas. % C) (slika 24) so vrednosti koercitivne magnetne poljske jakosti pri nizkih frekvencah skoraj enake (do cca 100 Hz), nato pa ima vzorec, ki je bil magnetno staran pri pogojih $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = 12\text{ h}$, koercitivno magnetno poljsko jakost nižjo od ostalih vzorcev (pri frekvencah do 700 Hz).

Na sliki 25, pri vzorcu EV18 z visoko vsebnostjo ogljika (0,0039 mas. % C), je viden velik razkorak v vrednostih koercitivne magnetne poljske jakosti med vzorcem pred magnetnim staranjem in vzorcem, magnetno staranim pri pogojih $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $t = 12\text{ h}$ ter ostalimi vzorci.

Na sliki 26 in 27 je prikazan vpliv koercitivne magnetne poljske jakosti za kakovost EV15 glede na frekvenco od 50 Hz do 700 Hz in pogoje magnetnega staranja $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$ ter pri $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ in času $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$:



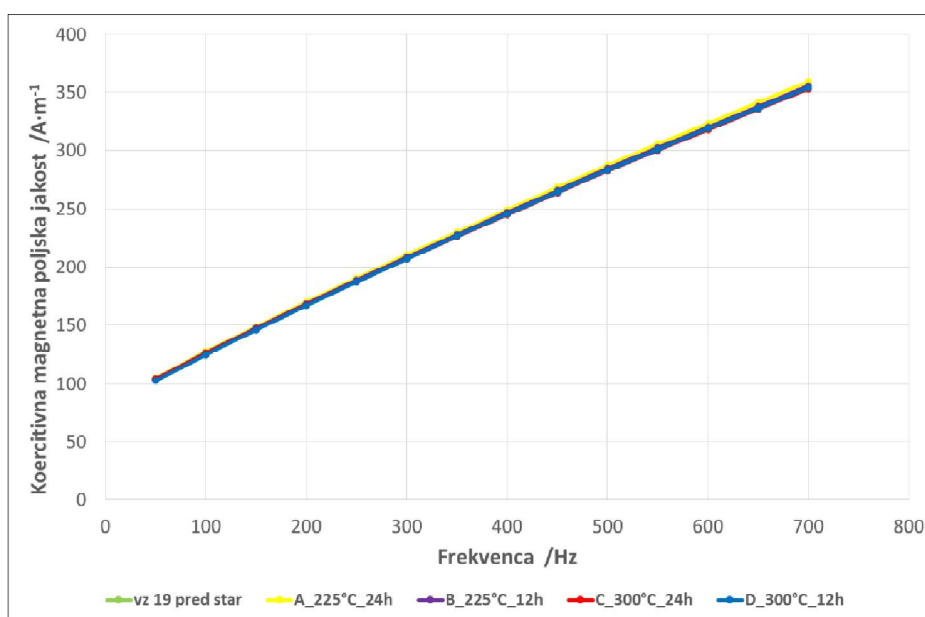
Slika 26: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za kakovost EV15 za vzorec z 0,0012 mas. % C



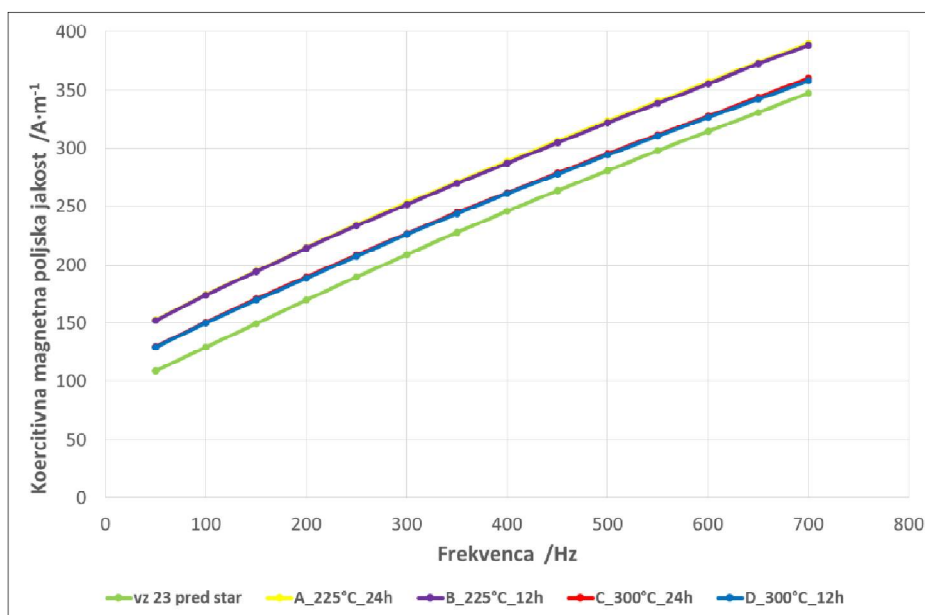
Slika 27: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za kakovost EV15 za vzorec z 0,0025 mas. % C

Vzorci z nizko vsebnostjo ogljika (0,0012 mas. % C) so zelo stabilni glede na magnetno staranje pri vseh pogojih magnetnega staranja, saj se koercitivna magnetna poljska jakost skoraj ne spreminja (slika 26). Pri vzorcih z visokim deležem ogljika (0,0025 mas. % C), na sliki 27, pa ima vzorec pred magnetnim staranjem pri nižjih frekvencah rahlo nižjo koercitivno magnetno poljsko jakost, ki pa se pri višjih frekvencah približuje ostalim vrednostim magnetno staranih vzorcev.

Na slikah 28 in 29 je prikazan vpliv koercitivne magnetne poljske jakosti za kakovost EV12 glede na frekvenco od 50 Hz do 700 Hz in pogoje magnetnega staranja $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$ ter pri $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ in času $t = 24\text{ h}$ in $t = 12\text{ h}$:



Slika 28: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za kakovost EV12 za vzorec z 0,0015 mas. % C



Slika 29: Odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za kakovost EV12 za vzorec z 0,0037 mas. % C

Slika 28 nam prikazuje odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence za vzorec kakovost EV12 z nizkim deležem ogljika (0,0015 mas. %). S slike vidimo, da med magnetno nestaranimi in magnetno staranimi vzorci skoraj ni razlik v koercitivni magnetni poljski jakosti. Razlika se pokaže za vzorec EV12 z višjim deležem ogljika (0,0037 mas. % C) na sliki 29, s katere razberemo, da ima magnetno nestaran vzorec najnižjo koercitivno magnetno poljsko jakost, vsi magnetno starani vzorci pa imajo višjo koercitivno magnetno poljsko jakost.

Za kakovosti EV21, EV18, EV15 in EV12 (slike 22 do 29), ki prikazujejo odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti od frekvence (od 50 Hz do 700 Hz), pri vseh pogojih magnetnega staranja, lahko zaključimo, da je material v vzorcih z nizkim deležem ogljika ($< 0,0018$ mas. % C) stabilen, saj se koercitivna magnetna poljska jakost spreminja minimalno. To pomeni, da se material malo magnetno stara. Največje dosežene razlike v koercitivni magnetni poljski jakosti v posameznih kakovostih so: EV18 ($15,3211 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$), EV12 ($6,1769 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$), EV15 ($4,23183 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$) in EV21 ($2,9723 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$).

V vzorcih (slike 22 do 29) z visokim deležem ogljika ($> 0,0020$ mas. %) smo ugotovili, da je razlika v koercitivni magnetni poljski jakosti med nestaranim in magnetno staranimi vzorci velika. Največja razlika v koercitivni magnetni poljski jakosti je v vzorcu kakovosti EV18 ($55,0429 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$) in najmanjša razlika v koercitivni magnetni poljski jakosti je v vzorcu kakovosti EV21 ($2,8200 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$).

To pomeni, da material ni stabilen in da se stara. Največja razlika v koercitivni magnetni poljski jakosti je v vzorcih

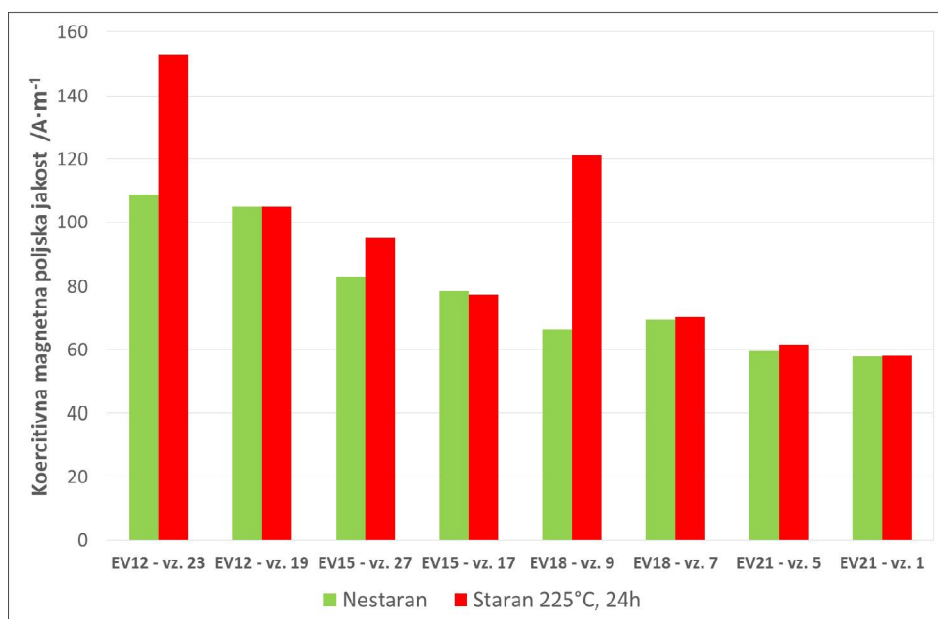
z visokim deležem ogljika, in sicer pri kakovosti EV18 (z 0,0039 mas. % C).

Spreminjanje frekvence v območju od 50 Hz do 700 Hz najbolj vpliva na spremembo koercitivne magnetne poljske jakosti v pločevini kakovosti EV12 (dosežena najvišja koercitivna magnetna poljska jakost v tem vzorcu je: $389,5199 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$).

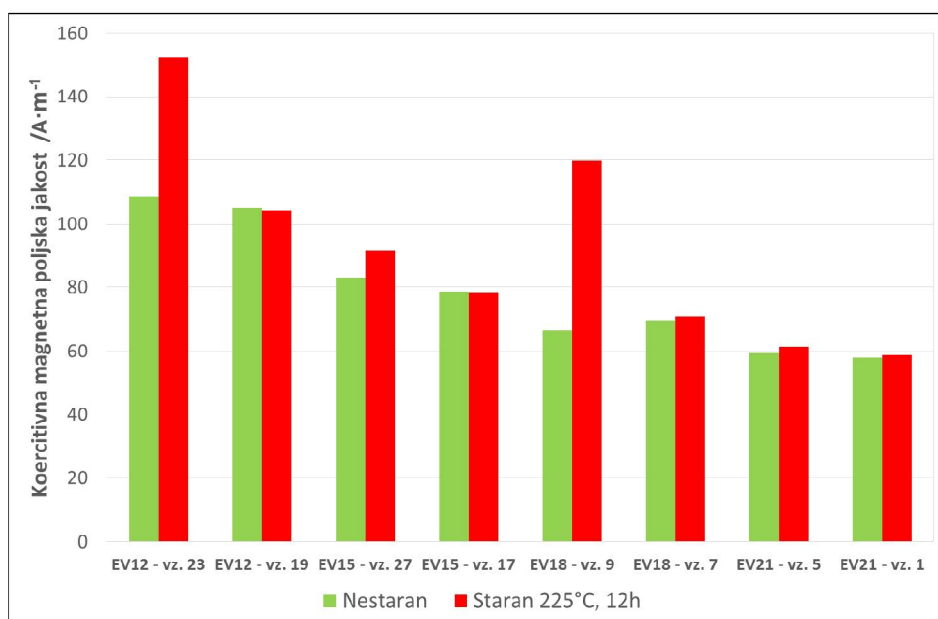
4.2.2 Vpliv koercitivne magnetne poljske jakosti v odvisnosti od kakovosti in pogojev magnetnega staranja

Slike 30 do 33 prikazujejo odvisnost koercitivne magnetne poljske jakosti glede na izbrane vzorce kakovosti EV21, EV18, EV15 in EV12 pri pogojih magnetnega staranja: $T = 225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24 \text{ h}$ in $t = 12 \text{ h}$ ter magnetno staranje pri $T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24 \text{ h}$ in $t = 12 \text{ h}$. Koercitivna magnetna poljska jakost je bila izmerjena pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja 1 T.

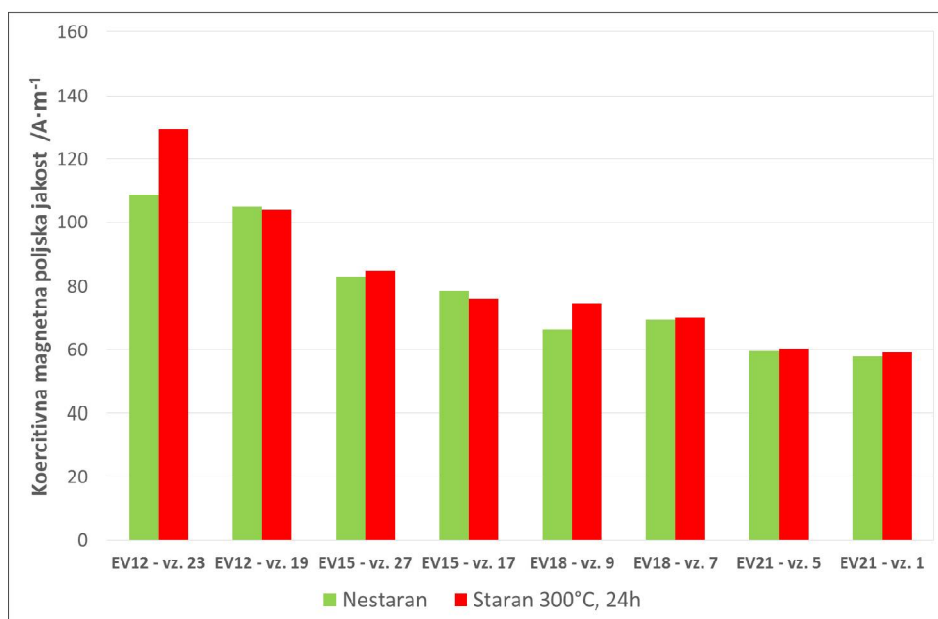
Na slikah so z zeleno barvo označene meritve koercitivne magnetne poljske jakosti za magnetno nestarane vzorce, z rdečo barvo pa smo označili magnetno starane vzorce pri določenih pogojih.



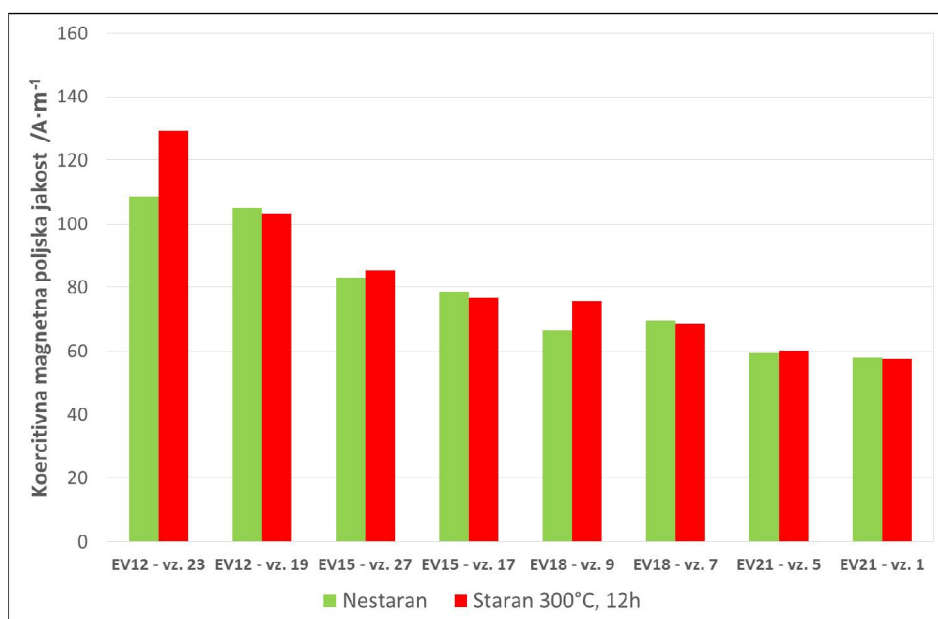
Slika 30: Koercitivna magnetna poljska jakost, odvisna od kakovosti pri nestaranih in magnetno staranih vzorcih, pri pogojih $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$



Slika 31: Koercitivna magnetna poljska jakost, odvisna od kakovosti pri nestaranih in magnetno staranih vzorcih, pri pogojih $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 12\text{ h}$



Slika 32: Koercitivna magnetna poljska jakost, odvisna od kakovosti pri nestaranih in magnetno staranih vzorcih, pri pogojih $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$



Slika 33: Koercitivna magnetna poljska jakost, odvisna od kakovosti pri nestaranih in magnetno staranih vzorcih, pri pogojih $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 12\text{ h}$

Vrednost koercitivne magnetne poljske jakosti je odvisna od skupnih izgub magnetenja. Z zmanjševanjem P_{skup} se tudi koercitivna magnetna poljska jakost zmanjšuje. S slik 30 do 33 lahko tudi povzamemo, da se koercitivna magnetna poljska jakost zmanjšuje s povečanjem deleža silicija v vzorcih.

Pri enakih vsebnostih ogljika se vrednosti koercitivne magnetne poljske jakosti v vzorcih vseh izbranih kakovosti pri temperaturi staranja 300 °C zmanjšajo (ne glede na čas magnetnega staranja).

Največja razlika med nestaranim in magnetno staranim vzorcem je pri kakovosti EV18 z 0,0039 mas. % C in vzorcu EV12 z 0,0037 mas. % C, najmanjša razlika v koercitivni magnetni poljski jakosti je v vzorcih z nizko vsebnostjo ogljika (EV21 z 0,0037 mas. % C in 0,0033 mas. % C, EV18 z 0,0013 mas. % C in EV12 z 0,0015 mas. % C).

4.3 Razdelitev magnetnih izgub glede na pogoje magnetnega staranja

Razdelitev izgub pri magnetenju na histerezne, vrtilne in anomalne je bila izvedena na izbranih vzorcih iz tabele 3:

- vzorci kakovosti: EV21, EV18, EV15 in EV12 z nizkim $< 0,0018$ mas. % C in visokim $> 0,0020$ mas. % C,
- pogoji staranja: $T = 225$ °C pri času $t = 24$ h in $t = 12$ h ter pri $T = 300$ °C in času $t = 24$ h ter $t = 12$ h).

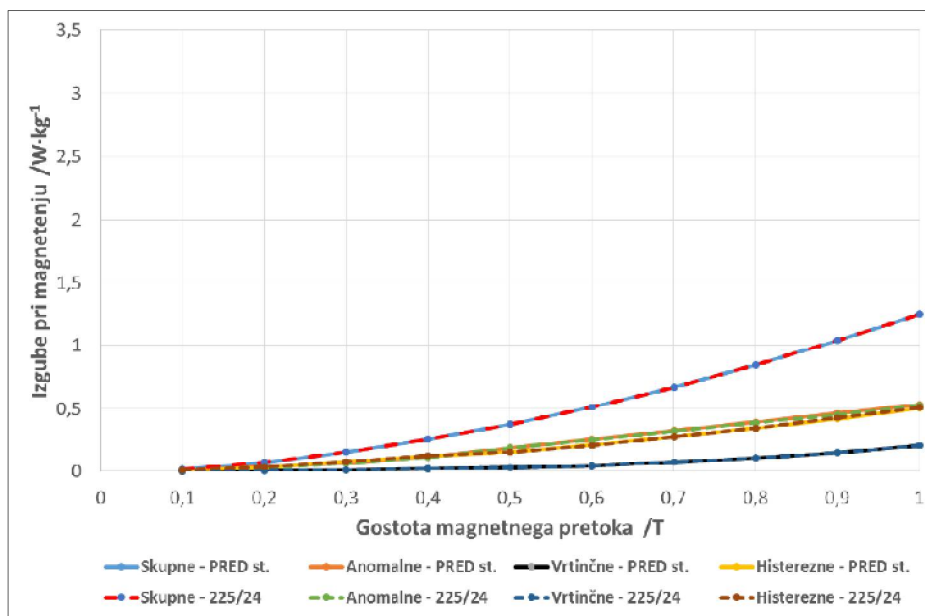
Diagrame smo razdelili glede na:

- odvisnost izgub pri magnetenju pri 50 Hz od gostote magnetnega polja od 0,1 T do 1 T, za vse vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne) in
- odvisnost izgub pri magnetenju od frekvence (50 Hz do 700 Hz) za vse vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne).

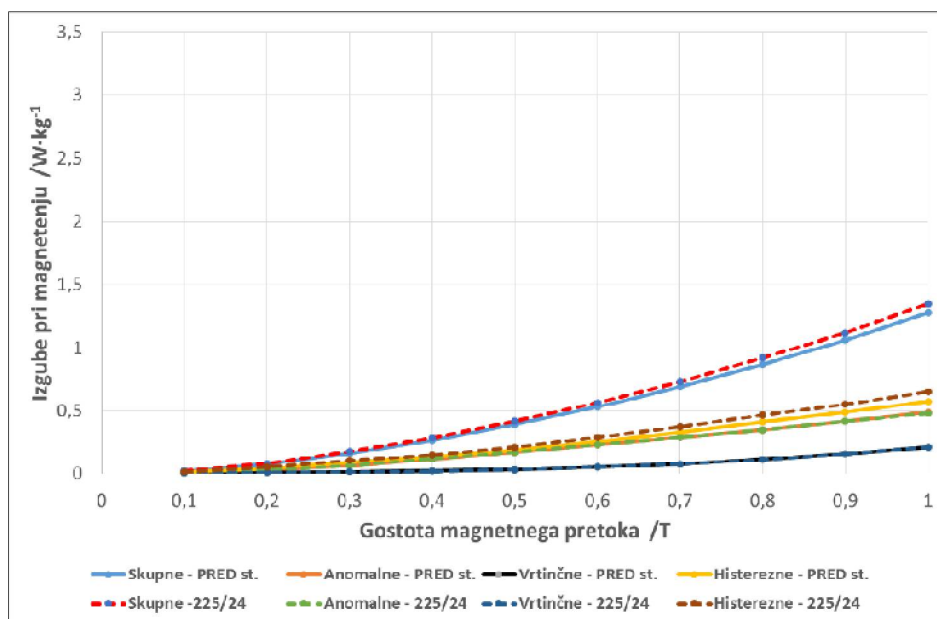
4.3.1 Temperatura 225 °C in čas žarjenja 24 h (standard SIST EN 10106:2015)

4.3.1.1 Vzorci kakovosti EV21

Na slikah 34 in 35 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV21, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ °C}$ pri času $t = 24\text{ h}$:



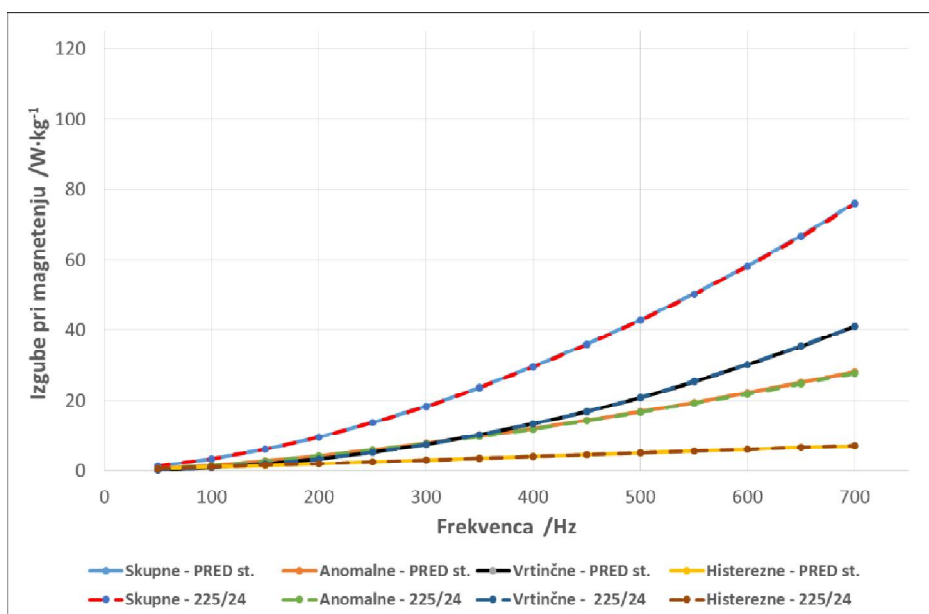
Slika 34: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C



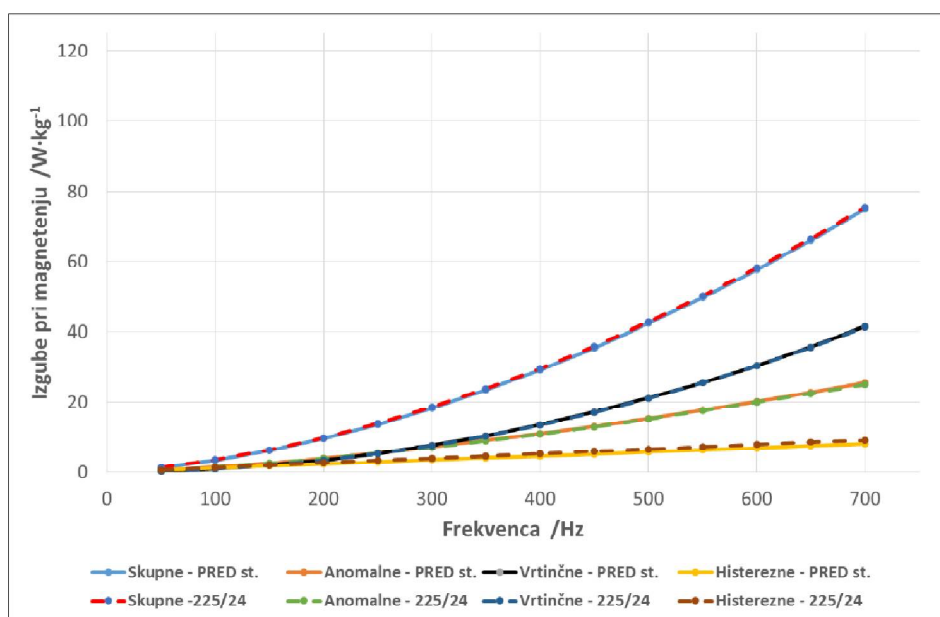
Slika 35: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C

V vzorcu kakovosti EV21 z višjo vsebnostjo ogljika, 0,0033 mas. % C, so skupne magnetne izgube in histerezne magnetne izgube višje kot pri vzorcu z nizkim deležem ogljika, to je 0,0014 mas. % C. Anomalne magnetne izgube so v vzorcu z višjim ogljikom nekoliko nižje, vrtinčne magnetne izgube so v vzorcu v nizkim in visokim ogljikom pred in po magnetnem staranju enake.

