

# Primerjava klasično in konti vlitih jekel za neorientirane elektro pločevine

F. Marinšek,<sup>\*\*</sup> F. Vodopivec<sup>\*\*</sup>

UDK: 669.018.583-418:620.192.45:621.746.074/22  
ASM/SLA: D9p, D9q, SGAn, 4—53, P15g, 9—69

Z namenom, da bi dobili zanesljive primerjalne podatke, smo izbrali po 11 šarž jekel iz redne proizvodnje. Vzorce smo vzeli iz vroče valjanih trakov, ki so bili izvaljeni v redni proizvodnji iz klasično vlitih bram in iz konti vlitih slabov. Po sestavi ta jekla predstavljajo 80 % asortimenta neorientiranih elektro pločevin železrne Jesenice.

Delo predstavlja primerjavo mikrostrukturnih značilnosti in elektromagnetnih lastnosti teh pločevin, izdelanih po različnih postopkih.

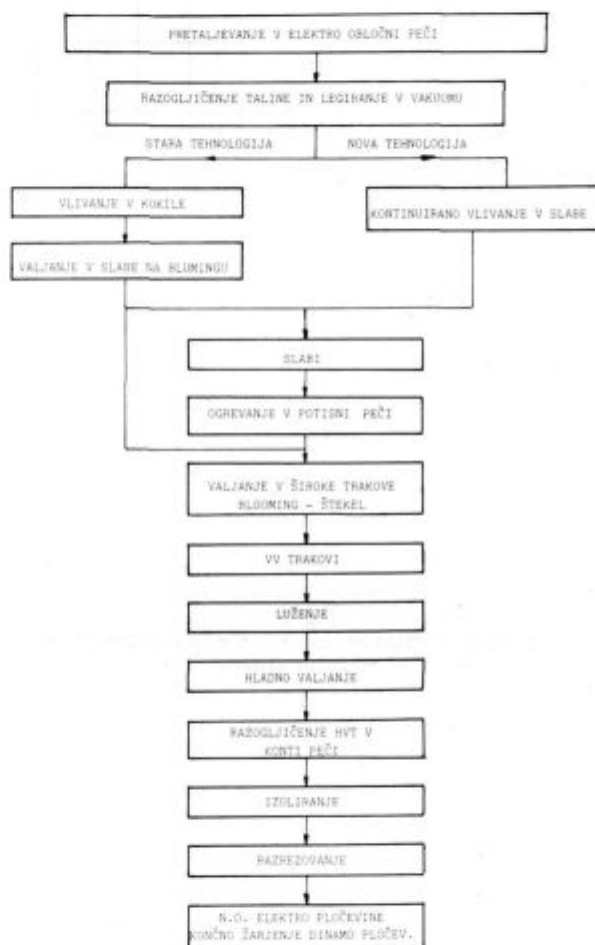
## 1. UVOD

Železarna Jesenice je edini izdelovalec elektro pločevine v Jugoslaviji. Neorientirane — dinamo pločevine izdelujemo že od l. 1945 in smo doslej izdelali že več kot pol milijona ton teh pločevin. V proizvodnji dinamo pločevin v novejšem času beležimo več prelomnic, ki pomenijo napredek v tehnologiji izdelave in predelave. Leta 1976 smo pričeli neorientirane elektro pločevine izdelovati po ARMCO licenci. To je leto, ko smo odprli novo hladno valjarno. Leta 1984 smo pričeli v elektropeči izdelano jeklo za elektro pločevine v stari jeklarni vakuimirati. Leta 1987 pa smo proizvodnjo jekla za elektro pločevine prenesli v novo jeklarno.

Nova jeklarna je opremljena s 100-t elektrooblačno pečjo, vakuumsko napravo in moderno kontinuirno napravo, na kateri vlivamo slabve, debeline 200 mm, ki je leta 1987 zamenjala tehnologijo klasičnega vlivanja jekla v brame. (slika 1). Prav ta bistvena razlika v tehnologiji pa je bila razlog, da smo načrtovali to delo, ki nima raziskovalnih ciljev. Naloga je bila programirana in izvršena zato, da bi imeli zanesljivo primerjalno osnovo, če bi se pokazalo, da se sprememba načina vlivanja odraža tudi pri lastnostih elektro pločevin. Menili smo, da bomo lažje ukrepali, če bodo na voljo podatki o tem, kakšno je bilo jeklo, vilito po klasičnem, in kakšno po konti postopku. Poročilo prinaša predvsem podatke o sestavi, količini in obliki nekovinskih vključkov ter mikrostrukturi in poizkus povezave teh dejavnikov in tehnologije z elektromagnetnimi lastnostmi pločevin.