Sliki 36 in 37 prikazujeta odvisnost izgub pri magnetenju glede na vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtinčne in anomalne) pri frekvenci od 50 Hz do 700 Hz za vzorce kakovosti EV21, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$:



Slika 36: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C

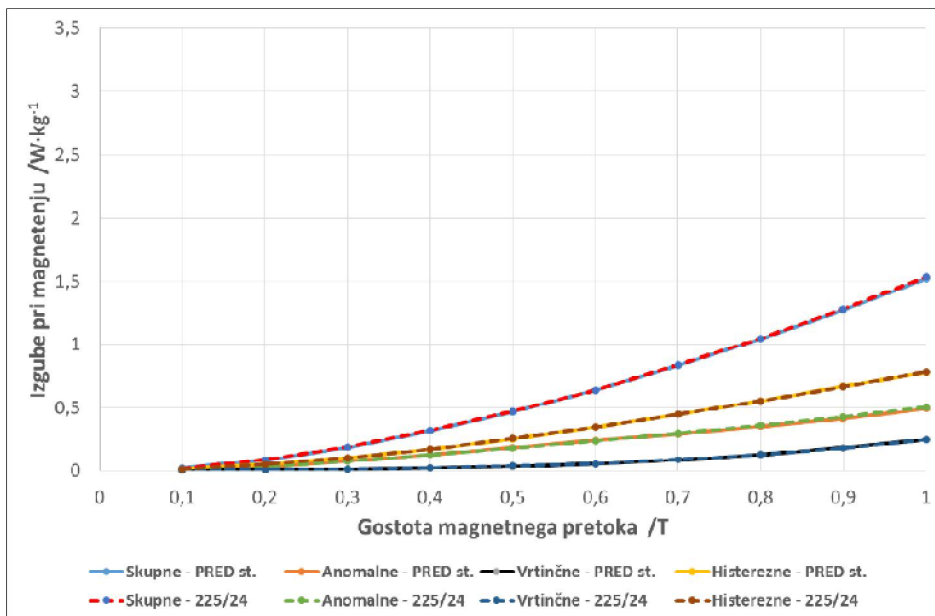


Slika 37: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C

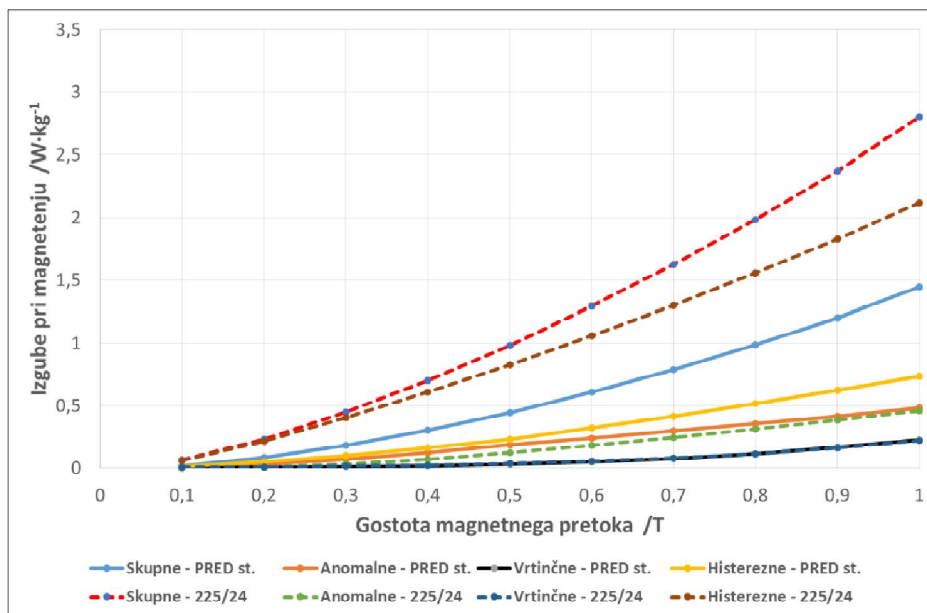
Razlika med skupnimi, histereznimi, vrtinčnimi in anomalnimi magnetnimi izgubami pri magnetenju od 50 do 700 Hz je med vzorcem z nizkim ogljikom, 0,0014 mas. % C in vzorcem z visokim ogljikom, 0,0033 mas. % C, minimalna.

4.3.1.2 Vzorci kakovosti EV18

Na slikah 38 in 39 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (histerezne, vrtilne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T od 1 T za vzorce kakovosti EV18, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$:



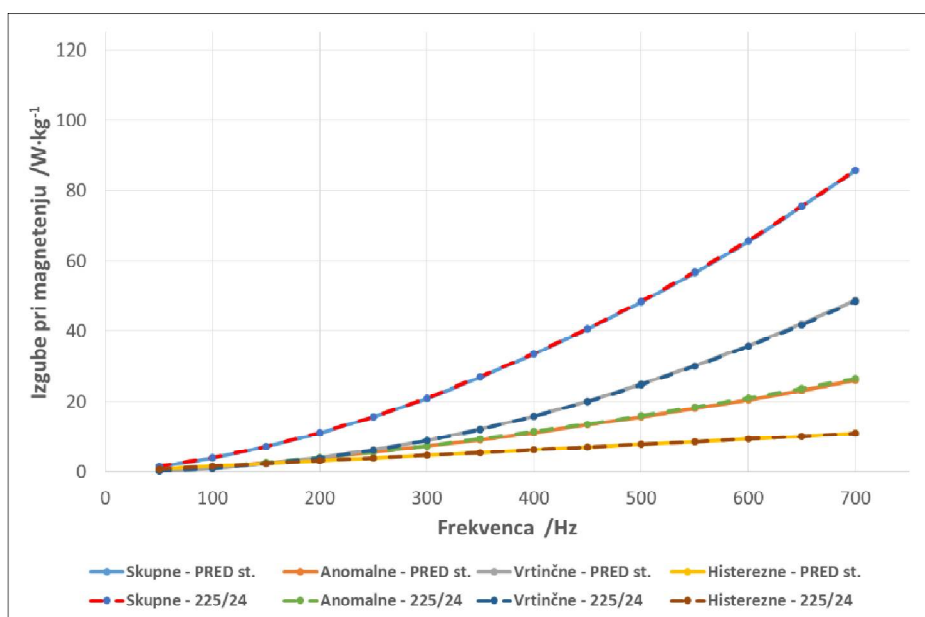
Slika 38: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C



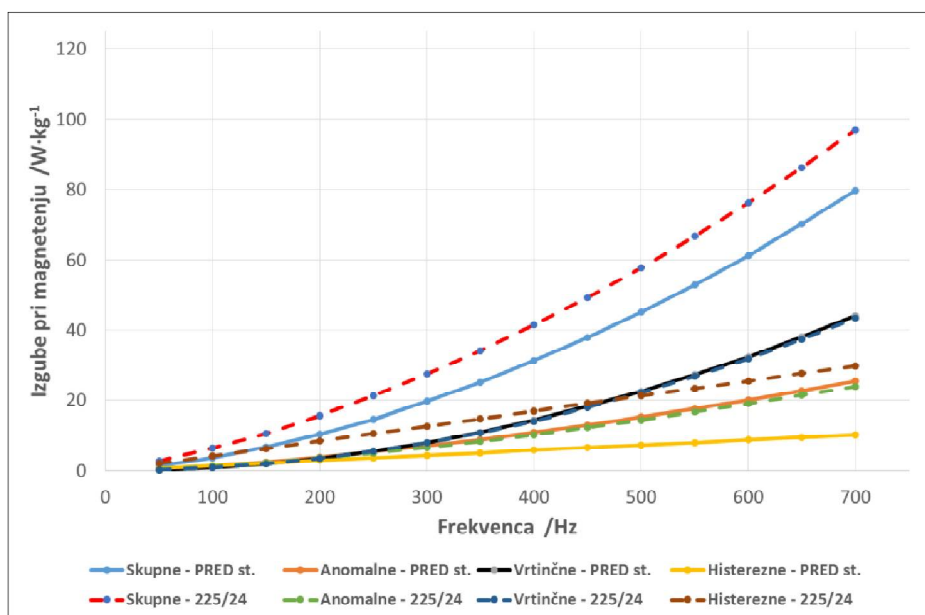
Slika 39: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C

Na sliki 38 v vzorcu EV18, kjer je nizek ogljik, to je 0,0013 mas. % C, med magnetnimi izgubami ni razlik oziroma so minimalne. V vzorcu z višjim ogljikom, 0,0039 mas. % C (slika 39), je razlika v skupnih in histereznih magnetnih izgubah, ki so višje v staranem vzorcu. Anomalne magnetne izgube so v staranem vzorcu za $0,0275 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ nižje kot v nestaranem vzorcu, vrtilne magnetne izgube pa se razlikujejo za $0,0034 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Sliki 40 in 41 prikazujeta odvisnost izgub pri magnetenju glede na vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne) pri frekvenci od 50 Hz do 700 Hz za vzorce kakovosti EV18, pred in po magnetnem staranju $T = 225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24 \text{ h}$:



Slika 40: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C

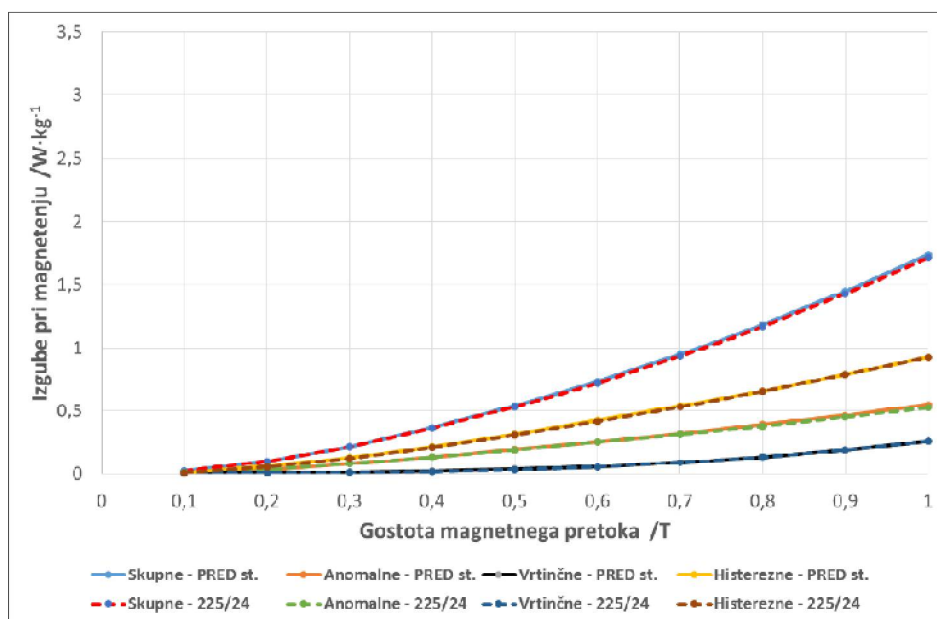


Slika 41: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C

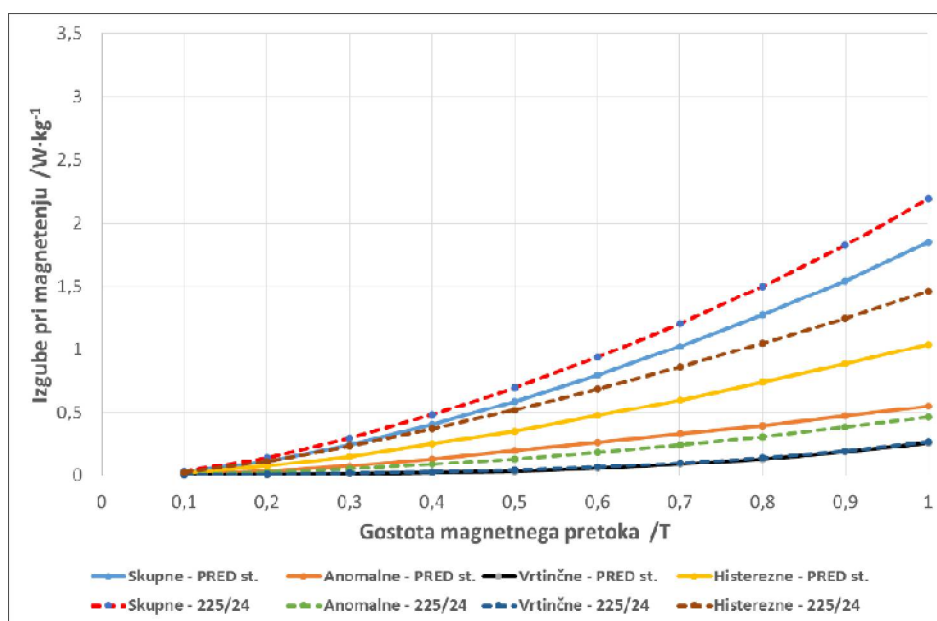
Razlika med histereznimi, vrtilničnimi in anomalnimi izgubami pri magnetenju od 50 Hz do 700 Hz je pri vzorcu EV18 z nizko vsebnostjo ogljika, 0,0013 mas. % C, v nestaranem in magnetno staranem vzorcu minimalna (slika 40). V vzorcu z visokim ogljikom (0,0039 mas. % C) na sliki 41 so skupne in histerezne magnetne izgube v staranem vzorcu ($T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$) višje kot v nestaranem vzorcu. Razlika med anomalnimi magnetnimi izgubami med magnetno staranim in nestaranim vzorcem EV18 z visokim ogljikom je $1,4418\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$. Razlika v vrtilčnih magnetnih izgubah je $0,6863\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$.

4.3.1.3 Vzorci kakovosti EV15

Na slikah 42 in 43 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilčne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV15, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$:



Slika 42: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C

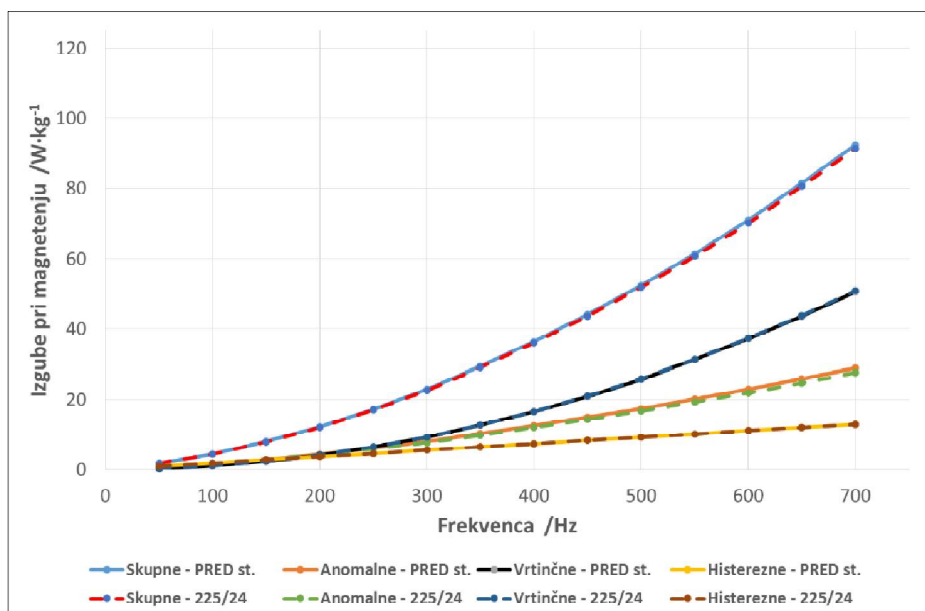


Slika 43: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C

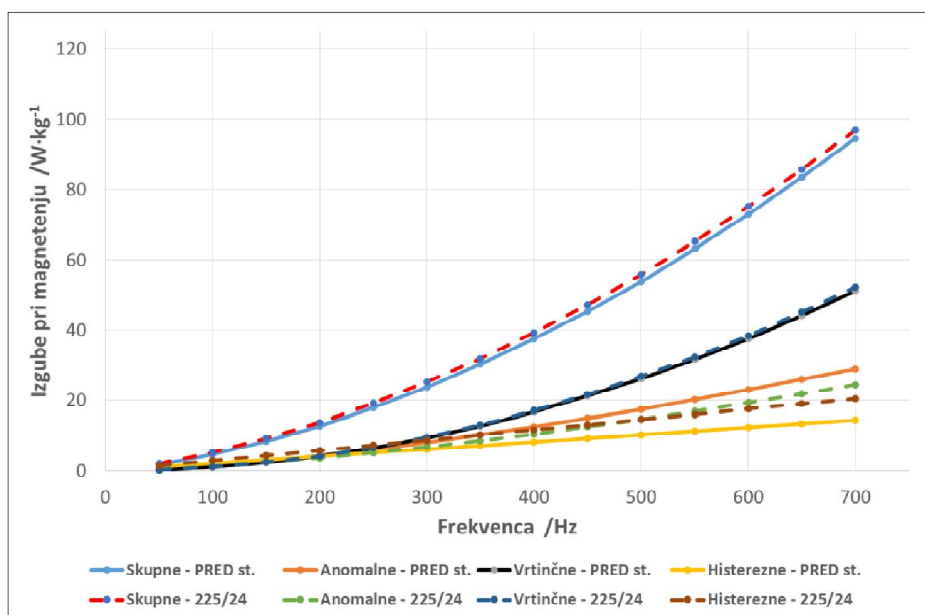
Pri vzorcu EV15 (slika 42), z nizkim deležem ogljika, 0,0012 mas. % C, je razlika med magnetnimi izgubami (skupnimi, anomalnimi, histereznimi in vrtinčnimi) med nestaranimi in magnetno staranim vzorcem pri pogojih $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$ minimalna. V staranem vzorcu EV15 z visokim deležem ogljika, 0,0025 mas. % C (slika 43), so skupne in histerezne magnetne izgube pred staranjem večje kot v nestaranem vzorcu.

Razlika anomalnih magnetnih izgub med nestaranim in magnetno staranim vzorcem je $0,0887 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.
Razlika v vrtničnih magnetnih izgubah je $0,0058 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Sliki 43 in 44 prikazujeta odvisnost izgub pri magnetenju glede na vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtnične in anomalne) pri frekvenci od 50 Hz do 700 Hz za vzorce kakovosti EV15, pred in po magnetnem staranju $T = 225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24 \text{ h}$:



Slika 44: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C

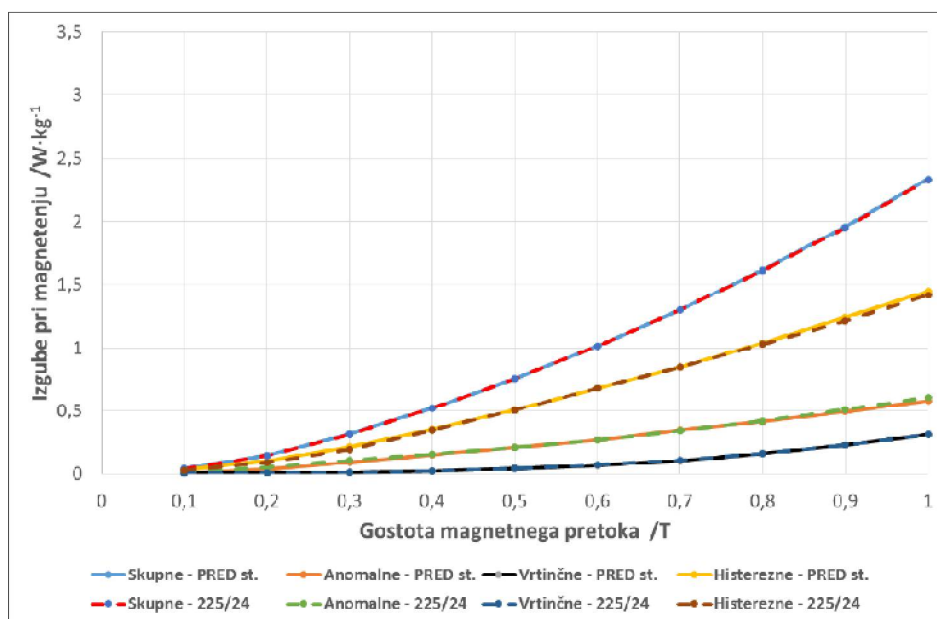


Slika 45: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C

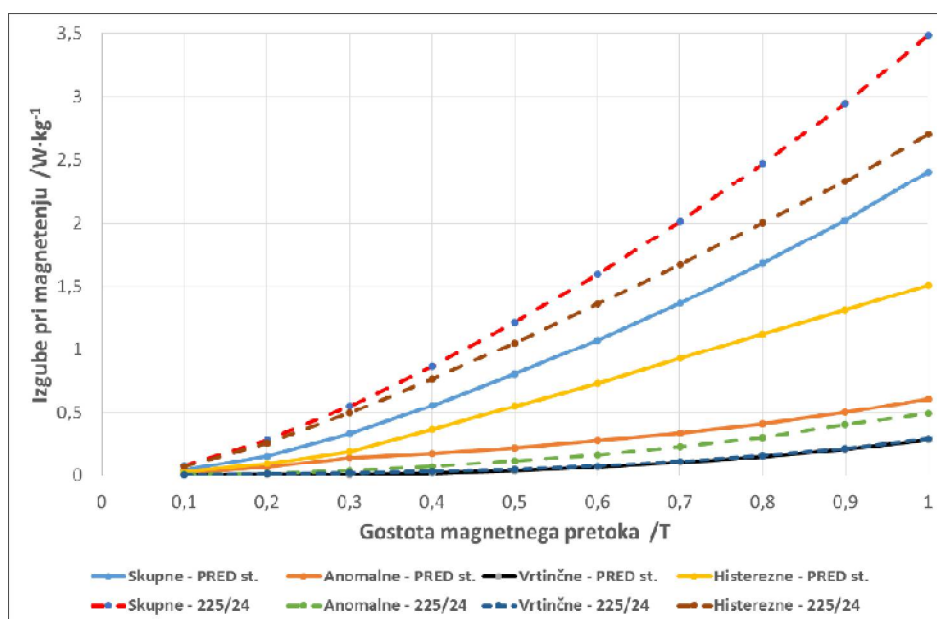
Na sliki 44, v vzorcu EV15 z nizko vsebnostjo ogljika, 0,0012 mas. % C, so razlike za nestaran in magnetno staran vzorec v skupnih, histereznih, vrtničnih in anomalnih magnetnih izgubah minimalne. Na sliki 45 je predstavljen nestaran in magnetno staran vzorec z visokim 0,0025 mas. % C. Skupne in histerezne magnetne izgube so v vzorcu po magnetnem staranju večje, anomalne magnetne izgube pa so manjše. Razlika v vrtničnih magnetnih izgubah je minimalna.