## 2. O RAZLIČNIH VPLIVIH NA ELEKTROMAGNETNE LASTNOSTI DINAMO PLOČEVIN

V novejšem obdobju so bili narejeni veliki koraki v razvoju kvalitetnih elektro pločevin (slika 2). Na osnovi jekel z zelo dobro čistočo smo izpeljali nove postopke izdelave izotropnih pločevin, ki so uporabne v glavnem

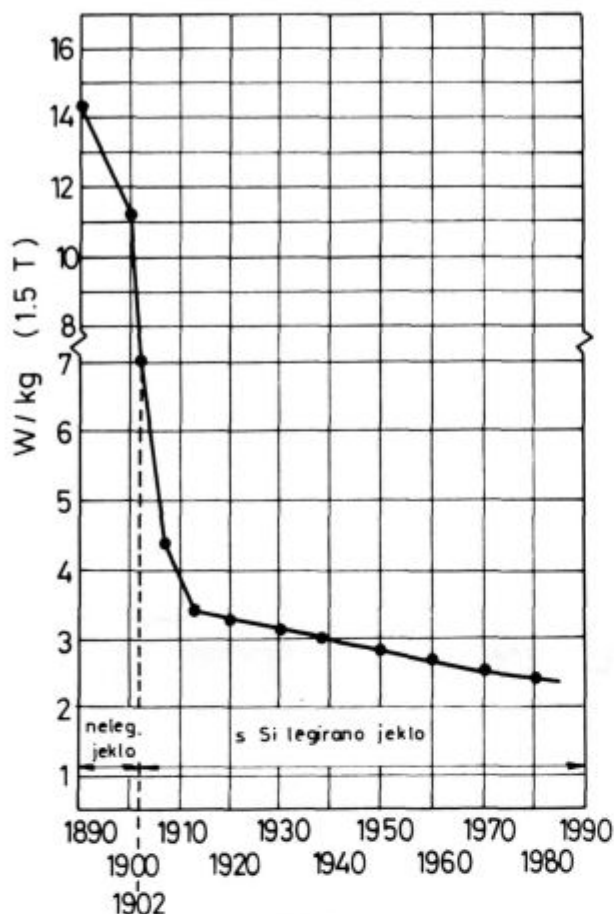


Slika 1. Shematična predstavitev izdelave neorientiranih elektro pločevin.

Fig. 1 Schematic presentation of making not-oriented electrical sheet

za gradnjo strojev z vrtečim se poljem. Z ekonomskega in ekološkega vidika so vsa prizadevanja obrnjena v smeri zmanjševanja izgub v jedru električnih strojev na minimum. Posebno za velike stroje z izjemno visokimi specifičnimi izgubami moči (izgube zaradi premagnete-

<sup>\*\*</sup> Filip Marinšek, ing. met., Železarna Jesenice  
<sup>\*\*</sup> dr. Franc Vodopivec, dipl. ing. met., Metalurški inštitut Ljubljana  
<sup>\*\*</sup> Originalno publicirano: ŽZB 23, 1989, 4  
<sup>\*\*\*</sup> Rokopis prejet: avgust 1989



Slika 2.

Zmanjševanje vatnih izgub pri magnetenju v časovnem razvoju neorientiranih pločevin. (Vir 6)

Fig. 2

Reduction of magnetisation losses in time development of non-oriented electrical sheets (ref. 6)

nja) zahtevamo uporabo kvalitetnih elektro pločevin. V nadaljevanju bomo na kratko poskusili razložiti, katere poti vodijo k zmanjšanju izgub pri magnetenju, da bi lažje razumeli vpliv metalurških dejavnikov.

## 2.1 Izgube pri magnetenju

Izgube pri magnetenju neke elektro pločevine, ki je izpostavljena periodičnemu izmeničnemu polju, lahko izrazimo z enostavnim približkom kot vsoto histereznih ( $P_H$ ) izgub in izgub zaradi vrtnčastih tokov

( $P_W$ )<sup>1</sup>

$$P = P_H + P_W \quad (1)$$

Delež izgub zaradi vrtnčastih tokov ( $P_W$ ) je v splošnem bistveno večji, kot je podan z znano formulo:

$$P_{W,C} = \frac{(\pi \cdot I \cdot f \cdot d)^2}{6 \cdot \sigma \cdot \rho_E} \quad (2)$$

kjer pomeni:  $I$  = jakost polja  
 $f$  = frekvenca  
 $d$  = debelina pločevine  
 $\sigma$  = gostota  
 $\rho_E$  = sp. el. upornost

Izgube zaradi vrtnčastih tokov odstopajo za faktor  $\eta$  (faktor anomalije) ali za vrednost dodatnih izgub, anomalnih izgub:

$$P = P_H + \eta \cdot P_{W,C} \quad (3)$$

ali

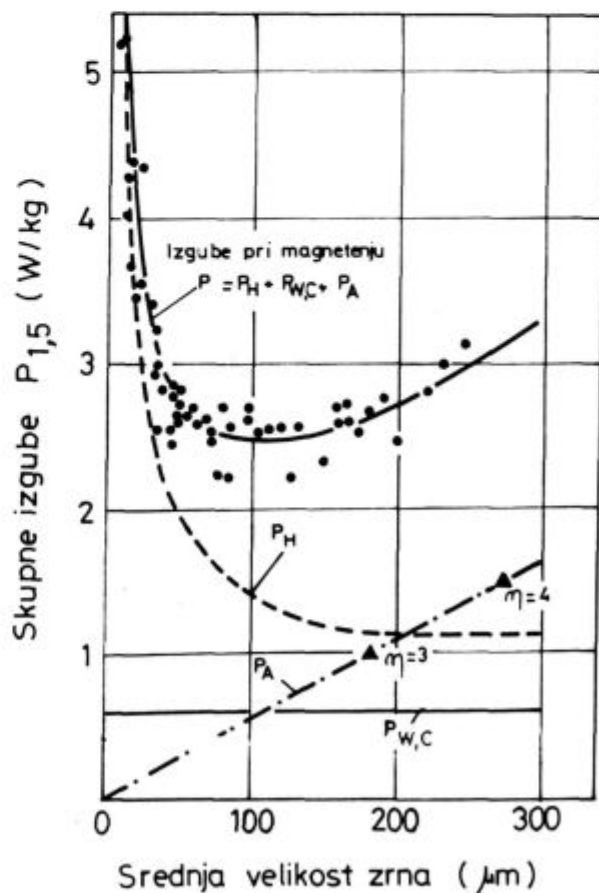
$$P = P_H + P_{W,C} + P_A \quad (4)$$

Dodatne izgube  $P_A$  oziroma faktor anomalije ( $\eta$ ) je določen z obstojem Blochovih sten in njihovim dinamičnim »obnašanjem« v izmeničnem polju. Najvažnejše vplivne veličine, pri razvoju kvalitetnih neorientiranih pločevin, ki jih je potrebno optimirati, da bi čim bolj zmanjšali izgube, so:

- stopnja legiranja
- velikost zrna
- stanje izločkov in čistoča
- kakovost površine
- tekstura

Razumljivo je, da je optimizacijo vseh naštetih spremenljivk potrebno izvesti predvsem na boljših kvalitetah pločevin. Za slabše kvalitete pa zahtevano vrednost za izgube dosežemo med procesom z manjšimi stroški, na primer s stopnjo legiranja.<sup>2</sup>

**2.1.1 Stopnja legiranja (Si, Al, P):** silicij je najvažnejši legirni element z najdlje znanim ugodnim vplivom na histerezne izgube in izgube zaradi vrtnčastih tokov. Višja specifična upornost se neposredno odraža v izgubah zaradi vrtnčastih tokov.



Slika 3.