4.3.1.4 Vzorci kakovosti EV12

Na slikah 46 in 47 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtnične in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV12, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$:



Slika 46: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C

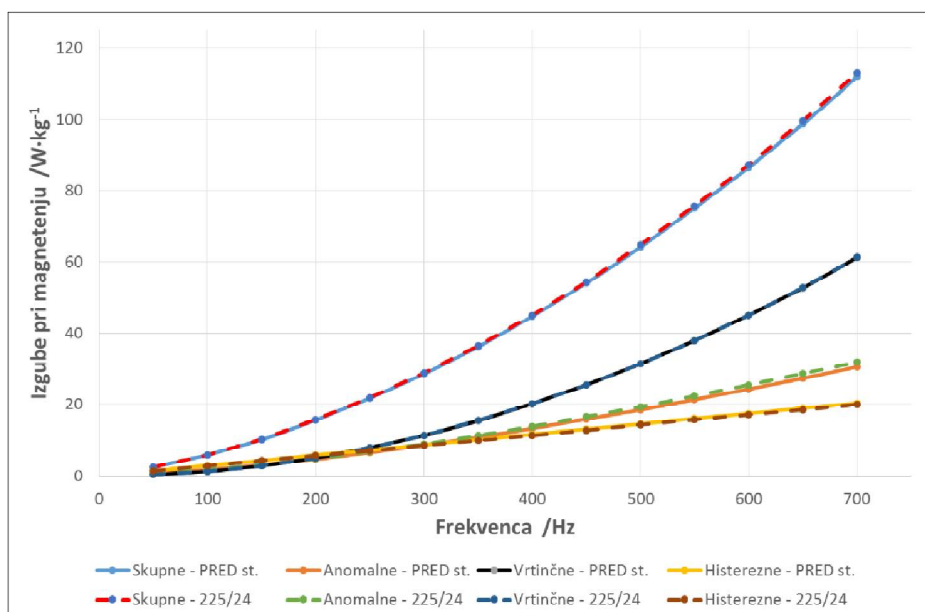


Slika 47: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C

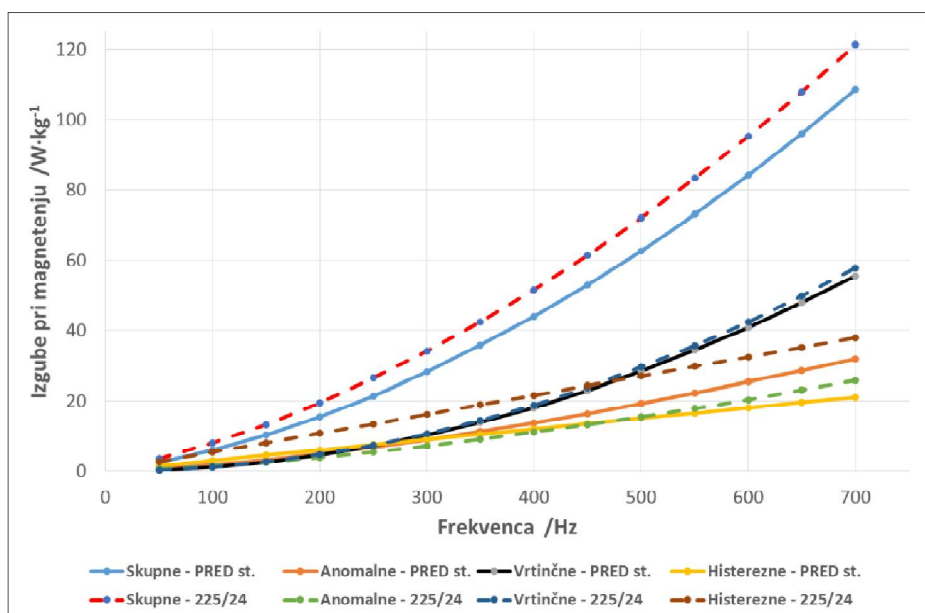
Na sliki 46, v vzorcu EV12 z nizko vsebnostjo ogljika, 0,0015 mas. % C, imajo vse magnetne izgube (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) minimalne razlike med nestaranim in magnetno staranim vzorcem.

V vzorcu EV12 z visokim ogljikom, 0,0037 mas. % C (slika 47), so v magnetno staranem vzorcu skupne in histerezne magnetne izgube večje, razlika v anomalnih magnetnih izgubah je $0,1170 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, vrtilne magnetne izgube pa so približno enake v obeh vzorcih.

Sliki 48 in 49 prikazujeta odvisnost izgub pri magnetenju glede na vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtnične in anomalne) pri frekvenci od 50 Hz do 700 Hz za vzorce kakovosti EV12, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24\text{ h}$:



Slika 48: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C



Slika 49: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C

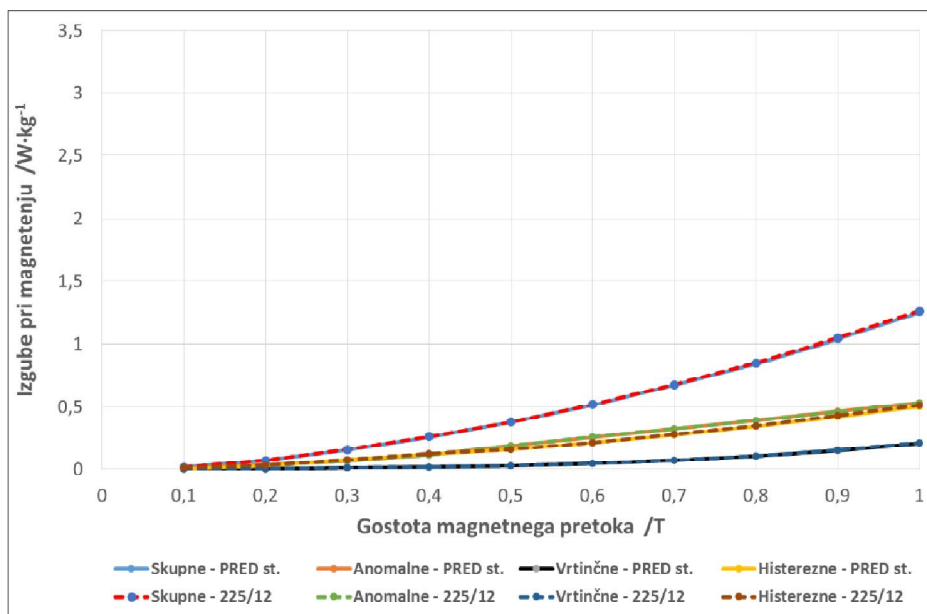
V vzorcu EV12 na sliki 48, z nizko vsebnostjo ogljika, 0,0015 mas. % C, imajo vse magnetne izgube pri vseh frekvencah (skupne, anomalne, vrtnične in histerezne) minimalne razlike (od $0,09602\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$

do $1,4414 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$) med nestaranim in magnetno staranim vzorcem. V vzorcu EV12 z visokim ogljikom, 0,0037 mas. % C (slika 49), so v magnetno staranem vzorcu skupne in histerezne magnetne izgube večje. V staranem vzorcu so anomalne magnetne izgube za $6,1289 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ nižje od nestaranega vzorca, vrtilne magnetne izgube pa so v obeh vzorcih (nestaran – magnetno staran) približno enake.

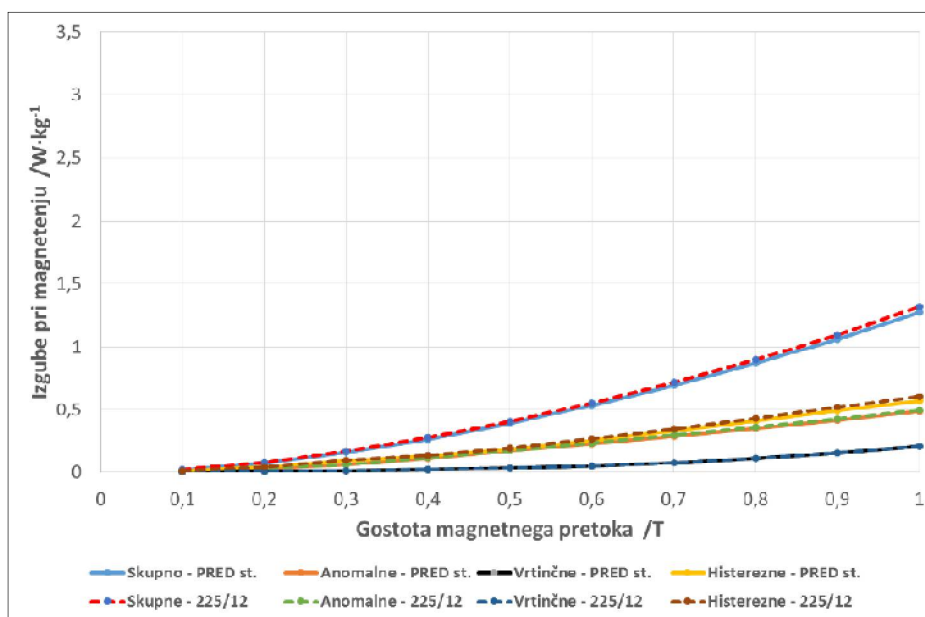
4.3.2 Temperatura 225 °C in čas žarjenja 12 h

4.3.2.1 Vzorci kakovosti EV21

Na slikah 50 in 51 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne) pri 50 Hz ter gostoti magnetnega polja do 1 T za vzorce kakovosti EV21, pred in po magnetnem staranju $T = 225 \text{ °C}$, $t = 12 \text{ h}$:



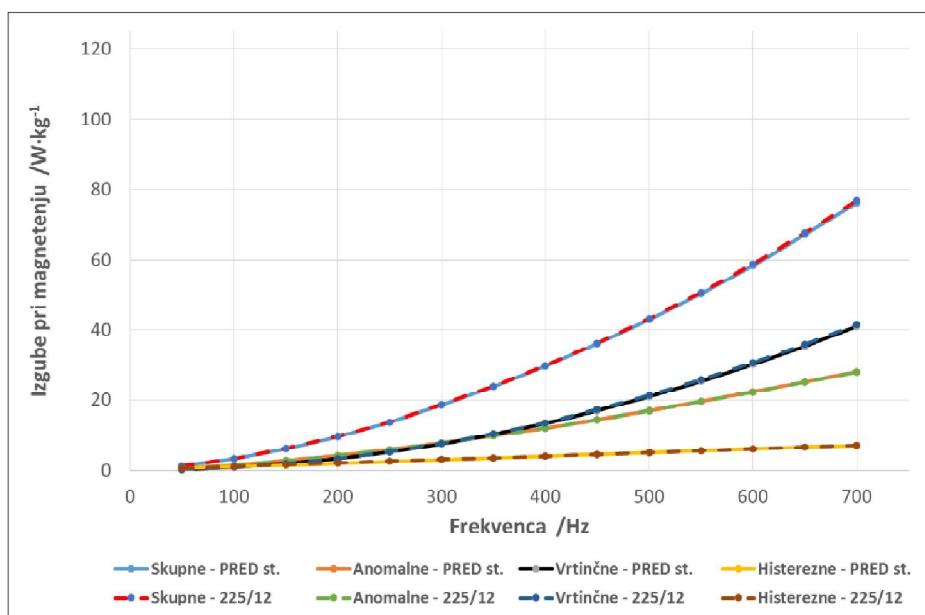
Slika 50: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C



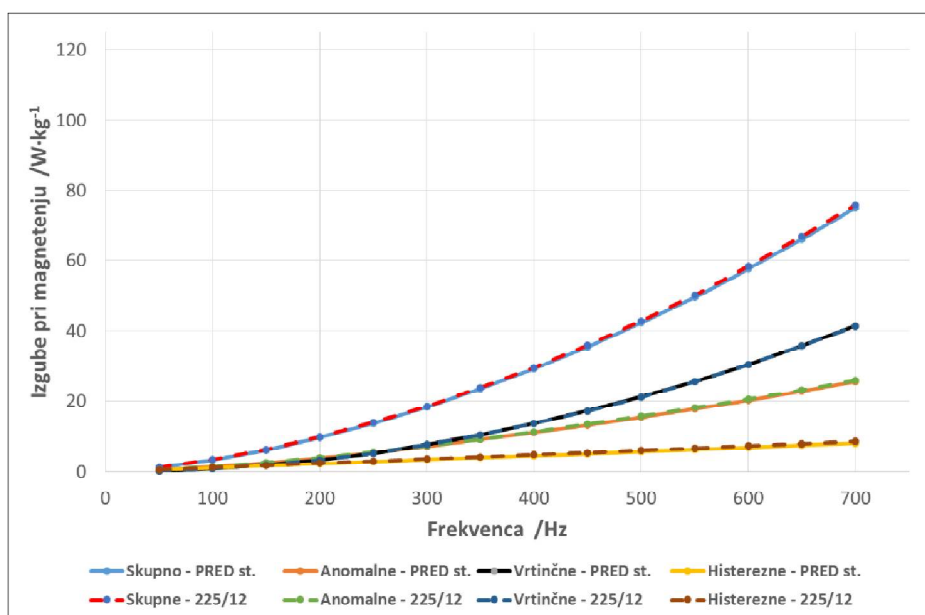
Slika 51: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C

V vzorcu EV21 z nizkim deležem ogljika, 0,0014 mas. % C (slika 50), so razlike v nestaranem in magnetno staranem vzorcu v skupnih, histereznih, vrtničnih in anomalnih magnetnih izgubah minimalne. S slike 51 vidimo, da so v magnetnih izgubah (skupnih, histereznih, vrtničnih in anomalnih) med nestaranim in magnetno staranim vzorcem za vzorec z visokim ogljikom, 0,0033 mas. % C, minimalne razlike.

Sliki 52 in 53 prikazujeta odvisnost magnetnih izgub pri magnetenju glede na vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtnične in anomalne) pri frekvenci od 50 Hz do 700 Hz za vzorce kakovosti EV21, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$:



Slika 52: Razdelitev izgub magnetenja v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C

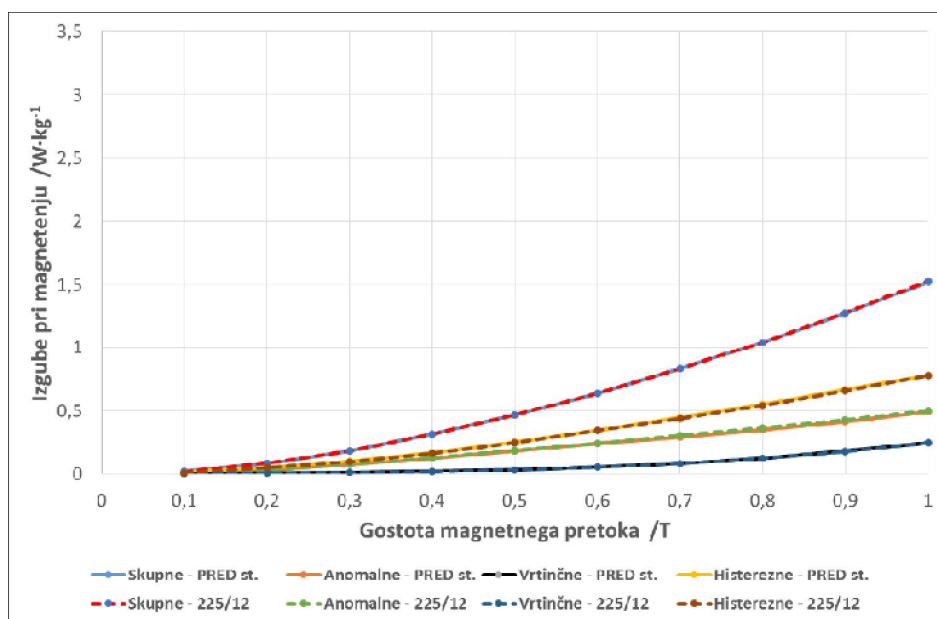


Slika 53: Razdelitev izgub magnetenja v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C

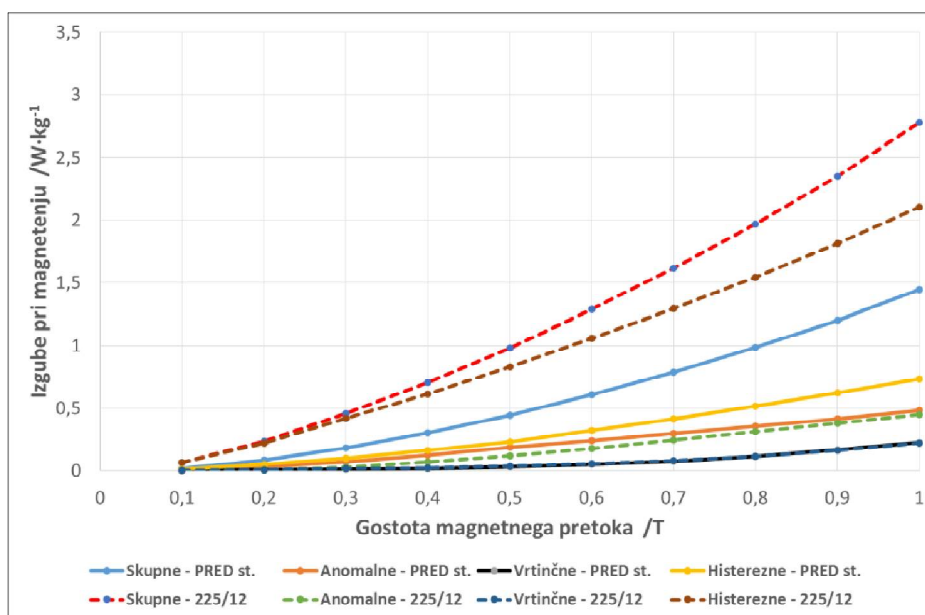
Razlike v skupnih, histereznih, vrtničnih in anomalnih magnetnih izgubah za nestaran in magnetno staran vzorec ($T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$) z nizkim 0,0014 mas. % C in visokim ogljikom, 0,0033 mas. % C so za kakovost EV21 minimalne.

4.3.2.2 Vzorci kakovosti EV18

Na slikah 54 in 55 so prikazane odvisnosti magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtnične in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV18, pred in po magnetnem staranju pri pogojih $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$:



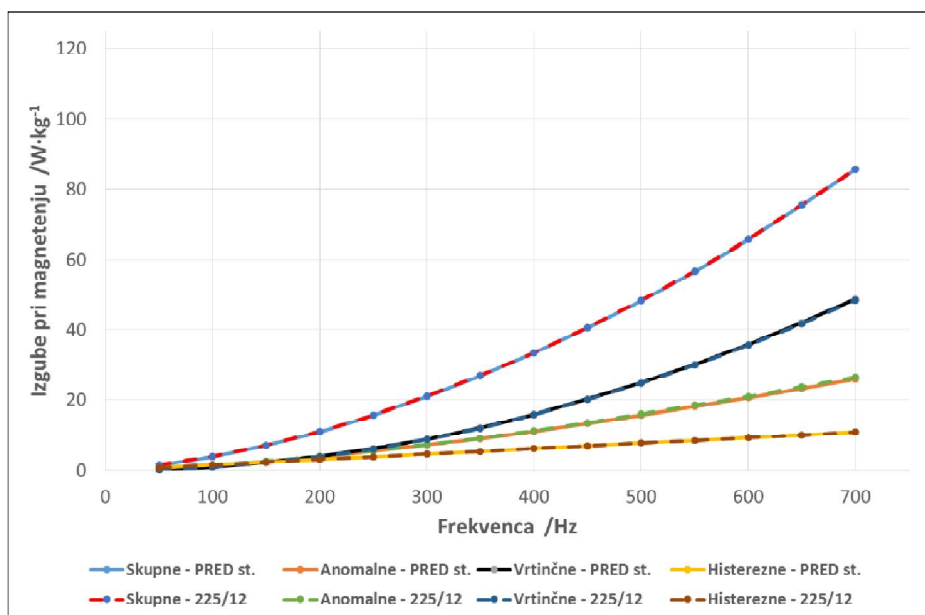
Slika 54: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C



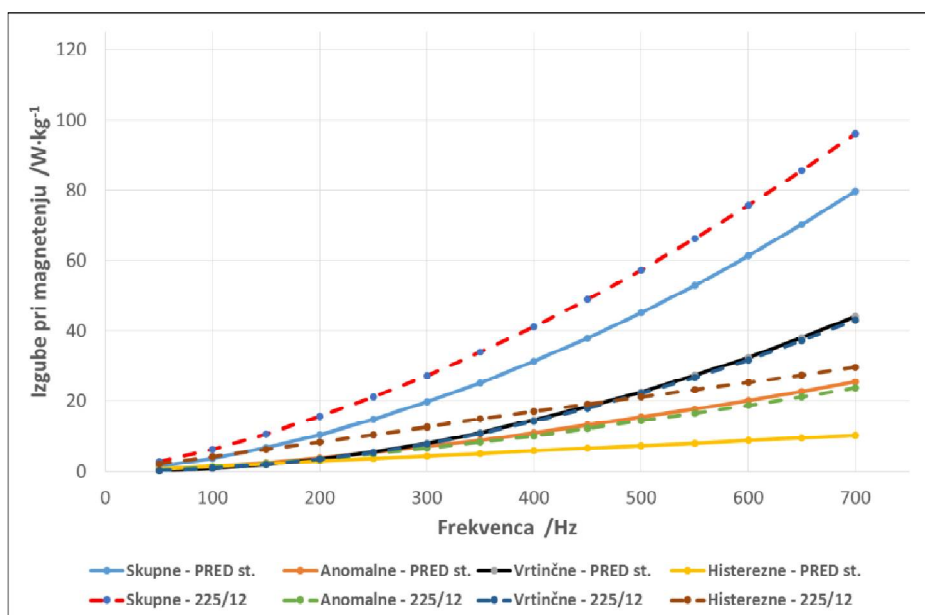
Slika 55: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C

Razlike med skupnimi, histereznimi, vrtinčnimi in anomalnimi magnetnimi izgubami za vzorec z nizkim ogljikom, 0,0013 mas. % C, za nestaran in magnetno staran vzorec, so minimalne (slika 54). Pri magnetno staranem vzorcu EV18 (slika 55) z visokim ogljikom, 0,0039 mas. % C, so skupne in histerezne magnetne izgube višje kot v primerljivem nestaranem vzorcu EV18. Anomalne magnetne izgube so v nestaranem vzorcu rahlo višje kot v magnetno staranem vzorcu, za vrtinčne izgube pa lahko rečemo, da je odstopanje minimalno.

Sliki 56 in 57 prikazujeta odvisnost magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) od frekvence 50 Hz do 700 Hz, za nestaran in magnetno staran vzorec EV18, pri $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$:



Slika 56: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C



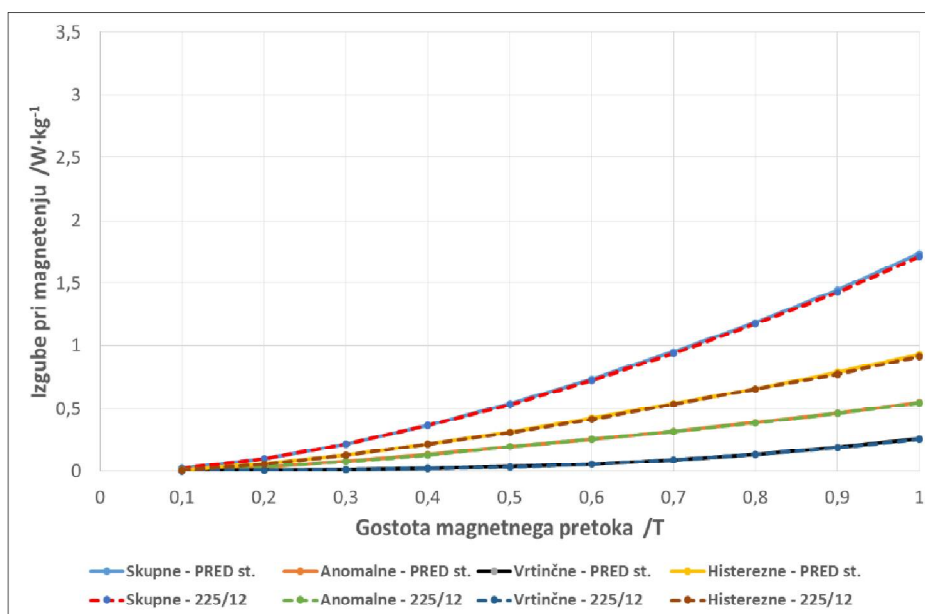
Slika 57: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C

V vzorcu EV18 z nizko vsebnostjo ogljika, 0,0013 mas. % C, so razlike med magnetnimi izgubami minimalne. Pri vzorcu EV18 z visokim ogljikom, 0,0039 mas. % C, pa so skupne in histerezne magnetne izgube večje v nestaranem vzorcu.

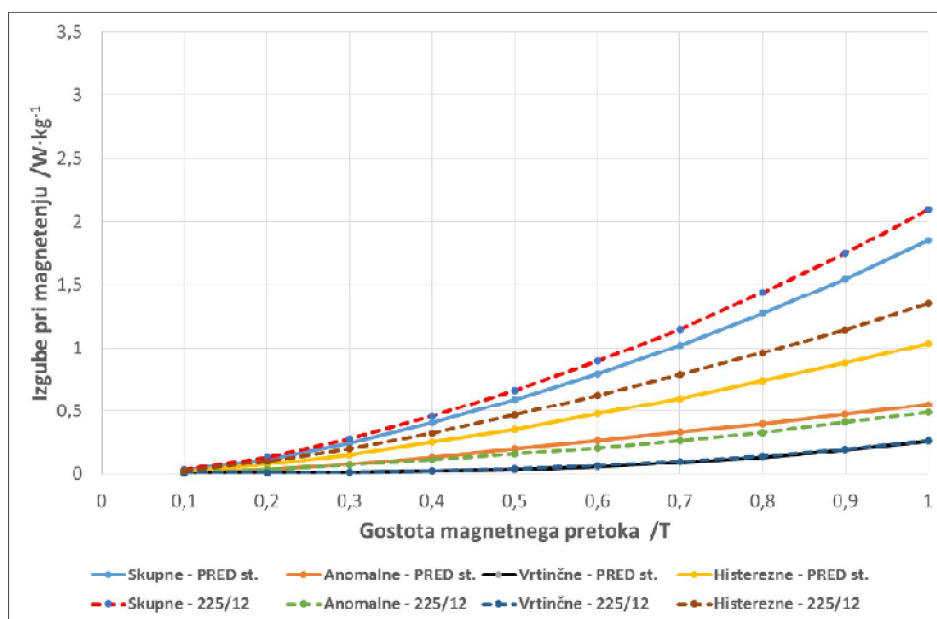
Anomalne magnetne izgube so v nestaranem vzorcu EV18 za malenkost večje, kot so v magnetno staranem vzorcu. Vrtinčne magnetne izgube pa se v vzorcu EV18 (nestaranem in magnetno staranim) razlikujejo minimalno.