Prispevek k skupnim izgubam 0.5 mm elektro pločevine (Vir 1)

Fig. 3

Contribution to total losses in 0.5 mm electrical sheet (ref. 1)

V pogledu preoblikovanja v hladnem je stopnja legiranja silicija vsekakor omejena. Z dolegiranjem aluminija je ta meja pomaknjena navzgor. V novjšem času se uveljavlja spoznanje, da kristalografsko teksturo lahko izboljšamo, če v večji meri nadomestimo silicij z aluminijem.

**2.1.2 Velikost zrna:** Histerezne izgube se zmanjšujejo z naraščanjem zrna. Za skupne izgube pri magnetenju v odvisnosti od velikosti zrna nastopa neki minimum. Za zlitino Fe-Si-Al velja, da neodvisno od stopnje legiranja, pri srednji velikosti zrna ca. 100  $\mu\text{m}$ , nastopa minimum izgub.

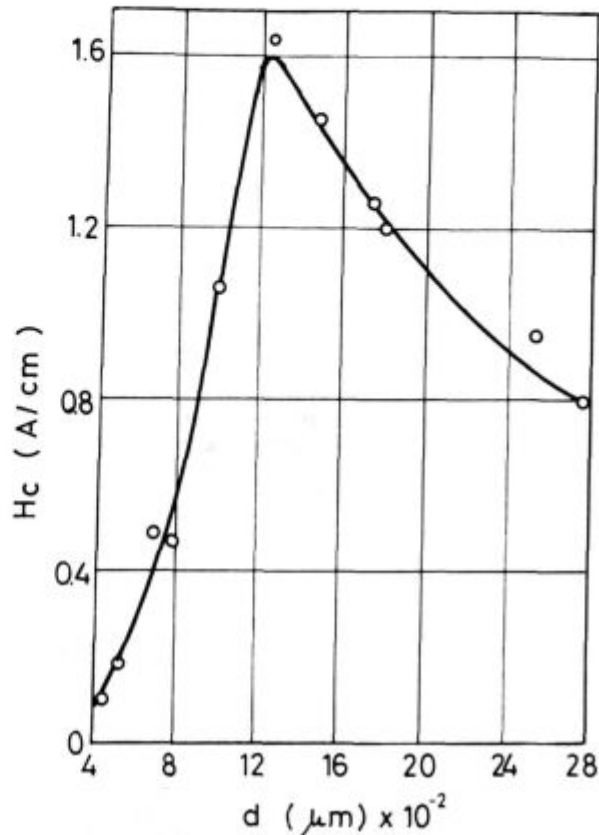
Prav tako pa so anomalne izgube  $P_A$  dober približek linearne funkcije srednje velikosti zrna. (slika 3). Zato je za zmanjšanje anomalnih izgub optimiranje velikosti zrna s primerno tehnologijo zelo velikega pomena. Boljša tekstura pomakne lego minimuma k večjim velikostim zrna, ne da bi se zato zvišale anomalne izgube. S tem se lahko izkoristi dodatno zmanjšanje histereznih izgub s povečanjem velikosti zrna.

**2.1.3 Stanje izločkov — čistoča:** Neferomagnetni vključki in izločki, sulfidi, nitridi, oksidi in karbidi poslabšujejo elektromagnetne lastnosti, ker predstavljajo ovire za gibljivost Blochovih sten.

O vplivu nemagnetnih vključkov na koercitivnost železa obstaja več razlag, ki imajo neki skupni imenovalec. Feromagnetno železo sestoji, gledano fizikalno, iz Weissovih področij (domen), v katerih so magnetni momenti atomov orientirani paralelno.