4.3.2.3 Vzorci kvalitete EV15

Na slikah 58 in 59 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtinčne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV15, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$:



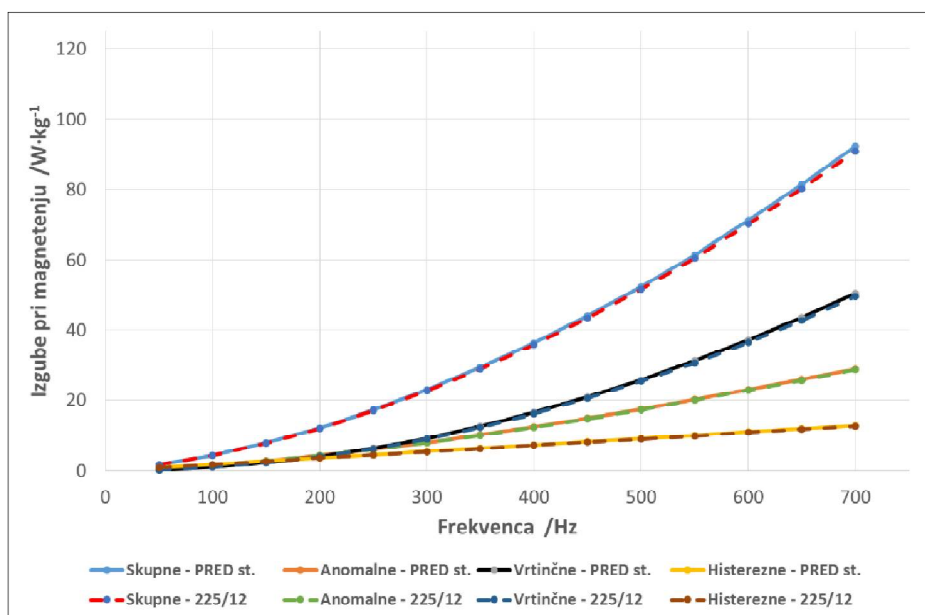
Slika 58: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C



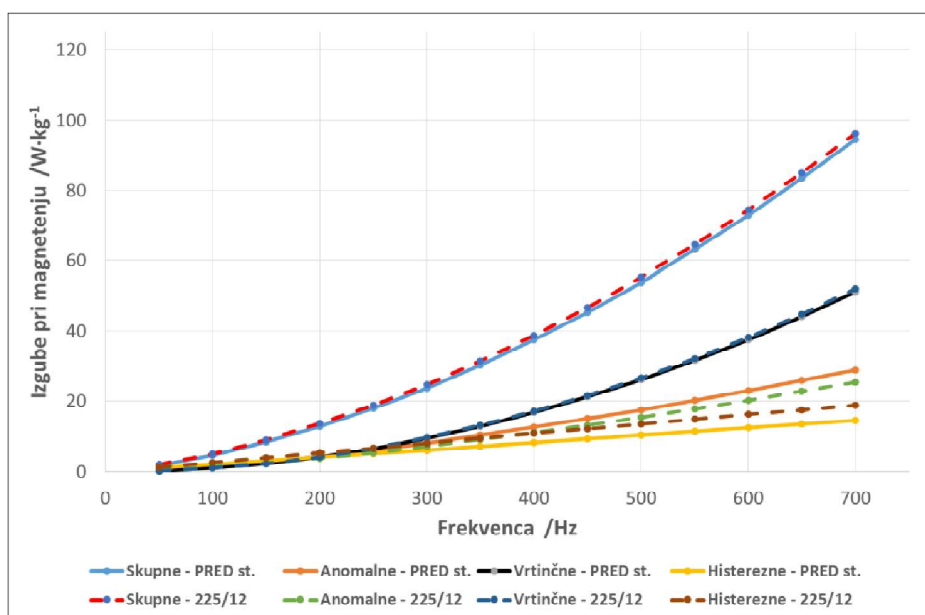
Slika 59: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C

V vzorcu EV15 z nizko vsebnostjo ogljika, 0,0012 mas. % C (slika 58), so razlike med nestaranim in magnetno staranim vzorcem minimalne. Pri vzorcu EV15 z visokim ogljikom, 0,0025 mas. % C (slika 59), so skupne in histerezne magnetne izgube večje v nestaranem vzorcu. Anomalne magnetne izgube so v nestaranem vzorcu za malenkost višje, vrtinčne magnetne izgube pa se razlikujejo minimalno.

Na slikah 60 in 61 so predstavljene odvisnosti magnetnih izgub: skupnih, anomalnih, vrtinčnih in histereznih od frekvence 50 Hz do 700 Hz za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$ za kakovost EV15:



Slika 60: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C

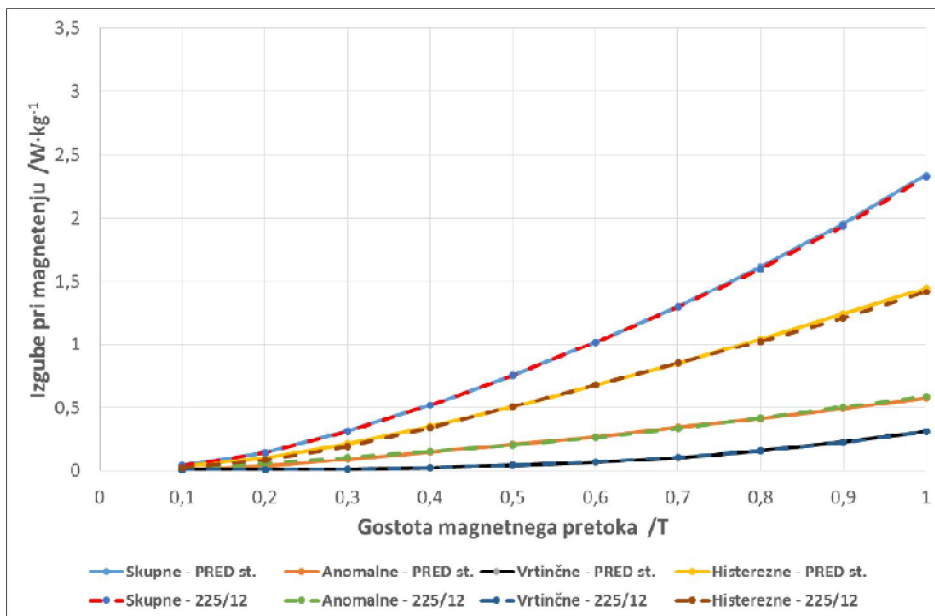


Slika 61: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C

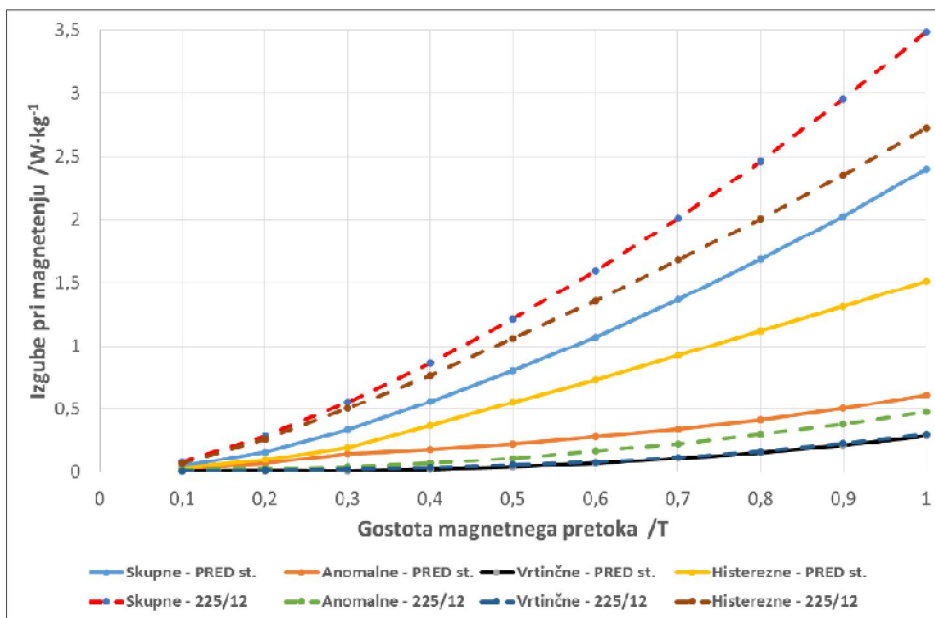
Odvisnosti magnetnih izgub od frekvenca pri vzorcu z nizkim ogljikom, 0,0012 mas. % C, se razlikujejo minimalno (slika 60). V magnetno staranem vzorcu EV15 (slika 61), v katerem je bil ogljik višji ($C = 0,0025$ mas. %), se skupne in vrtinčne magnetne izgube razlikujejo minimalno. Anomalne magnetne izgube so v nestaranem vzorcu malo višje, histerezne magnetne izgube pa so v magnetno staranem vzorcu EV15 malo višje, kot so v nestaranem vzorcu.

4.3.2.4 Vzorci kakovosti EV12

Na slikah 62 in 63 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne) pri 50 Hz ter gostoti magnetnega polja do 1 T za vzorce kakovosti EV12, pred in po magnetnem staranju $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$:



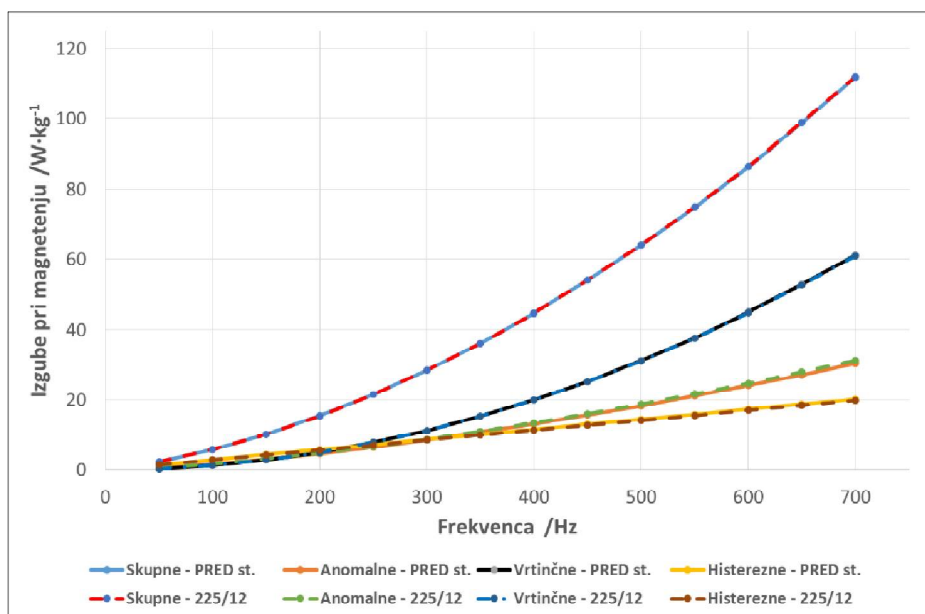
Slika 62: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C



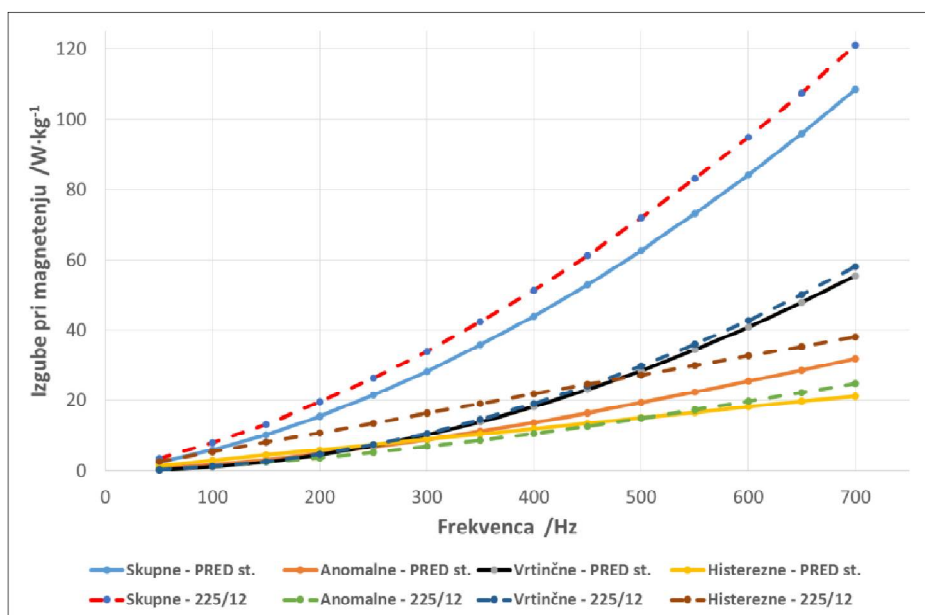
Slika 63: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C

Razlik med magnetnimi izgubami v nestaranem in magnetno staranem vzorcu EV12 z nizkim 0,0015 mas. % C ni, oziroma so minimalne (slika 62). Razlika med magnetnimi izgubami se pokaže v vzorcu z 0,0037 mas. % C. S slike 63 lahko razberemo, da so skupne in histerezne magnetne izgube po magnetnem staranju zelo narasle (skupne za $1,0868 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; histerezne za $1,2098 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$). Anomalne magnetne izgube so v nestaranem vzorcu malo večje, kot so v magnetno staranem vzorcu EV12. Vrtinčne magnetne izgube odstopajo v magnetno staranem in nestaranem vzorcu EV12 minimalno.

Na slikah 64 in 65 so prikazane odvisnosti magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtinčne in histerezne) pri frekvenci od 50 Hz do 700 Hz za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 225 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12 \text{ h}$ za kakovost EV12:



Slika 64: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C



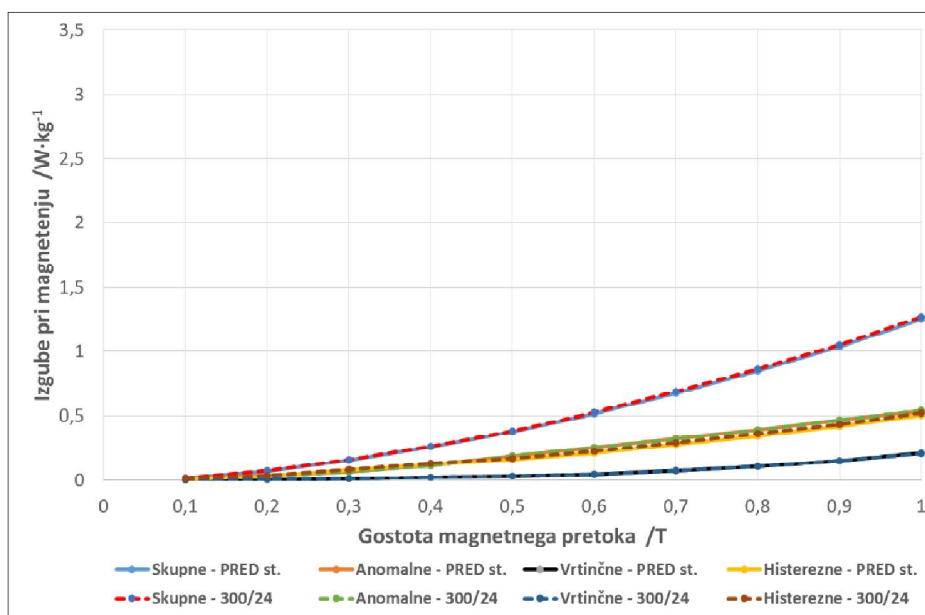
Slika 65: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C

V vzorcu EV12 z nizkim ogljikom: 0,0015 mas. % (slika 64) so razlike med magnetnimi izgubami minimalne. Razlike se pokažejo v vzorcu EV21, ki je vseboval visok ogljik: 0,0037 mas. % (slika 65). Pri tem vzorcu so skupne in histerezne magnetne izgube večje v magnetno staranem vzorcu, anomalne magnetne izgube pa so večje v nestaranem vzorcu, in sicer za $7,1468 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. Vrtinčne magnetne izgube imajo minimalno razliko.

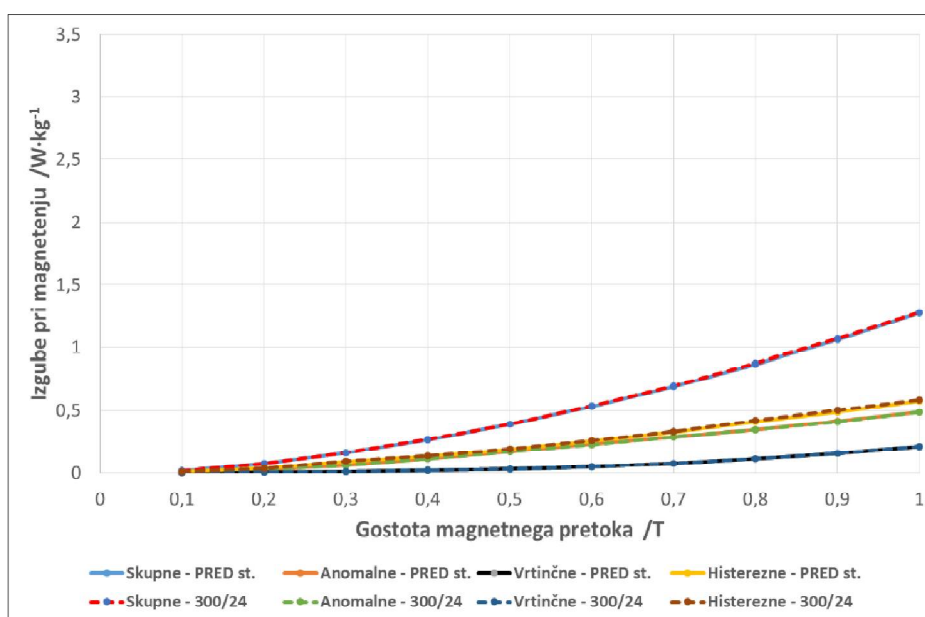
4.3.3 Temperatura 300 °C in čas žarjenja 24 h

4.3.3.1 Vzorci kakovosti EV21

Na slikah 66 in 67 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtinčne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV21, pred in po magnetnem staranju na $T = 300 \text{ °C}$, $t = 24 \text{ h}$:



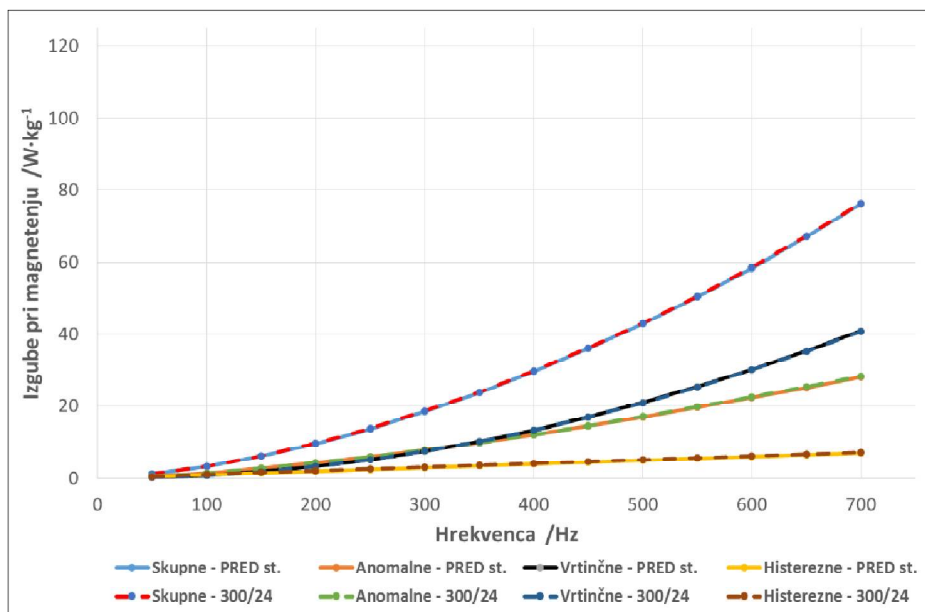
Slika 66: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C



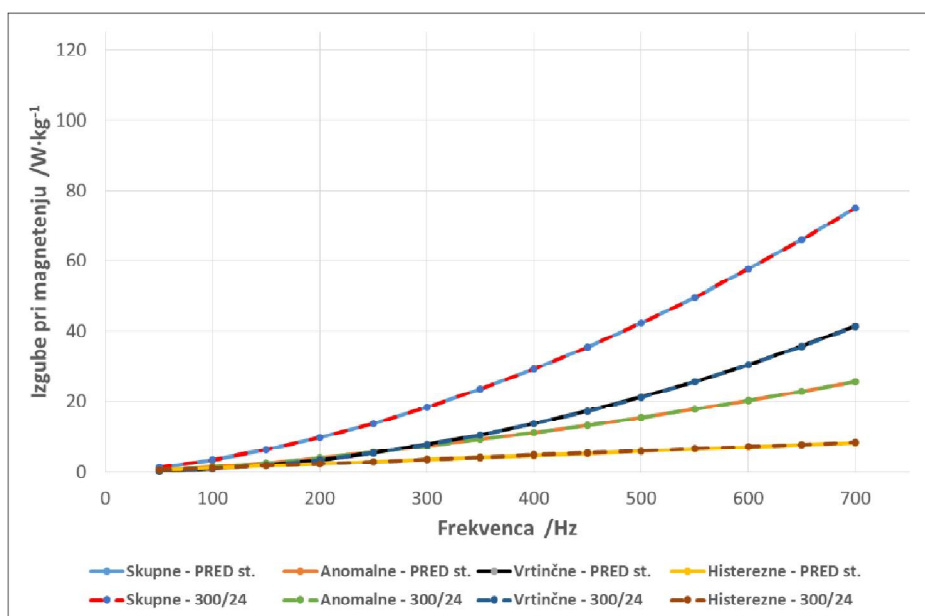
Slika 67: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C

V vzorcu EV21 z nizkim ogljikom, 0,0014 mas. % C, in v vzorcu z visokim ogljikom, 0,0033 mas. % C, so minimalne razlike v magnetnih izgubah med nestaranim in magnetno staranim vzorcem (slikah 66 in 67).

Sliki 68 in 69 prikazujeta odvisnost magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) pri magnetenju od frekvence (50 Hz do 700 Hz) za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 24\text{ h}$ za kakovost EV21:



Slika 68: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C

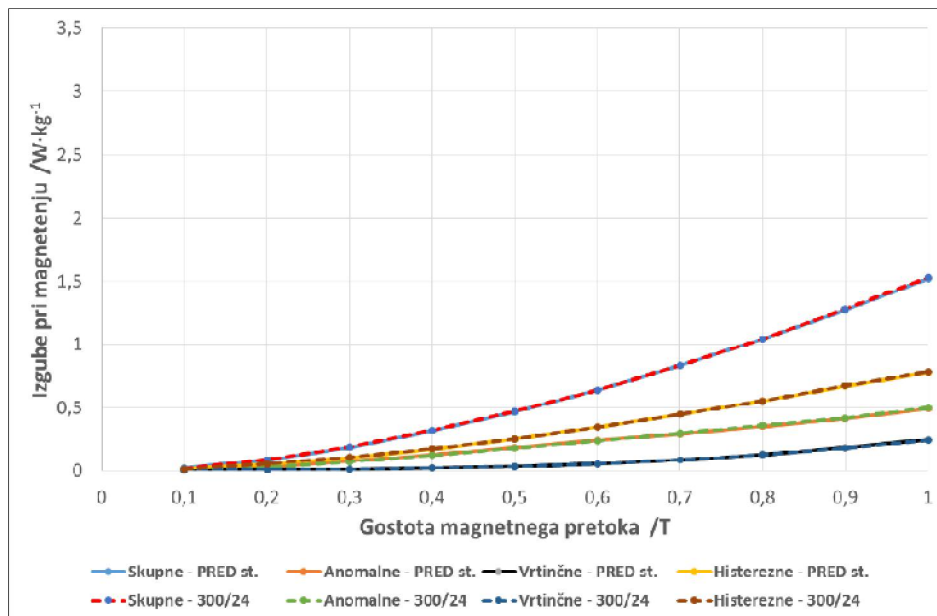


Slika 69: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C

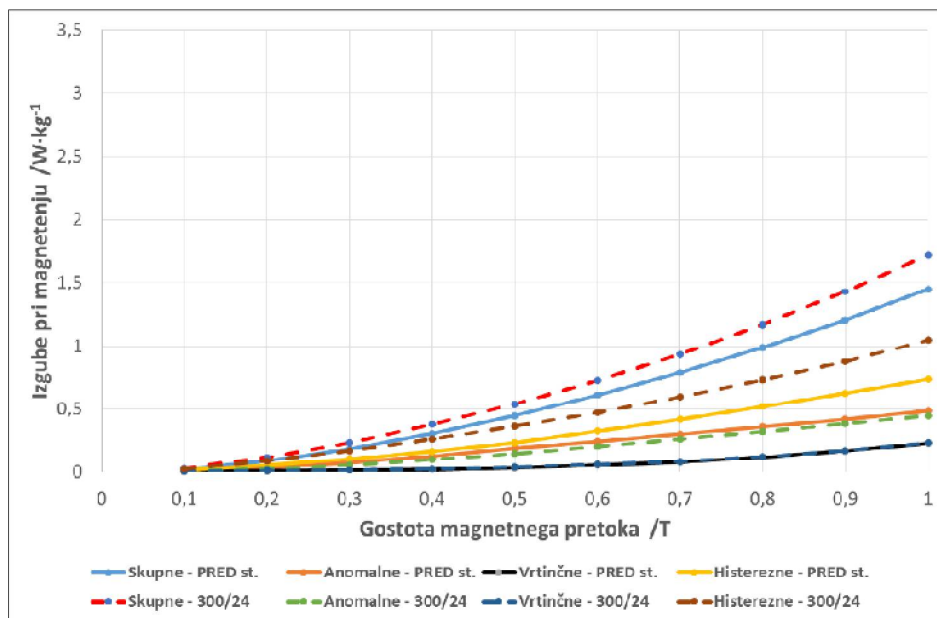
S slik 68 in 69 vidimo, da so razlike med magnetnimi izgubami v vzorcu EV21 z nizkim in visokim deležem ogljika minimalne.