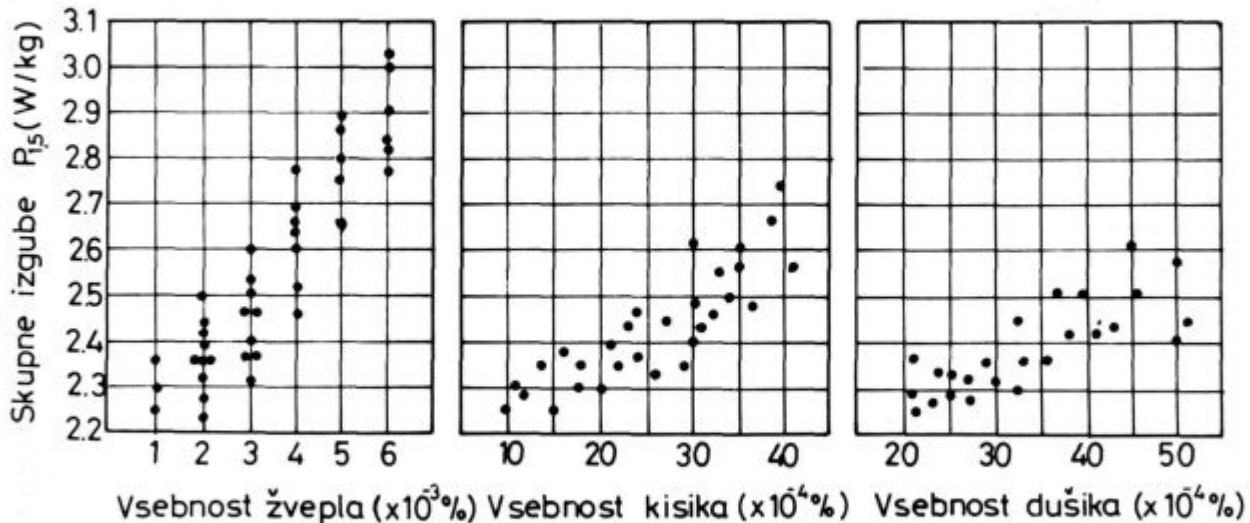
Ta področja so med seboj ločena z Blochovimi stenami, to je s prehodnimi plastmi, katerih debelina zavzema določen volumen in vsebuje višjo energijo kot okoliški kristal. Prav v tej prehodni plasti smer enega področja prehaja v smer drugega. Vzrok za spremembo (povečanje) koercitivnosti je v otežkočenem premikanju stene. Močno poenostavljeno si to razložimo takole: Stena, ki poseduje na enoto ploskve določeno energijo, želi zavzeti čim manjšo površino. V bližini vključka bo potem skupna ploščina stene najmanjša, ko bo vključek ležal v sami steni. Tako nekako vključek veže del mase stene nase in jo drži z določeno silo. Ta efekt je toliko močnejše izražen, kolikor večja je tako imenovana konstanta anizotropije materiala. Seveda je odločilna tudi

oblika in velikost vključka. Največjo oviro za premikanje Blochovih sten predstavljajo vključki, ki so tako veliki, kot je debela stena, medtem ko manj motijo večji in manjši vključki. Za neorientirane elektro pločevine ni



Slika 4. Odvisnost koercitivnosti od velikosti nekovinskih vključkov v jeklu (Vir 7)

Fig. 4 Relationship between the coercivity and the size of non-metallic inclusions in steel (ref. 7)



Slika 5. Vpliv elementov, ki tvorijo izločke, na izgube pri magnetenju (Vir 1)

Fig. 5 Influence of elements which form inclusions on the magnetisation loss (ref. 1)

nobene možnosti pridobiti strukturo brez izločkov, čeprav z dodatki in žarjenji lahko dosežemo, da so izločki grobi in manj škodljivi kot fini delci. (slika 4).

Poglavje zase pa je čistoča jekla, ki jo pojmuje kot vsebnost spremljajočih elementov, predvsem S, O<sub>2</sub> in N<sub>2</sub>.

Naj takoj na začetku zapišemo, da so dosegljive skoraj ekstremne čistoče, ki so prikazane na sliki 5, v novjšem času z izboljšanjem metalurških postopkov pri izdelavi jekel.

**2.1.4 Tekstura:** Hladno valjanje izključuje materiale brez teksture. Cilj optimalne izdelave je doseči po možnosti najbolj ugodno teksturo, ki nudi le minimalno anizotropijo magnetnih lastnosti. To zahtevo izpolnjuje najboljše kockasta ploščinska tekstura (100) (Ok1); kjer ravnina (100) leži v ravnini pločevine in so smeri robov kocke slučajno porazdeljene. Končna tekstura je odvisna od kemične sestave, teksture toplo valjanega traku, stopnje hladne deformacije in temperature rekristalizacije.<sup>2</sup>

**2.1.5 Vpliv površine:** Pomembna je kakovost površine, ki jo dosežemo po končnem žarjenju. Med žarjenjem lahko nastopi delna oksidacija površine in eventuelno se jeklo tik ob površini lahko nadušiči. V oksidirani oziroma nadušičeni coni najdemo ovire za gibljivost Blochovih sten in fina zrna, ki imajo škodljiv vpliv. Poslabšanje je odvisno od debeline vplivane cone, ki običajno meri le nekaj mikronov. Neugoden učinek se odraža v naraščanju histereznih izgub, in sicer premo sorazmerno s poškodovanim volumnom oziroma debelino poškodovane plasti.

### 3. IZBIRA VZORCEV ZA PREISKAVE

Z namenom, da bi dobili zanesljive primerjalne podatke, smo izbrali po 11 jekel iz redne proizvodnje v razponu vsebnosti silicija, ki predstavlja 80 % asortimenta elektro pločevin, izdelanih v Železarni Jesenice. Vse preiskave so bile izvršene na vzorcih, ki so bili izrezani iz glave in noge ter sredine in roba vroče valjanih trakov. Tudi od VV trakov, zvaljanih iz konti vlitih slabov, smo vzorce vzeli od začetkov in koncev ter od roba in sredine vsakega traka.

### 4. SESTAVA JEKEL

Sestave jekel najdemo v tabelah 1 in 2. Za vsa jekla je značilen nizek ogljik, sorazmerno konstantna vsebnost mangana, nizko žveplo, precejšnje razlike v vsebnosti aluminija ter visoke vsebnosti niklja in kroma,

predvsem pri klasično vlitih jeklih. Ne vemo, kako se slednje odraža na magnetnih lastnostih, gotovo pa je vredno skrbnejšega preverjanja. Za nikelj velja, da je močan gamagen element, da zmanjšuje aktivnost ogljika v avstenitu, zato stabilizira avstenit in tako zmanjšuje hitrost razogljichenja. Seveda je pri sorazmerno nizkih vsebnostih ogljika v jeklu vprašljivo, ali vpliv niklja pride do izraza. Posebno pozornost zaslužijo podatki o količini dušika in kisika. V tabelah navajamo podatke za šaržne analize in za analize na vzorcih, izdelanih iz trakov v več paralelkah. Za klasično vlite šarže je pri dušiku ujemanje med šaržno analizo in povprečjem iz štirih mest iz trakov komaj zadovoljivo, tudi če upoštevamo, da gre za vsebnosti v razponu med 40 in 100 ppm. Povprečni vrednosti za 11 šarž pa se v obeh primerih presenetljivo dobro ujemata in znašata 70 ppm N<sub>2</sub>. Razlike med robom, sredino, glavo in nogo so v razponu ± 15 %, kar je znotraj metodološke napake. Lahko trdimo, da je dušik enakomerno porazdeljen.

V jeklih, izdelanih v novi Demagovi elektroobložni peči, vlitih na kontilivni napravi, pa je vsebnost dušika nižja v povprečju in v ožjih mejah med 31 in 55 ppm s povprečno vrednostjo 40 ppm.

Nekoliko drugačna je slika pri kisiku. Zaradi velikih razlik so v tabeli 1 rezultati paralelnih analiz s spodnjo in zgornjo mejo odstopanja pri klasično vlitih jeklih. Analize so bile izvršene v Železarni Jesenice, na MIL in v Železarni Ravne. Odstopanja so zelo podobna, kar kaže, da je kisik resnično precej neenakomerno porazdeljen v jeklu. Niso redki primeri, da analiza dveh vzorcev, izreznih drug poleg drugega iz istega mesta v kolobarju, odstopa za celo več kot 5 X. Povprečje vseh paralelek tako nima pravega fizikalnega pomena.