4.3.3.2 Vzorci kakovosti EV18

Na slikah 70 in 71 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja do 1 T za vzorce kakovosti EV18 pred in po magnetnem staranju $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 24\text{ h}$:



Slika 70: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C

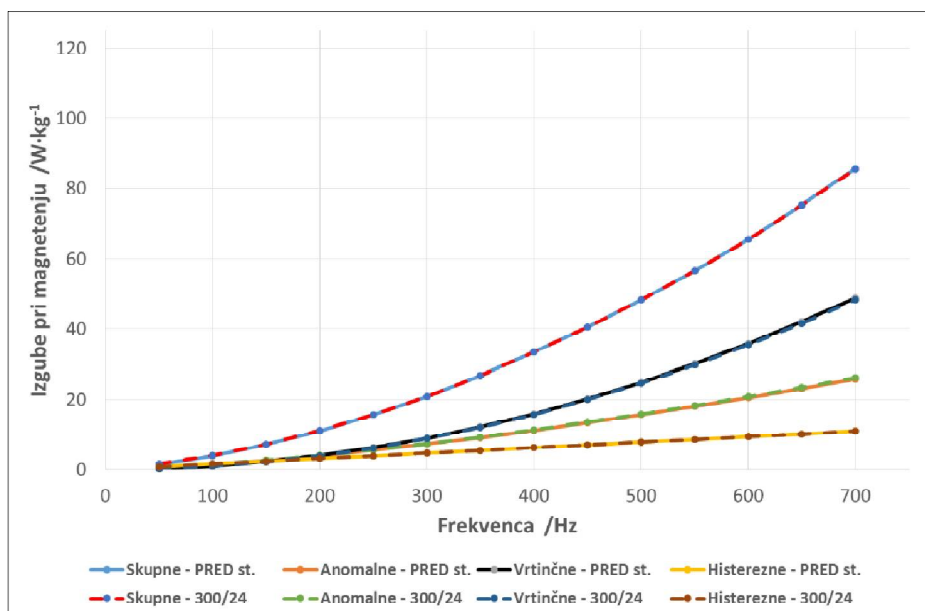


Slika 71: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C

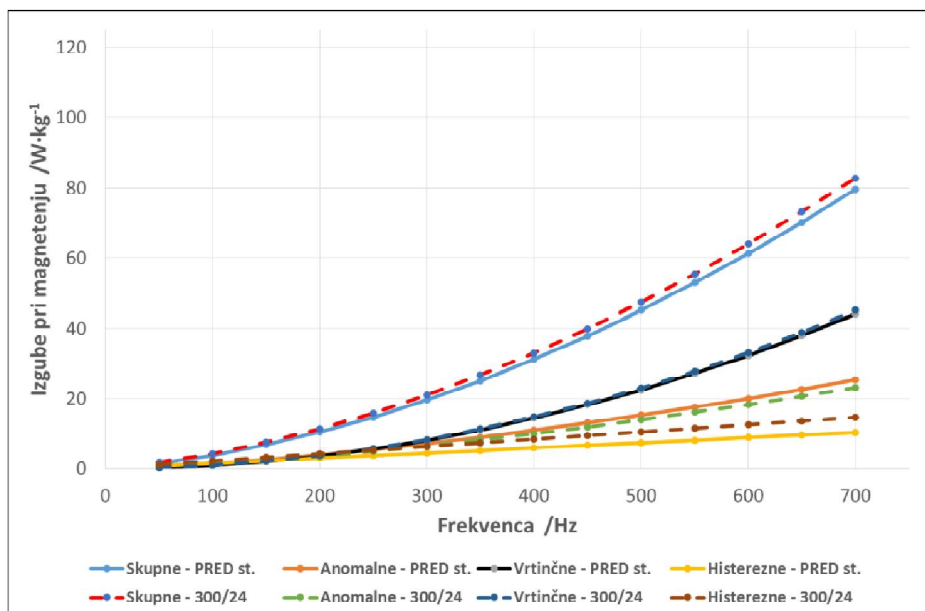
V vzorcu EV18 z nizkim ogljikom, 0,0013 mas. % C, so razlike med magnetnimi izgubami minimalne (slika 70). Odstopanja skupnih in histereznih magnetnih izgub se pokažejo v vzorcu z visokim ogljikom, 0,0039 mas. % C (slika 71), saj so pri magnetno staranem vzorcu EV18 le-te večje. Anomalne magnetne

izgube so v nestaranem vzorcu malenkostno večje, vrtilne magnetne izgube pa odstopajo minimalno.

Sliki 72 in 73 prikazujeta odvisnost magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) od frekvence od 50 Hz do 700 Hz za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 24\text{ h}$ za kakovost EV18:



Slika 72: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C

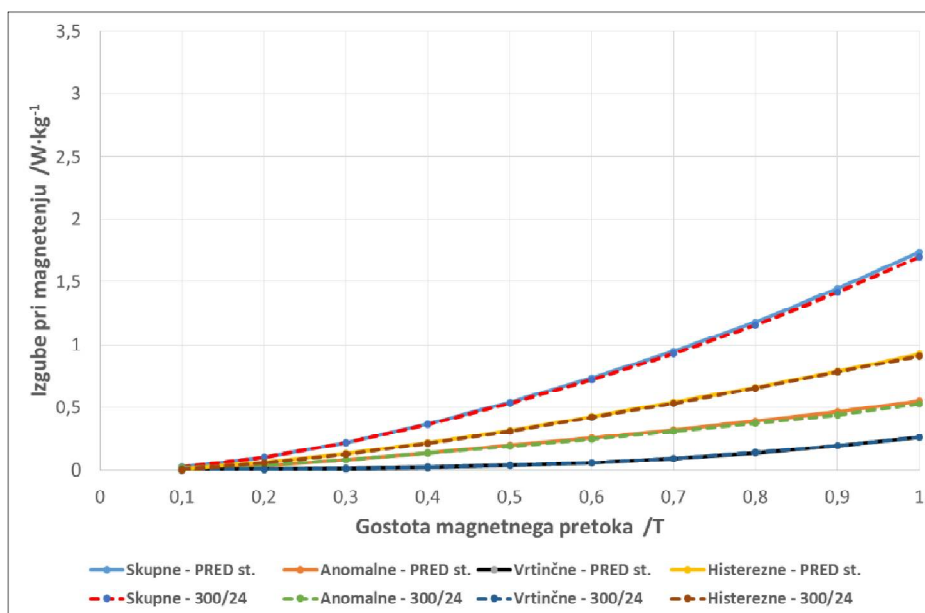


Slika 73: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C

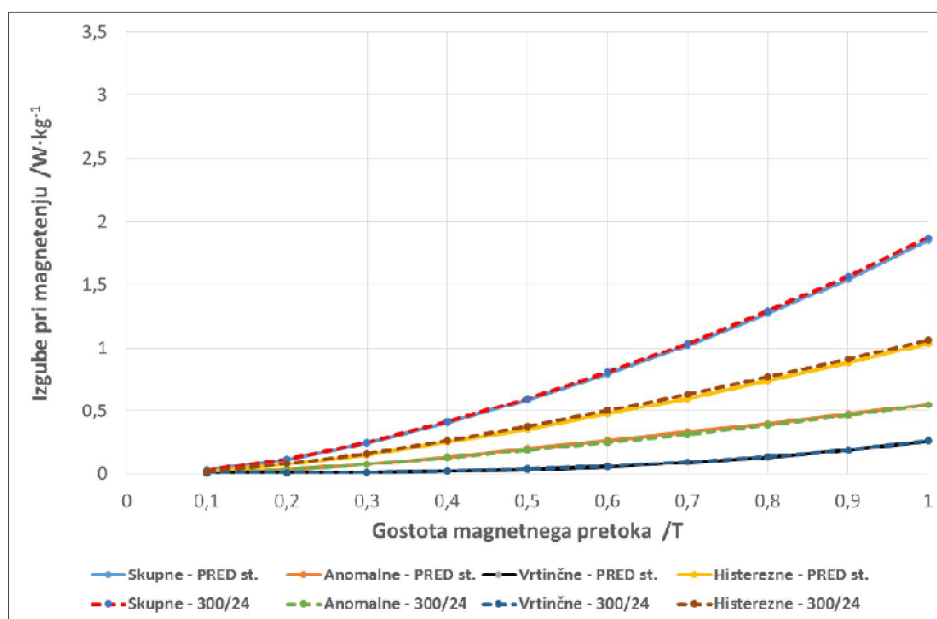
V vzorcu EV18 z nizkim ogljikom, 0,0013 mas. % C, ni razlik v magnetnih izgubah (slika 72). V magnetno staranem vzorcu EV18 z visokim ogljikom, 0,0039 mas. % C (slika 73), so skupne in histerezne magnetne izgube malo večje od magnetnih izgub v nestaranem vzorcu. Anomalne magnetne izgube so rahlo večje v nestaranem vzorcu, vrtilne pa se med nestaranim in magnetno staranim vzorcem EV18 razlikujejo minimalno.

4.3.3.3 Vzorci kakovosti EV15

Na slikah 74 in 75 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV15, pred in po magnetnem staranju $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 24\text{ h}$:



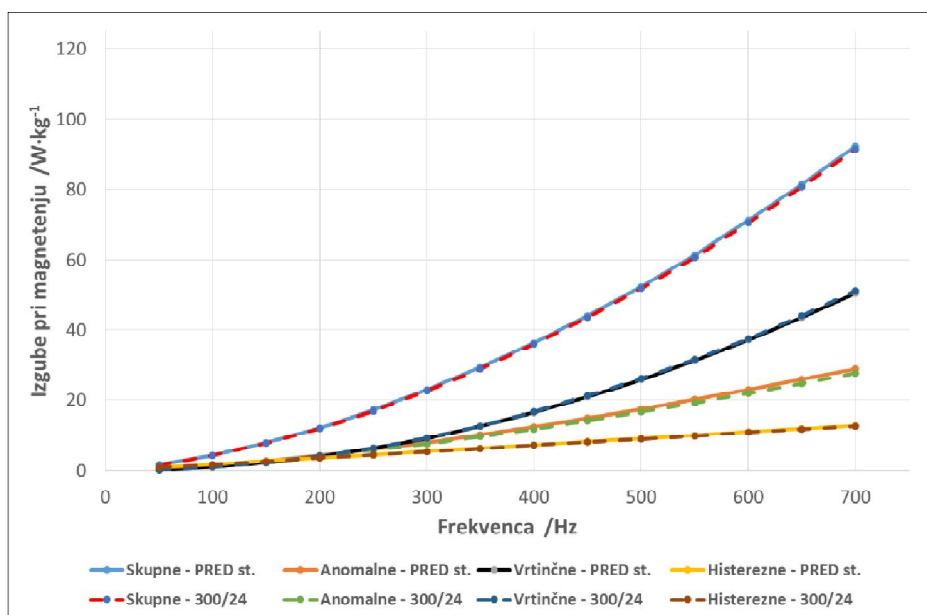
Slika 74: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C



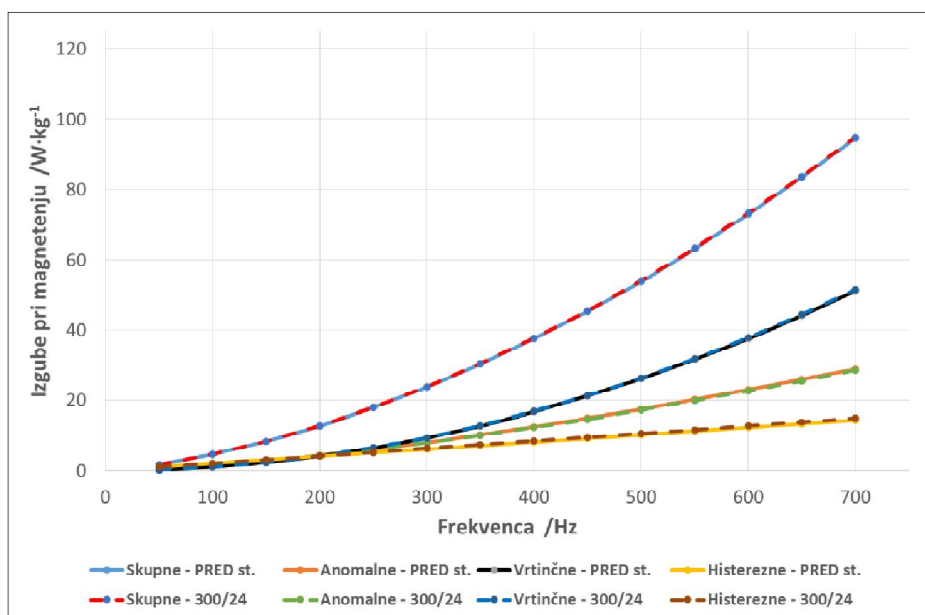
Slika 75: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C

Na slikah 74 in 75 so prikazane razdelitve magnetnih izgub v vzorcu EV15 z nizkim ogljikom, 0,0012 mas. % C, in visokim ogljikom, 0,0025 mas. % C. V obeh primerih so razlike med nestaranimi in magnetno staranimi vrednostmi magnetnih izgub minimalne.

Na slikah 76 in 77 so prikazane odvisnosti magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtinčne in histerezne) od frekvence od 50 Hz do 700 Hz za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 300^\circ\text{C}$, $t = 24$ h za kakovost EV15:



Slika 76: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C

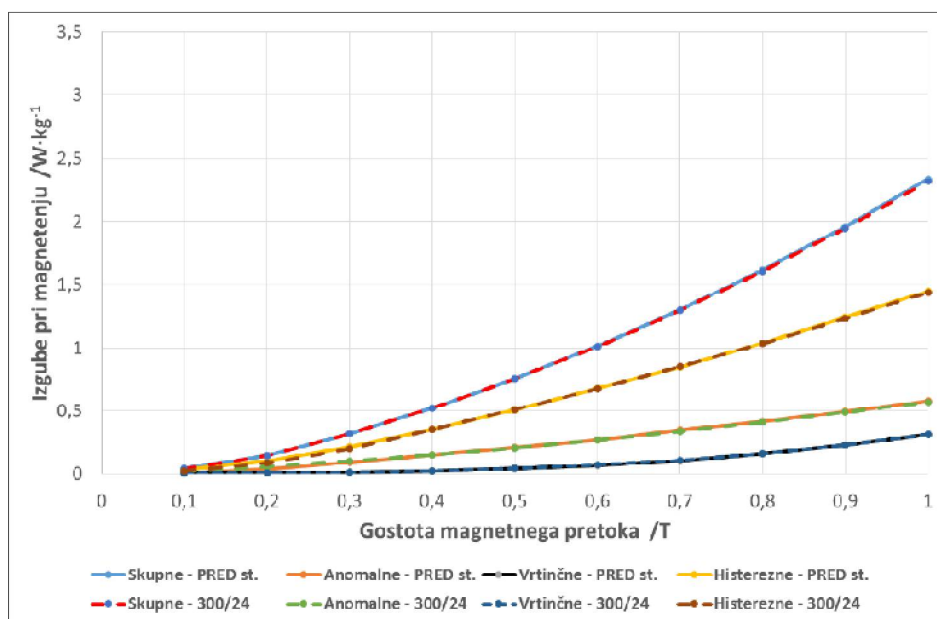


Slika 77: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C

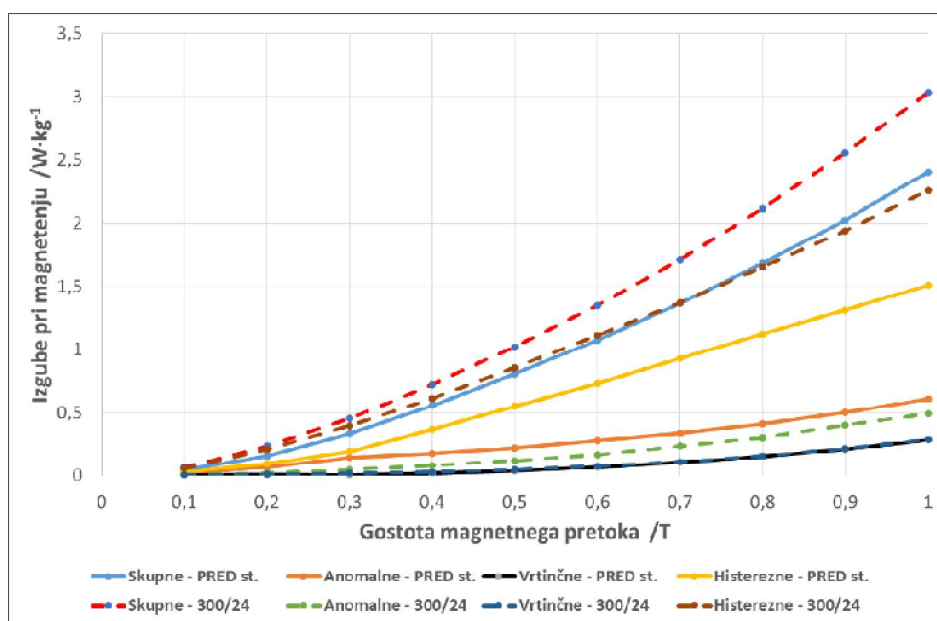
Na slikah 76 in 77 so prikazane razdelitve magnetnih izgub v odvisnosti od frekvence za vzorec EV15 z nizkim ogljikom, 0,0012 mas. % C, in visokim ogljikom, 0,0025 mas. % C. V obeh primerih so razlike med magnetno staranimi in nestaranimi vrednostmi minimalne.

4.3.3.4 Vzorci kakovosti EV12

Na slikah 78 in 79 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtinčne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja do 1 T za vzorce kakovosti EV12, pred in po magnetnem staranju $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 24\text{ h}$:



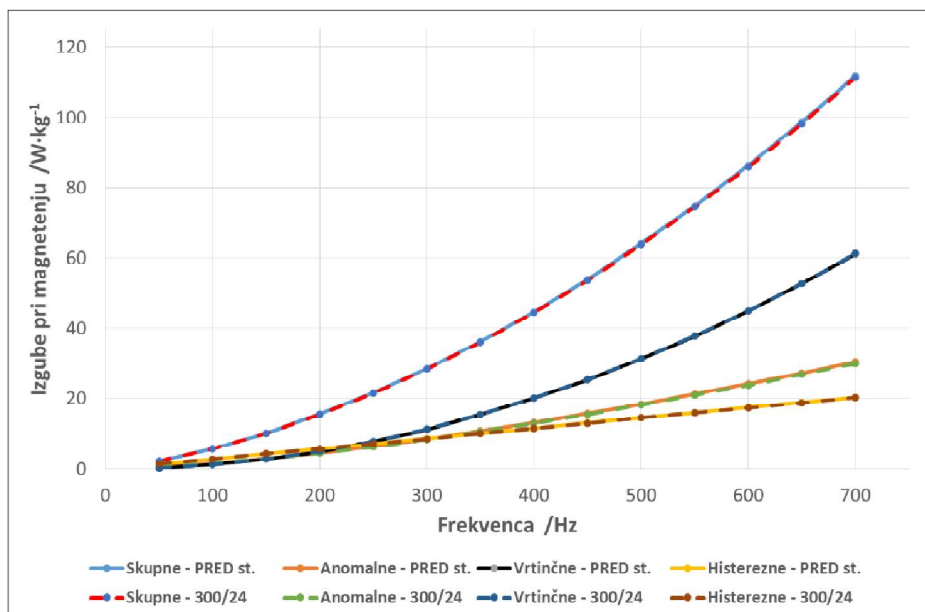
Slika 78: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C



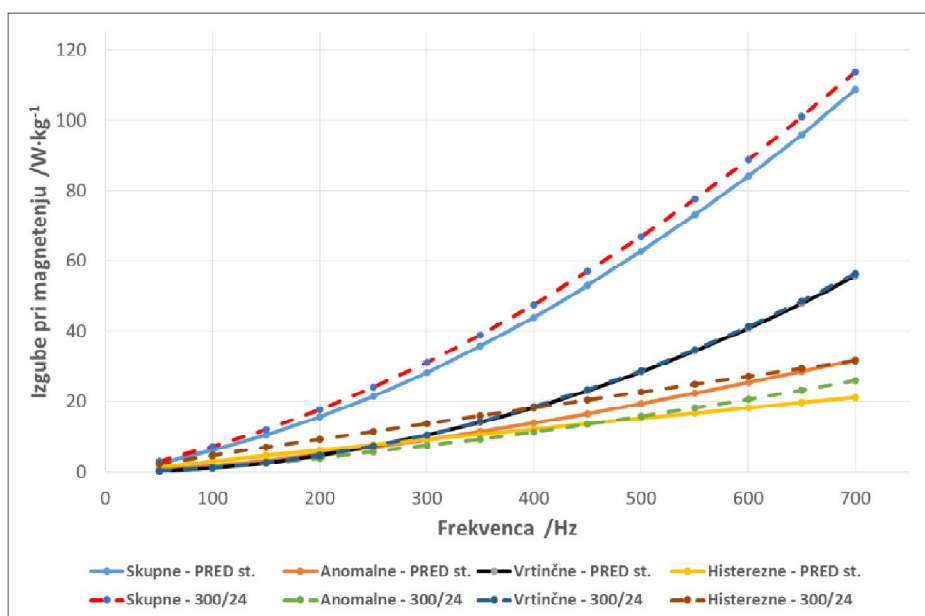
Slika 79: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C

Pri vzorcu EV12 z nizkim ogljikom, 0,0015 mas. % C (slika 78), se magnetne izgube nestaranega in magnetno staranega vzorca spreminjajo minimalno. V vzorcu EV12 z visokim ogljikom, 0,0037 mas. % C (slika 79), vidimo, da so skupne in histerezne magnetne izgube v magnetno staranem vzorcu večje, anomalne magnetne izgube pa so manjše. Razlike v vrtilničnih magnetnih izgubah v nestaranem in magnetno staranem vzorcu EV12 ni zaznati.

Sliki 80 in 81 prikazujeta odvisnost magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) od frekvence od 50 Hz do 700 Hz za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 24\text{ h}$ za kakovost EV12:



Slika 80: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C



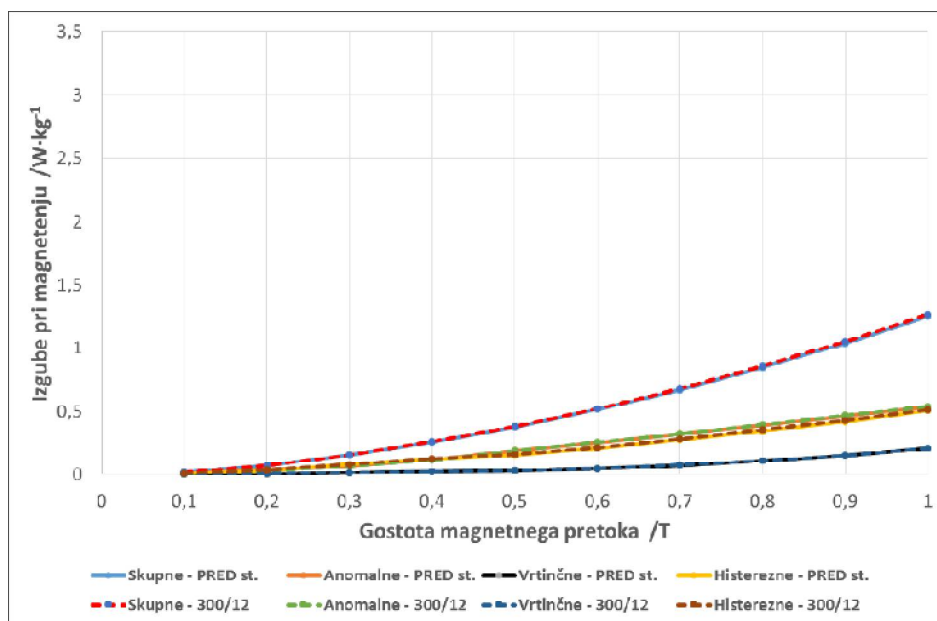
Slika 81: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C

Na sliki 80, ki prikazuje izris krivulj magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) pri vzorcu EV12 z nizkim ogljikom, 0,0015 mas. % C, lahko razberemo, da ostaja razlika minimalna med nestaranim in magnetno staranim vzorcem. V vzorcu EV12, ki je imel visok ogljik, 0,0037 mas. % (slika 81), pa so se skupne in histerezne magnetne izgube povešale, anomalne magnetne izgube pa zmanjšale. Vrtilne magnetne izgube so tako rekoč enake v magnetno staranem in magnetno nestaranem vzorcu EV12.

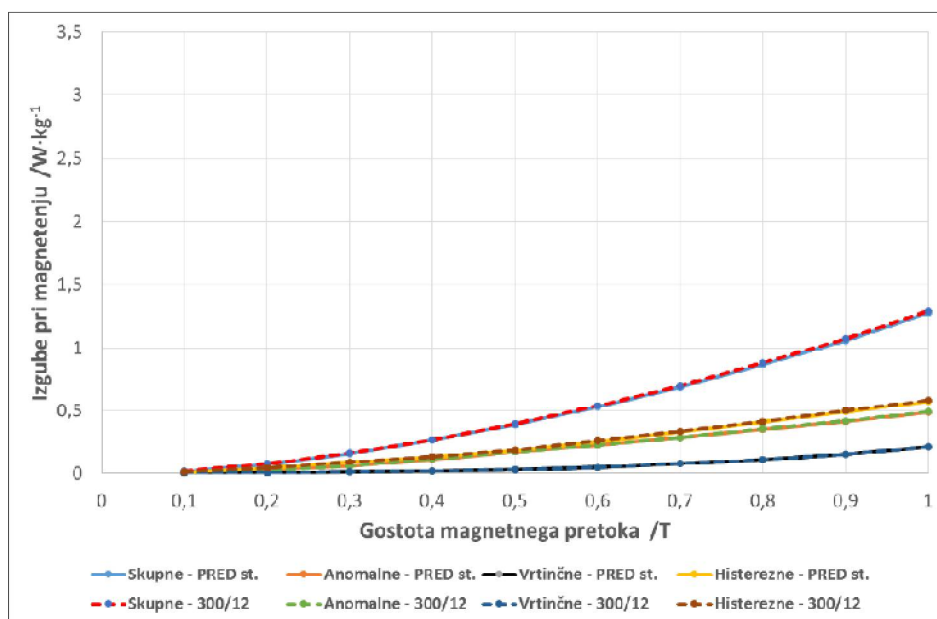
4.3.4 Temperatura 300 °C in čas žarjenja 12 h

4.3.4.1 Vzorci kakovosti EV21

Na slikah 82 in 83 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtilne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV21, pred in po magnetnem staranju $T = 300\text{ °C}$, $t = 12\text{ h}$:



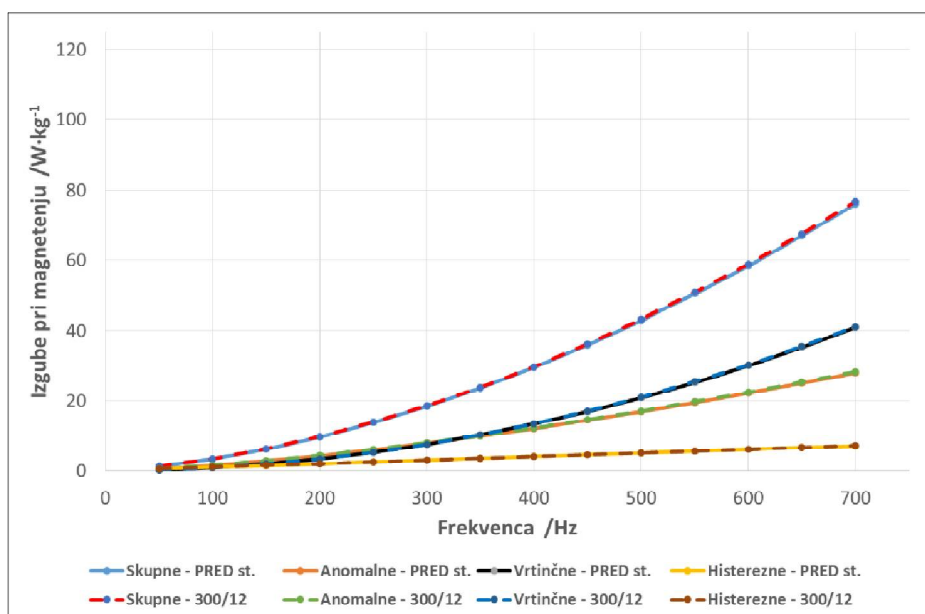
Slika 82: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C



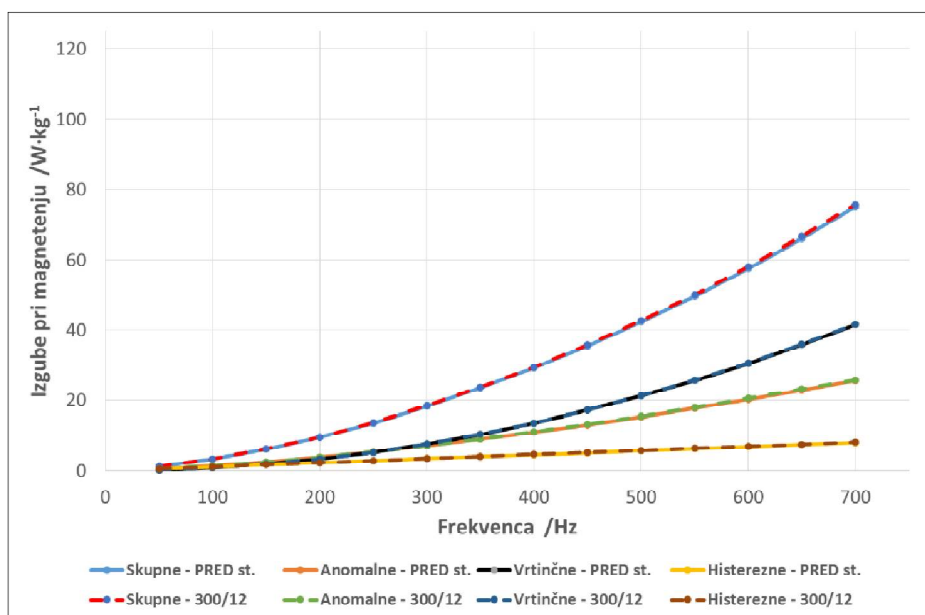
Slika 83: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C

V vzorcu EV21 z nizkim ogljikom, 0,0014 mas. % C (slika 82), so razlike v magnetnih izgubah minimalne. Minimalne razlike so prav tako v vzorcu z visokim ogljikom, to je 0,0033 mas. % C (slika 83).

Sliki 84 in 85 prikazujeta odvisnost magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtinčne in histerezne) pri magnetenju od frekvence (50 Hz do 700 Hz) za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$, kakovost EV21:



Slika 84: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV21, vzorec z 0,0014 mas. % C



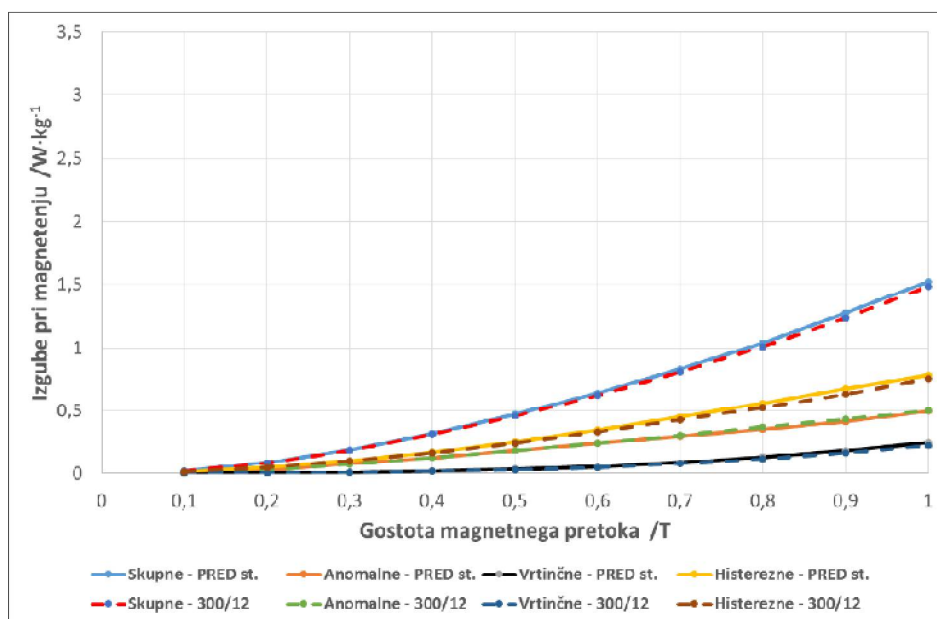
Slika 85: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvenca za kakovost EV21, vzorec z 0,0033 mas. % C

Na sliki 84, kjer je prikazan vzorec EV21 z nizkim ogljikom, 0,0014 mas. % C, so razlike v magnetnih izgubah v nestaranem in magnetno staranem vzorcu minimalne. Na sliki 85 so prikazane krivulje za vzorec

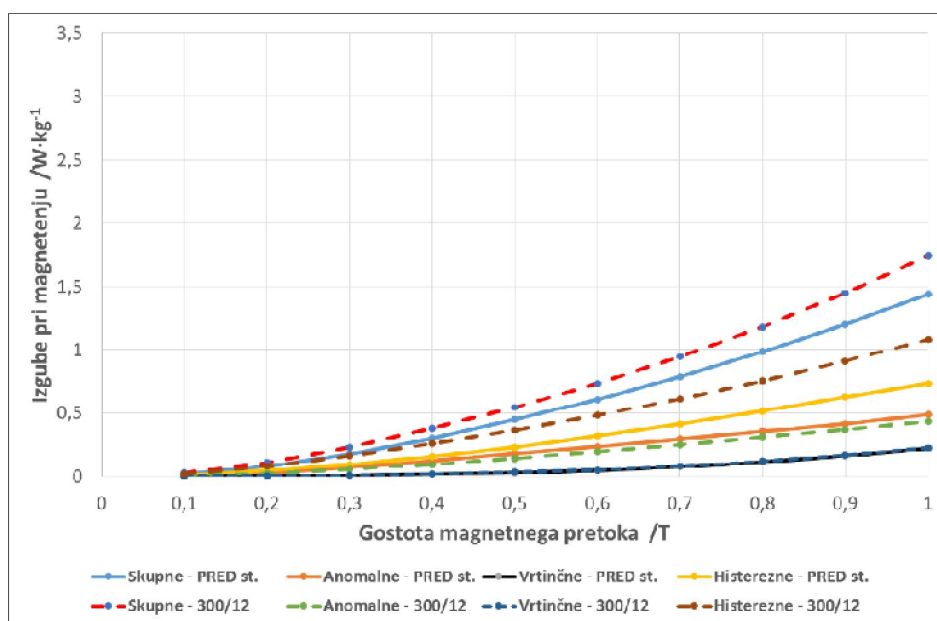
EV21 z visokim ogljikom, 0,0033 mas. % C. Magnetne izgube med vzorcem EV21, ki je bil nestaran, in med vzorcem EV21, ki je bil magnetno staran ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$), so minimalne.

4.3.4.2 Vzorci kakovosti EV18

Na slikah 86 in 87 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtinčne in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV18, pred in po magnetnem staranju $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$:



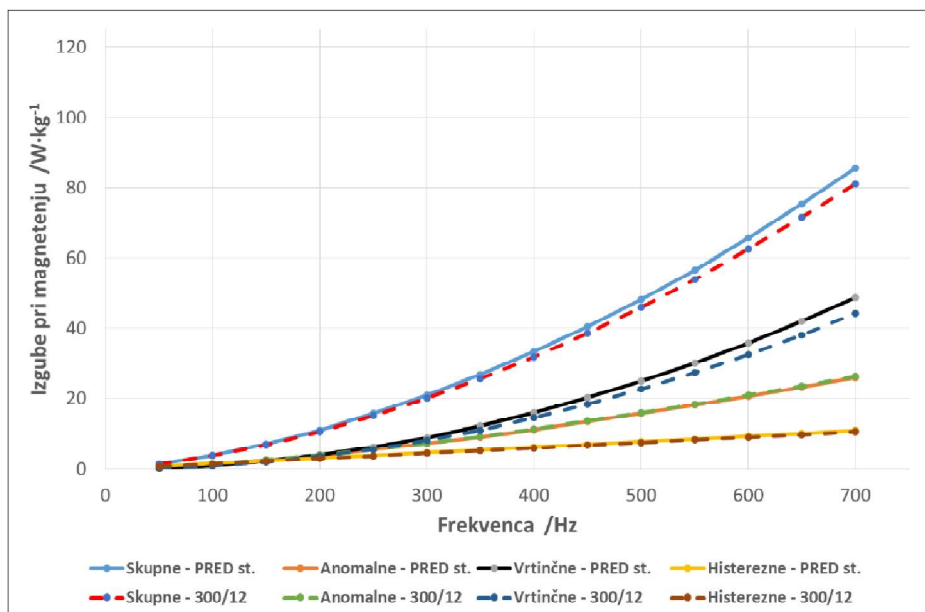
Slika 86: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C



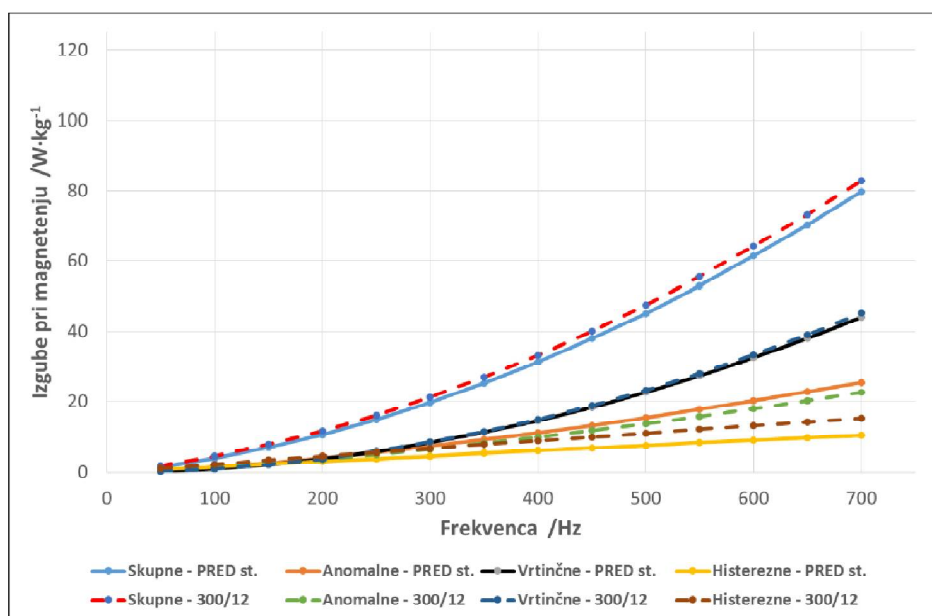
Slika 87: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C

V vzorcu EV18 z nizkim ogljikom: 0,0013 mas. % (slika 86) so razlike v magnetnih izgubah minimalne. V staranem vzorcu EV18 z visokim ogljikom, 0,0039 mas. % C, ki je prikazan na sliki 87, so skupne in histerezne magnetne izgube malo večje od magnetnih izgub v nestaranem vzorcu. Anomalne magnetne izgube so rahlo večje (za $0,0535 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ pri 1T) v nestaranem vzorcu, vrtilne pa se razlikujejo minimalno.

Sliki 88 in 89 prikazujeta odvisnost magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) od frekvence od 50 Hz do 700 Hz za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$ kakovosti EV18:



Slika 88: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0013 mas. % C



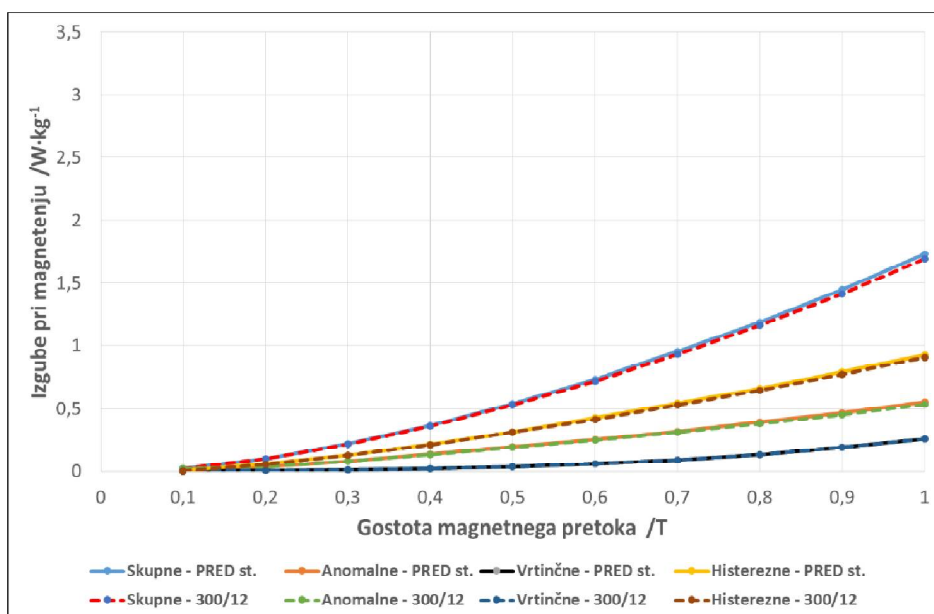
Slika 89: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV18, vzorec z 0,0039 mas. % C

V vzorcu EV18 z nizkim ogljikom, 0,0013 mas. % C (slika 86), je razlika med magnetnimi izgubami med nestaranim in magnetno staranim vzorcem minimalna. V staranem vzorcu EV18 z visokim ogljikom, 0,0039 mas. % C (slika 89), so skupne in histerezne magnetne izgube malo večje od magnetnih

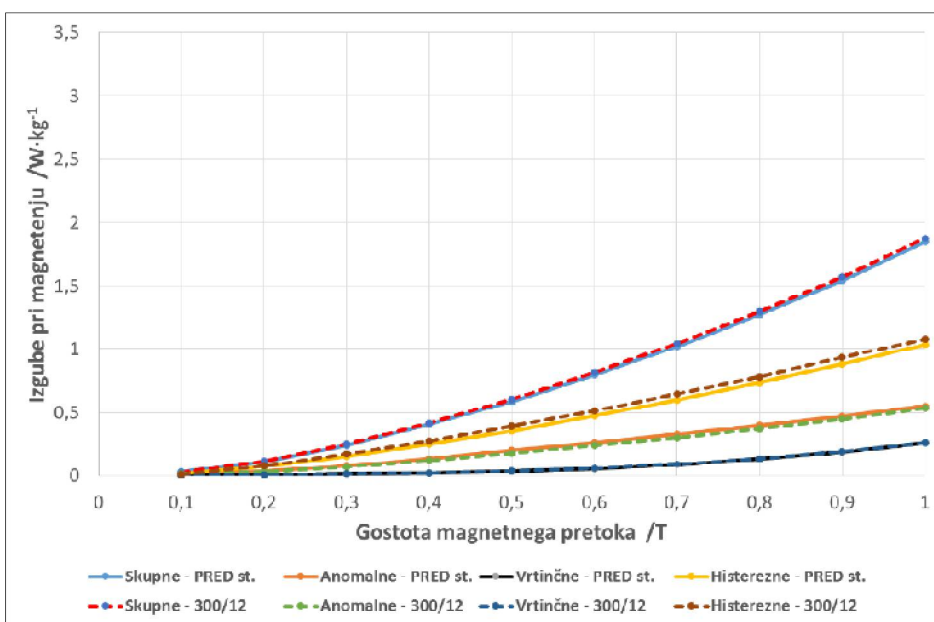
izgub v nestaranem vzorcu. Anomalne magnetne izgube so rahlo večje v nestaranem vzorcu, vrtnične pa se razlikujejo minimalno.

4.3.4.3 Vzorci kakovosti EV15

Na slikah 90 in 91 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtnične in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV15, pred in po magnetnem staranju na $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$:



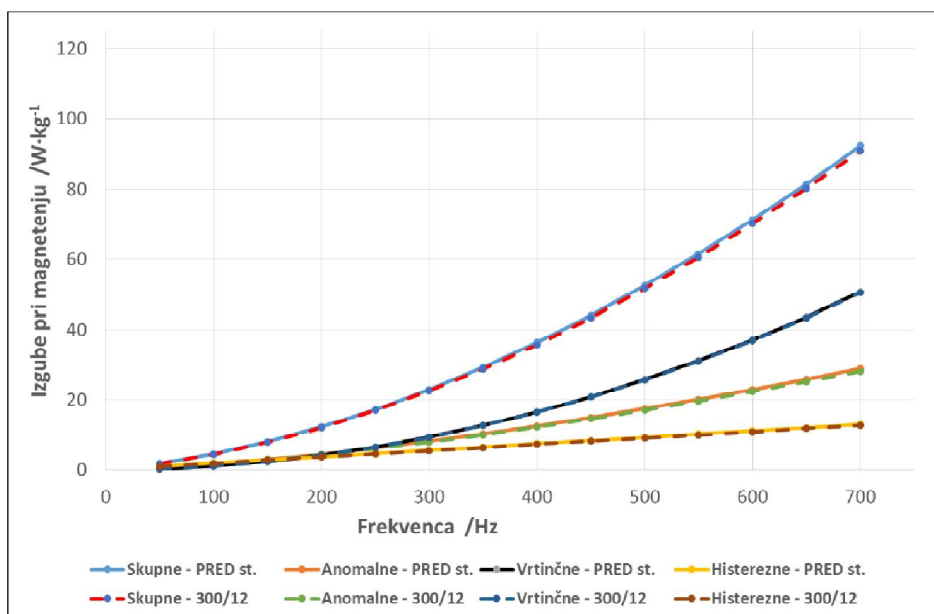
Slika 90: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C



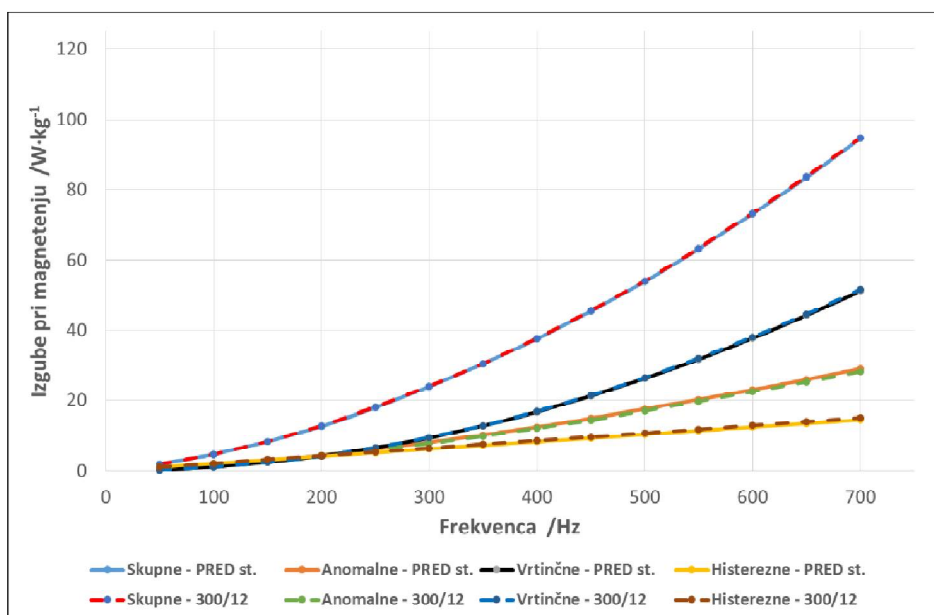
Slika 91: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C

V vzorcu EV15 z nizkim ogljikom: 0,0012 mas. % (slika 90) je odstopanje v magnetnih izgubah minimalno. Na sliki 91 vidimo, da je v vzorcu EV15, kjer je delež ogljika visok, 0,0025 mas. %, odstopanje v magnetnih izgubah minimalno, rahlo odstopajo le histerezne magnetne izgube, ki so v staranem vzorcu EV15 rahlo višje.

Sliki 92 in 93 prikazujeta odvisnost magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) od frekvence 50 Hz do 700 Hz za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$ kakovosti EV15:



Slika 92: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0012 mas. % C

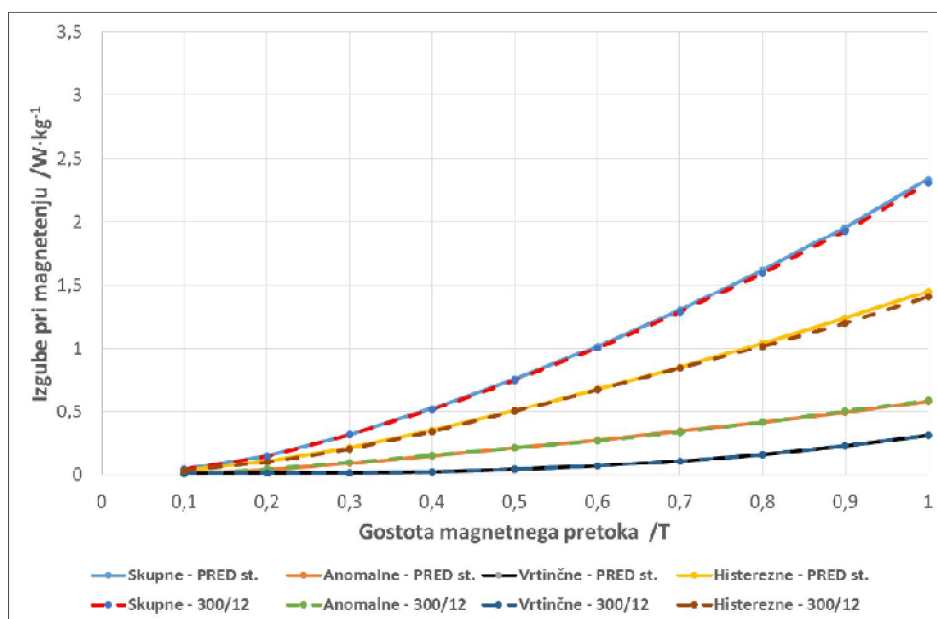


Slika 93: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV15, vzorec z 0,0025 mas. % C

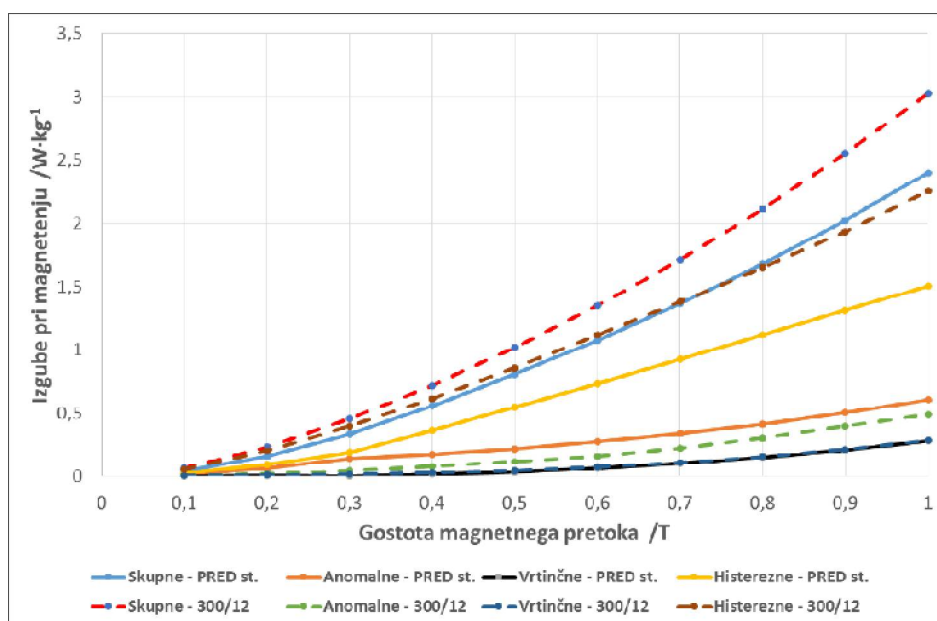
V vzorcu EV15 z nizkim ogljikom, 0,0012 mas. % C (slika 92), in v vzorcu EV15 z visokim ogljikom, 0,0025 mas. % C (slika 93), med nestaranimi in magnetno staranimi vrednostmi ni razlik oziroma so minimalne.

4.3.4.4 Vzorci kakovosti EV12

Na slikah 94 in 95 so prikazane odvisnosti izgub pri magnetenju od vrste magnetnih izgub (skupne, histerezne, vrtnične in anomalne) pri 50 Hz in gostoti magnetnega polja od 0,1 T do 1 T za vzorce kakovosti EV12, pred in po magnetnem staranju na $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$:



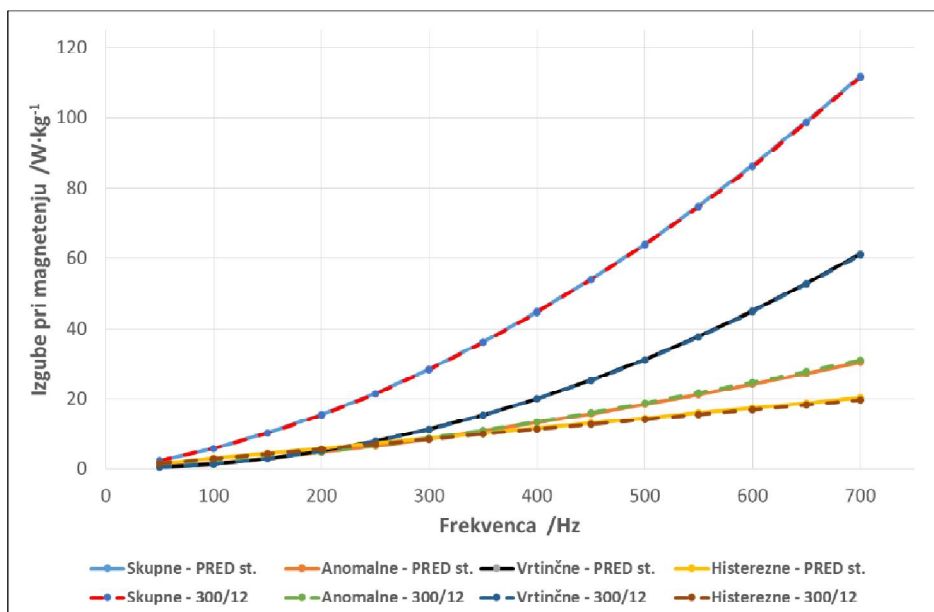
Slika 94: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C



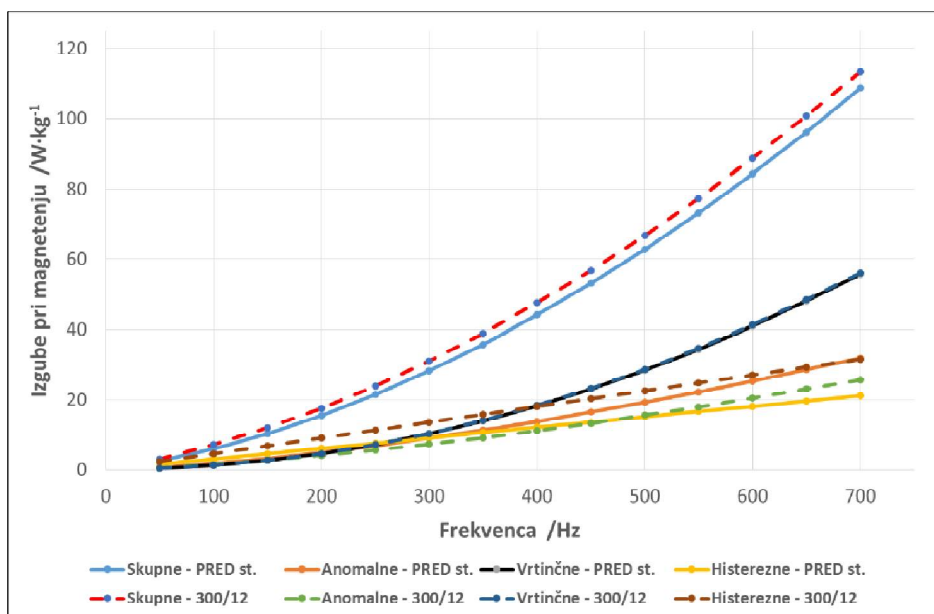
Slika 95: Razdelitev izgub pri magnetenju za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C

V vzorcu EV12 z nizkim ogljikom, 0,0015 mas. % C (slika 94), je odstopanje v magnetnih izgubah minimalno. Na sliki 95 so prikazane magnetne izgube za vzorec EV12 z visokim ogljikom, 0,0037 mas. % C. Skupne in histerezne magnetne izgube so večje v magnetno staranem vzorcu. Anomalne magnetne izgube so v staranem vzorcu EV12 manjše, kot so v nestaranem vzorcu za $0,1176 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ pri 1T. Vrtinčne izgube pa odstopajo minimalno ($0,0022 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ pri 1T).

Na slikah 96 in 97 je prikazana odvisnost magnetnih izgub (skupne, anomalne, vrtilne in histerezne) od frekvence 50 Hz do 700 Hz za nestaran in magnetno staran vzorec $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 12\text{ h}$ kakovost EV12:



Slika 96: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0015 mas. % C



Slika 97: Razdelitev izgub pri magnetenju v odvisnosti od frekvence za kakovost EV12, vzorec z 0,0037 mas. % C

V vzorcu EV12 z nizkim ogljikom, 0,0015 mas. % C (slika 96), je odstopanje v magnetnih izgubah minimalno. Na sliki 97 so prikazane magnetne izgube za vzorec EV12 z visokim ogljikom, 0,0037 mas. %

C. Skupne in histerezne magnetne izgube so večje v staranem vzorcu EV12. Anomalne magnetne izgube so v magnetno staranem vzorcu EV12 sprva manjše, potem pa pri 500 Hz postanejo večje od anomalnih magnetnih izgub v nestaranem vzorcu, razlika je $6,16417 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ pri 700 Hz. Vrtinčne magnetne izgube se spremenijo minimalno.

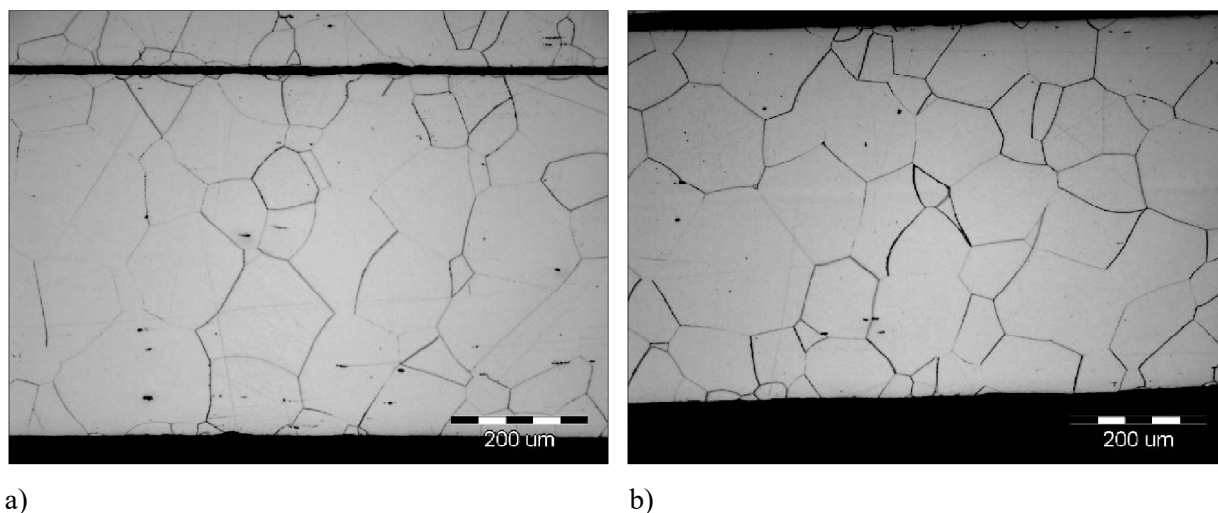
4.4 Metalografska analiza

Izbrane vzorce neorientiranih elektropločevin EV21, EV18, EV15 in EV12 (tabela 3) smo metalografsko analizirali s svetlobno mikroskopijo.

Slike 98 do 101 prikazujejo pregled mikrostruktur izbranih vzorcev gotovih neorientiranih elektropločevin. Na teh vzorcih smo izvedli magnetno staranje pri standardnih pogojih [16] in pri dodatno določenih pogojih magnetnega staranja (podatki iz tabele 2).

4.4.1 Mikrostruktura vzorcev EV21

Slika 98 prikazuje značilno feritno in polikristalno mikrostrukturo v vzorcih kakovosti EV21, po končnem razogljichenju in rekristalizacijskem žarjenju (gotova neorientirana elektropločevina).

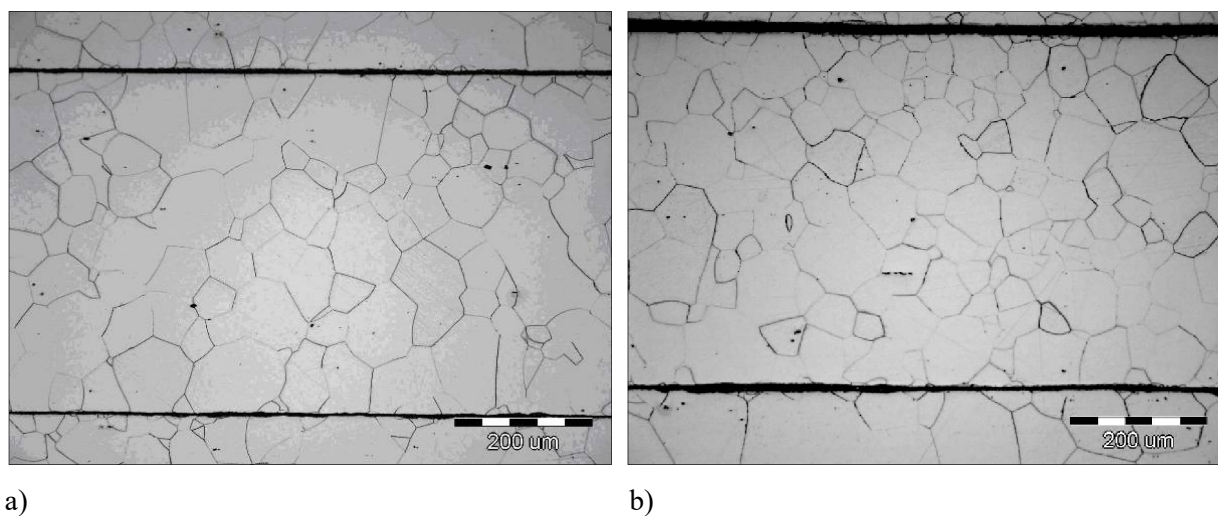


Slika 98: Feritna mikrostruktura vzorca EV21 a) z nizkim 0,0014 mas. % C, b) z visokim 0,0033 mas. % C

Povprečna velikost feritnih kristalnih zrn v vzorcu kakovosti EV21 z nizkim ogljikom, 0,0014 mas. % C (slika 98a), je 0,127 mm (razred velikosti 3,0 po ASTM E112-10 (2010) [49]). Vzorec z visokim ogljikom, 0,0033 mas. % C (slika 98b), ima povprečno velikost feritnih kristalnih zrn 0,151 mm (razred velikosti 2,5 po ASTM E112-10 (2010)).

4.4.2 Mikrostruktura vzorcev EV18

Na sliki 99 sta prikazani značilni feritni mikrostrukтури v vzorcih gotove neorientirane elektropločevine kakovosti EV18.

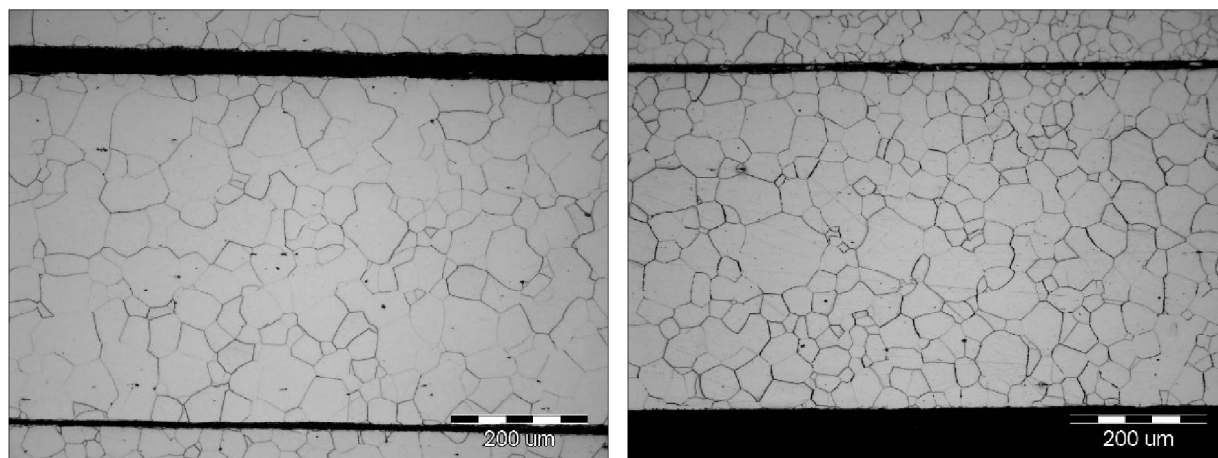


Slika 99: Feritna mikrostruktura vzorca EV18 a) z nizkim 0,0013 mas. % C, b) z visokim 0,0039 mas. % C

Vzorec kakovosti EV18 z nizkim ogljikom, 0,0013 mas. % C, ki je prikazan na sliki 99a, ima povprečno velikost feritnih kristalnih zrn 0,076 mm (razred velikosti 4,5 po ASTM E112-10 (2010) [49]). Vzorec z visokim ogljikom, 0,0039 mas. % C (slika 99b), ima povprečno velikost feritnih kristalnih zrn 0,0898 mm (razred velikosti 4,0 po ASTM E112-10 (2010) [49]).

4.4.3 Mikrostruktura vzorcev EV15

Slika 100 prikazuje značilno feritno mikrostrukturo v vzorcih gotove neorientirane elektropločevine kakovosti EV15.



a)

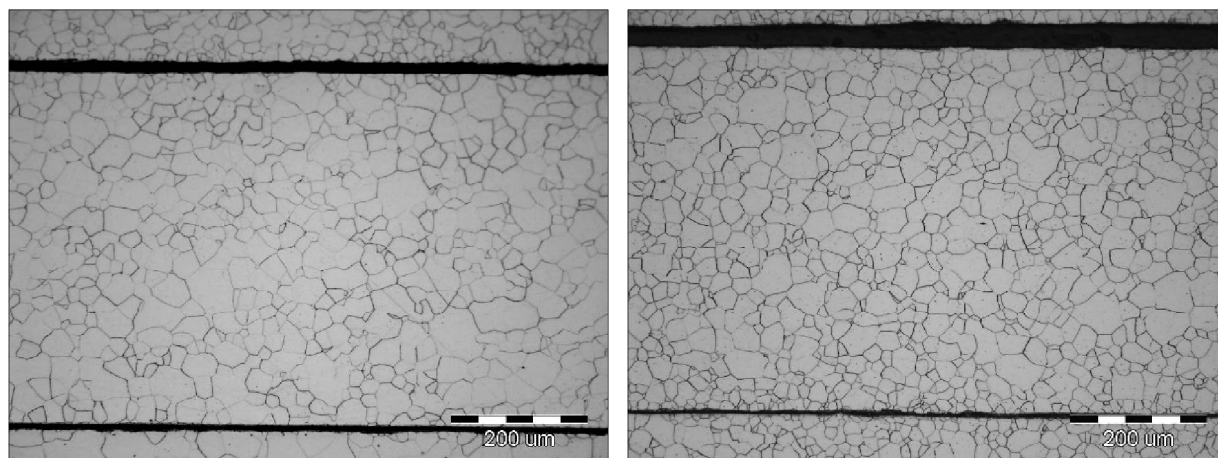
b)

Slika 100: Feritna mikrostruktura vzorca EV15 a) z nizkim 0,0012 mas. % C, b) z visokim 0,0025 mas. % C

Slika 100a prikazuje povprečno velikost feritnih kristalnih zrn v vzorcu z nizkim ogljikom, to je 0,0012 mas. % C. Povprečna velikost kristalnih zrn je 0,064 mm (razred velikosti 5,0 po ASTM E112-10 (2010) [49]). Vzorec z visokim ogljikom, 0,0025 mas. % C (slika 100b), ima povprečno velikost feritnih kristalnih zrn 0,0534 mm (razred velikosti 5,5 po ASTM E112-10 (2010) [49]).

4.4.4 Mikrostruktura vzorcev EV12

Slika 101 prikazuje značilno feritno mikrostrukturo v vzorcih gotove neorientirane elektropločevine kakovosti EV12.



a)

b)

Slika 101: Feritna mikrostruktura vzorca EV12 a) z nizkim 0,0015 mas. % C, b) z visokim 0,0037 mas. % C

Vzorec z nizkim ogljikom, 0,0015 mas. % C (slika 101a), ima povprečno velikost feritnih kristalnih zrn 0,032 mm (razred velikosti 7 po ASTM E112-10 (2010) [49]). Vzorec z visokim ogljikom, 0,0037 mas. % C (slika 101b), ima povprečno velikost feritnih kristalnih zrn 0,027 mm (razred velikosti 7,5 po ASTM E112-10 (2010) [49]).

5 RAZPRAVA

Neorientirane elektropločevine spadajo med proizvode, pri katerih lahko z optimizacijo mikrostrukture in teksture dosežemo veliko izboljšanje magnetnih lastnosti. Osnova za izdelavo neorientirane elektropločevine so silicijeva jekla, to so zlitine Fe-Si in Fe-Si-Al, ki poleg spremljajočih elementov in elementov nečistoč vsebujejo nizek delež ogljika [1, 2]. Na magnetne izgube poleg debeline elektropločevine vplivajo tudi kemijska sestava, prisotnost nečistoč v jeklu, velikost kristalnih zrn, teksturiranost in stanje površine [2].

Eden od pogojev za zagotavljanje kakovostne elektropločevine je tudi nizek delež magnetnega staranja, zato mora biti vsebnost ogljika in prostega dušika v elektropločevinah zelo nizka [2, 4–7]. Ogljik v obliki ϵ -karbida skupaj z nitridi znotraj kristalnih zrn predstavlja oviro za gibanje Blochovih sten, to pa bistveno poslabša elektromagnetne lastnosti elektropločevine. Ta proces imenujemo magnetno staranje [5–7]. V splošnem na mobilnost in rotacijo magnetnih domen poleg izločkov močno vpliva tudi veliko število nekovinskih vključkov, ki skupaj predstavljajo ovire za gibanje magnetnih domen [1].

Mednarodni standard SIST EN 10106:2015 [16] neorientirane elektropločevine klasificira glede na največje dovoljene magnetne izgube in najmanjšo zahtevano polarizacijo glede na debelino pločevine. Omenjeni standard določa, da mora proizvajalec pred merjenjem in opredelitvijo elektromagnetnih lastnosti vzorce elektropločevin magnetno starati. Pogoj magnetnega staranja je: vzorce segreti na $225 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ za čas 24 h in jih počasi ohladiti na sobno temperaturo [16].

V okviru magistrskega dela smo za preučevanje magnetnega staranja izbrali vzorce industrijskih neorientiranih elektropločevin različnih kakovosti (EV21, EV18, EV15 in EV12). Izbrali smo različne cikle magnetnega staranja, pri katerih smo spreminjali temperaturo in čas žarjenja ($T = 225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pri času $t = 24 \text{ h}$ in $t = 12 \text{ h}$ ter magnetno staranje pri $T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ter času $t = 24 \text{ h}$ in $t = 12 \text{ h}$).

Poleg vpliva različnih pogojev žarjenja smo iz izmerjenih rezultatov želeli določiti tudi:

- vpliv kemijske sestave na elektromagnetne lastnosti in magnetno staranje,
- vpliv frekvence na magnetno koercitivnost nestaranih in magnetno staranih vzorcev ter
- vplivne komponente izgub magnetenja, ki pomembno prispevajo k skupnim izgubam pri magnetenju.

Rezultati kažejo, da na delež magnetnega staranja neorientirane elektropločevine različnih kakovosti, pri temperaturah 225 °C in 300 °C, najpomembneje vpliva vsebnost ogljika. Pri nizki vsebnosti ogljika, < 0,0018 mas. % C, je delež magnetnega staranja vzorcev neorientiranih elektropločevin manjši in obratno.

Ker v SIJ Acroni d. o. o. za izdelavo elektropločevin uporabljamo kot vir vložka staro železo, v silicijevo jeklo vnesemo dodatne (oligo) elemente, npr. baker. Zato smo analizirali tudi vpliv tega oligoelementa. Trend rezultatov magnetnega staranja vzorcev neorientiranih elektropločevin nakazuje, da se delež magnetnega staranja znižuje, ne samo z nižanjem vsebnosti ogljika, ampak tudi z naraščajočo vsebnostjo bakra v vzorcih (praviloma do vsebnosti < 0,40 mas. % Cu).

Koercitivnost magnetne poljske jakosti je lahko merilo za stabilnost neorientiranih elektropločevin v smislu magnetnega staranja. Preučevali smo vpliv spreminjanja frekvence 50 Hz do 700 Hz na koercitivnost magnetne poljske jakosti za nestarane in magnetno starane vzorce in poteke izrisali na slikah 22 do 29. Koercitivnost magnetne poljske jakosti po žarjenju je najbolj stabilna v najbolj legirani neorientirani elektropločevini (EV21). Lahko povzamemo, da se koercitivnost magnetne poljske jakosti v vzorcih z nizkim ogljikom (< 0,0018 mas. % C), ne glede na to ali je vzorec magnetno staran ali ne, malo spreminja, zato lahko govorimo o večji magnetni stabilnosti materiala. V vzorcih z deležem ogljika nad cca. 0,0033 mas. % pa postane razlika večja. Lahko tudi povzamemo, da se koercitivnost magnetne poljske jakosti zmanjšuje z zvečanjem deleža silicija v vzorcih (slike 30–33).

V tabeli 4 so prikazane vrednosti sprememb skupnih izgub pri magnetenju v vzorcih neorientiranih elektropločevin pred in po magnetnem staranju v odvisnosti od največje vrednosti merjenja gostote magnetnega pretoka B (ali jakosti magnetnega polja H) in frekvence. Z rdečo so obarvane meritve, ki so po žarjenju izkazovale boljše magnetne lastnosti.

Tabela 4: Sprememba skupnih izgub pri magnetenju ($W \cdot kg^{-1}$) v vzorcih neorientiranih elektropločevin a) pred in po magnetnem staranju (glede na največjo gostoto pretoka magnetnega polja 1 T) in b) frekvence 700 Hz

Št. vzorca	Kakovost	mas. % C*	Pred magnetnim staranjem	Magnetno staranje (%)			
				A T = 225 °C t = 24 h	B T = 225 °C t = 12 h	C T = 300 °C t = 24 h	A T = 300 °C t = 12 h
1	EV21	0,0014	a) 1,248343966	1,247067347	1,259654066	1,267071887	1,261456242
			b) 76,02894	75,78324	76,67249	76,32665	76,74143
5	EV21	0,0033	a) 1,272163564	1,342717043	1,313088584	1,280511999	1,287727792
			b) 75,0255	75,55219	75,82089	74,99356	75,63931
7	EV18	0,0013	a) 1,52250128	1,53599459	1,530527376	1,531079483	1,4821999
			b) 85,52864	85,80628	85,68429	85,45297	81,10056
9	EV18	0,0039	a) 1,442590077	2,797030989	2,774236787	1,71845359	1,743749527
			b) 79,67695	96,94521	96,17323	82,88188	82,86004
17	EV15	0,0012	a) 1,733404994	1,711004984	1,709828349	1,697263622	1,694727601
			b) 92,39465	91,38619	90,98309	91,49943	91,07139
27	EV15	0,0025	a) 1,847934481	2,189532891	2,095880352	1,873478826	1,878079529
			b) 94,57887	97,02423	96,29871	94,89634	94,84949
19	EV12	0,0015	a) 2,338378677	2,333410773	2,321102322	2,319577434	2,30418761
			b) 111,8369	112,9126	112,0067	111,2671	111,5193
23	EV12	0,0037	a) 2,399101473	3,485323828	3,48598468	3,034102065	3,028878464
			b) 108,5921	121,2847	121,0168	113,7246	113,2989

*mas. % C po žarjenju za razogljčenje

Izbrani vzorci za nadaljnje analize z: **nizkim** deležem ogljika  **visokim** deležem ogljika 

Največje odstopanje v vrednostih lahko opazimo pri neorientiranih elektropločevinah z višjimi magnetnimi izgubami, kakovosti EV12 in EV 15, ki vsebujeta nižji delež silicija.

Znotraj posameznih kakovosti smo opazili tudi razliko med vzorci, ki so po končni toplotni obdelavi (na žarilni liniji za razogljčenje in rekristalizacijo) vsebovali nižji delež ogljika. Praviloma so se ti vzorci manj magnetno starali (tabela 3). Nekateri vzorci so po žarjenju izkazovali celo boljše magnetne lastnosti, kot pa so jih imeli pred magnetnim staranjem (tabela 4).

To bi lahko bila posledica vpliva procesov relaksacije deformiranih lamel elektropločevin med žarjenjem za magnetno staranje [50]. Rezanje oziroma izsekovanje v lamele povzroči nehomogeno napetostno in deformacijsko stanje, zaradi plastične deformacije in deformacijskega utrjevanja pločevine. Lokalno spremenjeno deformacijsko stanje pa lahko spremeni tudi dinamiko mehanizmov, na katere imajo vpliv intersticijski elementi, kot je ogljik (in dušik).

Znano je, da so mehanske lastnosti jekel, torej tudi neorientiranih elektropločevin, odvisne tudi od kemijske sestave. Utrjevanje trdnih raztopin poteka tudi s pomočjo intersticijskih in substitucijskih elementov [51–54].

V tabeli 5 smo zbrali podatke za mehanske lastnosti vzorcev izbranih kakovosti neorientirane elektropločevine pred magnetnim staranjem. Vidimo, da se vrednosti v meji plastičnosti med posameznimi kakovostmi (EV21, EV18, EV15 in EV12) razlikujejo, obstajajo pa male razlike tudi znotraj kakovosti.

Tabela 5: Mehanske lastnosti vzorcev neorientirane elektropločevine pred magnetnim staranjem

Št. vzorca	Kakovost	mas. % C*	$R_{p0,2}$ (N·mm ⁻²)	R_m (N·mm ⁻²)	$R_{p0,2} / R_m$
1	EV21	0,0014	406	517	0,78530
5	EV21	0,0033	402	529	0,75992
7	EV18	0,0013	345	471	0,73248
9	EV18	0,0039	365	494	0,73887
17	EV15	0,0012	314	452	0,69469
27	EV15	0,0025	285	434	0,65668
19	EV12	0,0015	313	419	0,74702
23	EV12	0,0037	311	440	0,70682

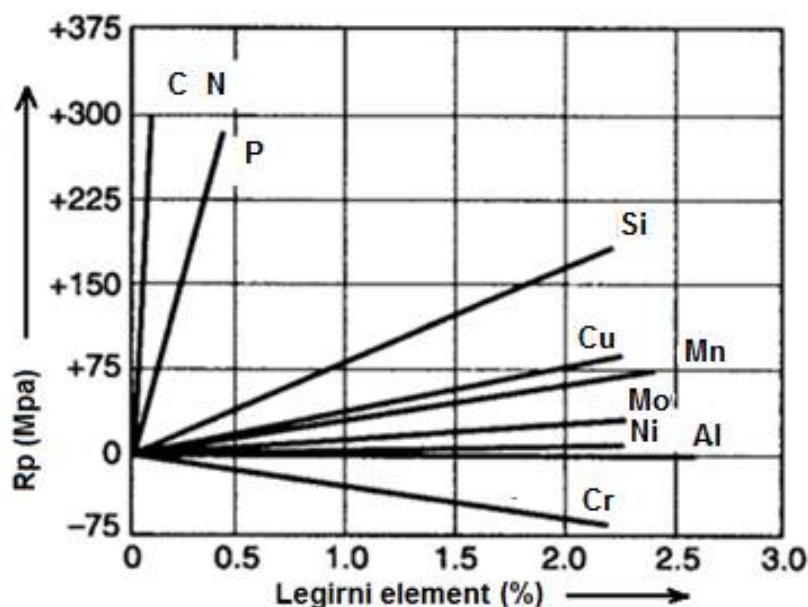
* mas. % C po žarjenju za razogljčenje

Izbrani vzorci za nadaljnje analize z:

nizkim deležem ogljika



visokim deležem ogljika



Slika 102: Vpliv legirnih elementov na napetost tečenja [54]

Intersticijske trdne raztopine so načeloma neurejene. Pri intersticijskih atomih so atomi v nepravilnih intersticijskih vrzelih, ki so tetragonalno popačene in reagirajo s strižno komponento dislokacijskega polja, ki je močnejša [52]. Naravna napetost tečenja se pri mehkem jeklu razlaga kot napetost, pri kateri se dislokacije odtrgajo od oblaka intersticijev, ki ga poimenujemo Cottrellov oblak. Za nastanek Cottrelovega oblaka zadostuje zelo majhna količina ogljika in dušika v trdni raztopini, v feritu. Gibljivost interstitorjev je veliko večja od gibljivosti vrzeli in atomov matične mreže [52]. Predpostavljamo, da se zaradi plastične deformacije na robovih pločevin poviša gostota dislokacij, kjer se lahko ujame več intersticijskih atomov. S tem jih je manj na voljo za tvorbo izločkov, ki ovirajo magnetenje.

Tudi elektropločevina kakovosti EV21, ki vsebuje močnejšo Gossovo teksturiranost, izkazuje manjše staranje (tabela 3). Literatura navaja, da Gossova tekstura vsebuje večjo gostoto dislokacij [55].

Poleg utrjevanja trdne raztopine z intersticijskimi elementi (ogljik, dušik) poteka tudi utrjevanje trdne raztopine s substitucijskimi atomi (silicij, aluminij, fosfor). Tako deleži silicija, fosforja in aluminija dodatno prispevajo k višji natezni trdnosti, kot to vidimo na prikazu na sliki 102 [54].

Na napetost tečenja poleg kemijske sestave vpliva tudi velikost kristalnega zrna. Hall-Petchova odvisnost (enačba 7) povezuje napetost tečenja in velikost kristalnega zrna [52, 55]:

$$R_{0,2} = R_0 + k \cdot d_1^{-n} \quad (7)$$

Kjer je:

$$n = 1/2$$

R_0 – sila trenja pri zdrs dislokacij (sorazmerna koncentraciji ogljika in dušika v feritu) v $\text{N} \cdot \text{mm}^2$

d_1 – velikost (premer) kristalnih zrn v m [52]

k – utrjevalni koeficient

Na podlagi metalografske analize izbranih vzorcev smo v tabeli 6 zbrali velikosti kristalnih zrn v vzorcih kakovosti EV21, EV18, EV15 in EV12. Če primerjamo velikost zrn preiskovanih vzorcev z magnetnimi izgubami po magnetnem staranju, vidimo, da je velikost magnetnih izgub v obratnem sorazmerju s povprečno velikostjo zrna (najbolj očitna primera sta visokosilicirani kakovosti EV21 in EV18).

Tabela 6: Povprečne velikosti feritnih kristalnih zrn

Št. vzorca	Kakovost	mas. % C*	Velikost kristalnih zrn ASTM E112-10 (2010) [49] (mm)	Velikost kristalnih zrn ASTM E112-10 (2010) [49]
1	EV21	0,0014	0,127	3
5	EV21	0,0033	0,151	2,5
7	EV18	0,0013	0,076	4,5
9	EV18	0,0039	0,0898	4,0
17	EV15	0,0012	0,064	5
27	EV15	0,0025	0,0534	5,5
19	EV12	0,0015	0,032	7
23	EV12	0,0037	0,027	7,5

* mas. % C po žarjenju za razogljčenje

Izbrani vzorci za nadaljnje analize z: **nizkim** deležem ogljika 
visokim deležem ogljika 

Izmerjene skupne magnetne izgube $P_{\text{skup.}}$ smo z uporabo modificirane Steinmetzove enačbe razdelili na komponente histereznih, vrtnčnih in anomalnih magnetnih izgub [7].

Ko smo vrednosti skupnih izgub pri magnetenju (slike 34–97) primerjali s krivuljami za posamezne komponente izgub, smo opazili, da se skupne izgube pri magnetenju spreminjajo ne samo na račun histereznih, temveč tudi na račun anomalnih izgub. V literaturi sicer najdemo izsledke študije avtorja Landgrafa s sodelavci [13], ki navaja, da so skupne izgube pri magnetenju zaradi magnetnega staranja neorientiranih elektropločevin odvisne le od sprememb histerezne komponente, medtem ko ostajajo anomalne izgube nespremenjene. Naši rezultati kažejo, da na magnetne izgube preiskanih vzorcev EV21, EV18, EV15 in EV12 pomembno vpliva tudi komponenta anomalnih magnetnih izgub.

Za zmanjšanje skupnih izgub magnetenja so zato izredno pomembni pravilno načrtovani jeklarski procesi, vložek in legiranje jekla, končna deformacija ter končni žarilni cikel (temperatura), s katerim dosežemo optimalno razogljčenje in velikost kristalnega zrna, ta pa je funkcija kemijske sestave ter prisotnosti nečistoč v jeklu in narašča s povečano vsebnostjo silicija in/ali aluminija. Z večanjem kristalnega zrna naraščajo vrtnčne magnetne izgube, medtem ko se histerezne magnetne izgube zmanjšujejo, zato je ključno, da dosežemo optimalno velikost kristalnega zrna, da so histerezne in vrtnčne magnetne izgube v med seboj ugodnem razmerju [7, 8, 9, 14, 17, 18, 22, 24, 26–32, 34].

6 SKLEPI

V tem magistrskem delu smo preučevali magnetno staranje v vzorcih industrijskih neorientiranih elektropločevin EV21, EV18, EV15 in EV12. Na podlagi izbranih vzorcev (vsebnost ogljika), nadaljnjih postopkov magnetnega staranja vzorcev in izvedenih magnetnih meritev ter metalografskih preiskav smo prišli do naslednjih sklepov:

- Na delež magnetnega staranja neorientirane elektropločevine različnih kakovosti pri temperaturah 225 °C in 300 °C najpomembneje vpliva vsebnost ogljika v jeklu. Pri nizki vsebnosti ogljika, $< 0,0018$ mas. % C je delež magnetnega staranja manjši in obratno.
- Na delež magnetnega staranja vpliva tudi vsebnost bakra. Trend rezultatov magnetnega staranja vzorcev neorientiranih elektropločevin nakazuje, da se delež magnetnega staranja znižuje tudi z naraščajočo vsebnostjo bakra v vzorcih (praviloma do vsebnosti $< 0,40$ mas. % Cu).
- Koercitivna magnetna poljska jakost je lahko merilo za stabilnost neorientiranih elektropločevin v smislu magnetnega staranja. Koercitivna magnetna poljska jakost je po žarjenju najbolj stabilna v najbolj legirani neorientirani elektropločevini (EV21); praviloma se bolj spreminja v vzorcih z večjo vsebnostjo ogljika. Spreminjanje frekvence v območju od 50 Hz do 700 Hz za nestarane in magnetno starane vzorce pokaže, da se ne glede na vsebnost ogljika koercitivna magnetna poljska jakost najbolj poviša pri najmanj legirani neorientirani elektropločevini EV12. Vrednost koercitivne magnetne poljske jakosti je sicer odvisna od skupnih izgub magnetenja. Z zmanjševanjem P_{skup} se tudi koercitivna magnetna poljska jakost zmanjšuje.
- Izmerjene skupne magnetne izgube smo z uporabo modificirane Steinmetzove enačbe razdelili na komponente histereznih, vrtničnih in anomalnih izgub. Skupne izgube pri magnetenju se spreminjajo ne samo na račun histereznih, temveč tudi na račun anomalnih izgub. Po magnetnem staranju nekateri vzorci izkazujejo boljše magnetne lastnosti, kot pa so jih imeli pred magnetnim staranjem. To je lahko posledica razlik v njihovih mehanskih lastnostih in postopkih rezanja v lamele.

7 LITERATURA

- [1] CULLITY, B. D., GRAHAM, C. D. *Introduction to Magnetic Materials*, 2th ed., ISBN-978-0-471-47741-9, 2009, str. 5–325.
- [2] STEINER PETROVIČ, D. Non – oriented electrical steel sheets, *Materiali in tehnologije*, 2010, 44, str. 317–325.
- [3] Steel Statistical Yearbook 2014. *World Steel Association, Worldsteel Committee on Economic Studies, Brussels*, 2015, str. 46. Dostopno na svetovnem spletu: <https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/2015/Steel-Statistical-Yearbook-2015/document/Steel%20Statistical%20Yearbook%202015.pdf>.
- [4] RAABE, D., ZAEFFERER, S. Overview of soft ferromagnetic materials, www.mpie.de.
- [5] SIDOR, Y., KOVAC, F. Effect of heat treatment conditions on the internal and external oxidation processes in non – oriented electrical steels, *Materials and Design*, 26, 2005, str. 297–304.
- [6] LANDGRAF, F. J. G., EMURA, M., TEIXEIRA, J. C. in De CAMPOS, M. F. Effect of grain size, deformation, aging and anisotropy on hysteresis loss of electrical steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215, 2000, str. 97–99.
- [7] MARRA, K. M., ALVARENGA, E. A., BUONO, V. T. L. Magnetic aging anisotropy of a semi–processed non-oriented electrical steel, *Materials Science and Engineering*, 390, 2005, str. 423–426.
- [8] ATAKE, M., BARNETT, M., HUTCHINSON, B., USHIODA, K. Warm deformation and annealing behaviour of iron–silicon–(carbon) steel sheets, *Acta Materialia*, 96, 2015, str. 410–419.
- [9] MARRA, K. M., ALVARENGA, E. A. Magnetic losses evolution of a semi-processed steel during forced aging treatments, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, 2008, e631–e634.
- [10] SILVEIRA, C. C., da CUNHA, M. A., BUONO, V. T. L. The influence of internal oxidation during decarburization of a grain oriented silicon steel on the morphology of the glass film formed at high temperature annealing, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 358–359, 2014, str. 65–69.
- [11] RUIZ, D., RIVERA-TOVAR J. L., SEGERS, D., VANDENBERGHE, R. E., HOUBAERT, Y. Aging phenomena in high-Si steels studied by internal friction, *Materials Science and Engineering, A* 442, 2006, str. 462–465.

- [12] ROS-YANEZ, T., RUIZ, D., BARROS, J., HOUBAERT, Y., COLAS, R., Study of deformation and aging behaviour of iron–silicon alloys, *Materials Science and Engineering*, A 447, 2007, str. 27–34.
- [13] De CAMPOS, M., F., EMURA, M., LANDGRAF, F. J. G. Consequences of magnetic aging for iron losses in electrical steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304, 2006, str. 593–595.
- [14] MARINŠEK, F. *Neorientirane elektropločevine*, *Interno gradivo*, Jesenice, SIJ Acroni d. o. o., 1996.
- [15] HAMLER, A. HRIBERNIK, B. *Elektrotehnični materiali*, Maribor: fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, ISBN 86-435-0696-6, 2005, str. 72–162.
- [16] Cold rolled non-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully processed state, SIST EN 10106:2015.
- [17] STEINER PETROVIČ D. Ugotavljanje vpliva čistoče, stanja predelave, tehnologije žarjenja in razogljčenja na vatne izgube pri proizvodnji gotovih elektropločevin z izgubami pod $2,5 \text{ Wkg}^{-1}$, *Zaključno poročilo o raziskovalnem projektu*, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, 2014, str. 1–68.
- [18] ČOP, A. DEŽMAN, T. DIVJAK, F. *Znižanje vsebnosti vodika v mešanici plinov za razogljčenje dinamo pločevin v peči CRNO v Hladni valjarni Bela*, Acroni d.o.o., Koroška Bela, 1998, str. 1–51.
- [19] SIDOR, J.J., VERBEKEN, K., GOMES, E., SCHNEIDER, J., CALVILLO, P. B., KESTENS, L. A. I. Through process texture evolution and magnetic properties of high Si non-oriented electrical steels, *Materials Characterization*, 71, 2012, str. 49–57.
- [20] LYUDKOVSKY, G., RASTOGI, K. P., BALA, M. Nonoriented Electrical Steels, *Journal of Metals*, January 1986, str. 18–26.
- [21] TAJIMA, S., SHIROUZU – SUMITOMO. Metal Industries, Characteristics of 100 % Hydrogen Annealing Furnace, *Proceedings TMS*, Cincinnati, Ohio, 1991.
- [22] KRIŽAJ, A. *Vpliv hladne deformacije na rekristalizacijo in elektromagnetne lastnosti elektropločevine*, Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana, 2005, str. 1–23.
- [23] STEINER PETROVIČ, D., JENKO, M., VODOPIVEC, F. Decarburization and Recrystallization of Non-oriented Electrical Steel Sheet, *Kovine, zlitine, tehnologije*, 29, 1995, str. 62–64.

- [24] NOVAK, G. *Načrtovanje elektromagnetnih lastnosti neorientirane elektropločevine*, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana, 2015, str. 10–167.
- [25] NAKAZAWA, K., AKISUE, O., FUDABA, K., ODA, M. AlN precipitations on of Al-killed Steel of Cold-rolled Sheets in Continuous Casting and Direct Rolling Process, *Tetsu-to-Hagane*, 74, 1988, str. 1509–1516.
- [26] STEINER PETROVIČ, D., MARKOLI, B., ČEH, M. The nanostructure of non-oriented electrical steel sheets, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322, 2010, str. 3041–3048.
- [27] VERBEKEN, K., INFANTE – DANZO, I., BARROS – LORENZO, J., SCHNEIDER, J. HOUBAERT, Y. Innovative processing for improved electrical steel properties, *Revista de Metalurgia*, 46, 2010, str. 458–468.
- [28] LANDGRAF, F. J. G., EMURA, M., TEIXEIRA, J. C., DE CAMPOS, M. F. Effect of grain size, deformation, aging and anisotropy on hysteresis loss of electrical steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215, 2000, str. 97–99.
- [29] KESTENS, L. JACOBS, S. *Texture Control During the Manufacturing of Nonoriented Electrical Steels, Texture, Stress, and Microstructure*, 2008, DOI: 10.115/2008/173083.
- [30] DONG, H., ZHAO, Y., YU, X., LIAN, F. Effects of Sn Addition on Core Loss and Texture of Non-Oriented Electrical Steels, *Journal of iron and steel research*, 16, 2009, str. 86–89.
- [31] CHANG, S. K., HUANG, W. Y. Texture Effect on Magnetic Properties by Alloying Specific Elements in Non-grain Oriented Silicon Steels, *ISIJ International*, 45, 2005, str. 918–922.
- [32] LEE, S. DE COOMAN, B. C. Effect of Warm Rolling on the Rolling and Recrystallization Textures of Non-oriented 3% Si Steel, *ISIJ International*, 51, 2011, str. 1545–1552.
- [34] MATAIGNE, J. M., LAMBERIGTS, M., LEROY, V. Selective oxidation of cold-rolled steel during recrystallization annealing, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1992 str. 511–528.
- [35] RANDLE, V. Microstructure determination and its applications, *Maney Publishing, 2nd Edition*, 2003, str. 1–146.
- [36] GODEC, M., JENKO, M. Presentation methods of textures measurements, *Materiali in Tehnologije*, 34, 2000, str. 359–364.
- [37] PARK, J., T., SZPUNAR, J., A. Evolution of recrystallization texture in nonoriented electrical steels, *Acta Materialia*, 51, 2003, str. 3037–3051.

- [38] STEINER PETROVIČ, D., *Mehanizem razogličanja zlitine Fe-Si-Al, legirane z antimonom*, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Narovoslovnotehnična fakulteta, Ljubljana 1998, str. 1–77.
- [39] Magnetische Werkstoffe - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroband und -blech mit Hilfe eines Epsteinrahmens, Standard DIN EN 60404-2:2009.
- [40] BERLISK, G., MARINŠEK, F. *Primerjava meritev lastnosti v Epsteinovem in enoploščnem jarmu*, Acroni d.o.o., Koroška Bela, 2005, 2–25.
- [41] STEINMETZ, C. P. On the law of hysteresis, *Proceedings of the IEEE*, 72, 1984, str. 197–221.
- [42] BERTOTTI, G. General Properties of power losses in soft magnetic materials, *IEEE Transactions on Magnetism*, 24, 1988, str. 621–630.
- [43] BOLL, R. *Weichmagnetische Werkstoffe: Einfuehrung in den Magnetismus*, 4th ed. Publicis Corporate Publishing, ISBN 10:3800915464/3-8009-1546-4, 1990.
- [44] SOINSKI, M., MOSES, A. J. Anisotropy in iron based soft magnetic materials, *Handbook of Magnetic Materials, Elsevier Science*, Netherlands, 1995, 4.
- [45] BOZORTH, R. M. Ferromagnetism, New York, *IEEE Press*, 1956, str. 846.
- [46] PRY, R. H., BEAN, C. P. Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model, *Journal of Applied Physics*, 29, 1958, str. 532–533.
- [47] NOVAK, G., KOKOŠAR, J., NAGODE, A., STEINER PETROVIČ, D. Core-loss prediction for non-oriented electrical steels based on the Steinmetz equation using fixed coefficients with a wide frequency range of validity, *IEEE Transactions on Magnetism*, 2014, DOI:10.1109/TMAG.2014.2354317.
- [48] CHANG, S. K., HUANG, W., Y. Texture Effect on Magnetic Properties by Alloying Specific Elements in Non-grain Oriented Silicon Steels, *ISIJ International*, 45, 2005, str. 918–922.
- [49] Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM E112-10 (2010).
- [50] KRINGS A., SOULARD J. Overview and Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines, *Journal of Electrical Engineering*, 10, 2010, str. 162–169.
- [51] ASM Metals Handbook: Properties and Selection: Irons, Steel and High-Performance Alloys, Volume 1. ASM International: Materials Park Ohio, 10th edition, 1990, str. 359–410.
- [52] VODOPIVEC F. *Kovine in zlitine*, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, 2002, ISBN 961-238-084-8, str. 77–79.

- [53] BHADESHIA, H. K. D. H., HONEYCOMBE, R. W. K., *Steels Microstructure and Properties*, Third edition, University of Cambridge, Amsterdam, 27, 2006.
- [54] CAMPBELL F. C., *Elements of metallurgy and engineering alloys*, Materials Park, Ohio: ASM International, 2008.
- [55] HYUNG S. S., TAE-WOOK N., JIN-SEOK C., SOO-BIN K., KYEHWAN G., JONG-TAE P., NONG-MOON H.. Synchrotron X-ray microdiffraction of Fe-3 wt%Si steel focusing on sub-boundaries within Goss grains, *Scripta Materialia*, 116, 2016, str. 71–75.