Nekatera povprečja se spet prav vzorno ujemajo s šaržno analizo. Vse kaže, da je izcejanje kisika v bloku manjše od izcejanja med velikimi dendriti. Boljšo, in predvsem verjetnejšo sliko o vsebnostih in porazdelitvah kisika nam daje analiza na trakovih, izvaljanih iz konti vlitih slabov (tabela 2). Povedati je potrebno, da je bila točnost dela naprave med analizo stalno kontrolirana s standardi. Vsebnosti kisika, te so aritmetično povprečje osmih ali več paralelek, izreznih iz obeh koncev, sredine in roba traku, so v razponu med 16 in 41 ppm. V TVT, ki so bili izvaljani iz bram, pa je bila vsebnost kisika v razponu med 39 in 79 ppm. Povprečje za 11 šarž v primeru konti vlitih slabov znaša 26 ppm. V drugem primeru, torej pri trakovih, izvaljanih iz klasično vlitih bram, pa znaša povprečje 58 ppm, kar je 2.2 krat več. Nesmiselno bi bilo primerjati šaržne analize kisikov, tako v prvem kot v drugem primeru. Izmerjene vrednosti so v obeh primerih mnogo višje, in sicer v prvem med 60 in 154 ppm, v dru-

Tabela 1: Sestava jekel

Šarža	Kvaliteta	Element u ut. %												Šaržni	
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Al	Sn	Ni	As	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	ppm
1	11 8316 EVC 17	0.008	1.48	0.25	0.023	0.013	0.45	0.16	0.28	0.011	0.35	0.018	61(67)	154	47 ± 26
2	11 8422 EVC 12	0.004	1.09	0.18	0.043	0.005	0.45	0.17	0.13	0.012	0.35	0.016	90(74)	70	66 ± 46
3	11 8401 EVC 12	0.008	1.19	0.23	0.05	0.012	0.22	0.17	0.39	0.012	0.21	0.012	46(37)	64	61 ± 47
4	11 8187 EVC 12	0.010	1.17	0.20	0.043	0.009	0.23	0.19	0.22	0.009	0.29	0.017	102(101)	110	55 ± 26
5	11 8186 EVC 12	0.010	1.19	0.19	0.044	0.007	0.29	0.19	0.20	0.012	0.35	0.012	58(55)	70	47 ± 32
6	11 8185 EVC 12	0.010	1.13	0.20	0.043	0.013	0.29	0.18	0.18	0.01	0.45	0.01	88(67)	101	79 ± 24
7	11 8196 EVC 12	0.010	1.19	0.19	0.044	0.007	0.29	0.19	0.20	0.012	0.35	0.012	75(55)	68	72 ± 44
8	11 8338 EVC 17	0.012	1.54	0.18	0.016	0.003	0.35	0.18	0.22	0.011	0.29	0.017	59(99)	60	60 ± 40
9	11 8421 EVC 17	0.006	1.61	0.18	0.017	0.005	0.72	0.27	0.19	0.013	0.39	0.016	72(73)	72	39 ± 20
10	11 8405 EVC 21	0.010	2.13	0.27	0.04	0.003	0.39	0.28	0.10	0.014	0.56	0.018	72(63)	34	47 ± 56
11	11 8215 EVC 21	0.012	2.10	0.30	0.036	0.002	0.28	0.19	0.26	0.012	0.22	0.014	41(104)	—	64 ± 42

\* povprečna vrednost N<sub>2</sub> = 70 ppm

Tabela 2: Sestava jekel

Šarža	Kolobar	Kvaliteta	Element v ut. %											Šaržni		
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Al	Sn	Ni	O <sub>2</sub> ppm	N <sub>2</sub> ppm	O <sub>2</sub> ppm	
1	21 1189	5760	EVC 15	0.010	1.42	0.33	0.025	0.005	0.22	0.19	0.30	0.008	0.55	101	31	41
2	21 1220	5799	EVC 18	0.021	1.63	0.48	0.043	0.006	0.22	0.26	0.39	0.014	0.12	53	36	29
3	21 1236	5802	EVC 18	0.012	1.67	0.29	0.034	0.002	0.24	0.19	0.10	0.009	0.15	91	35	28
4	21 1237	5816	EVC 18	0.013	1.78	0.38	0.029	0.002	0.29	0.19	0.14	0.009	0.19	124	32	23
5	21 1242	6010	EVC 15	0.019	1.51	0.26	0.026	0.011	0.18	0.20	0.18	0.009	0.18	105	48	34
6	21 1235	6015	EVC 18	0.029	1.63	0.25	0.029	0.010	0.13	0.25	0.15	0.018	0.13	—	55	27
7	21 1243	6018	EVC 18	0.020	1.72	0.34	0.028	0.004	0.16	0.23	0.15	0.010	0.15	109	49	25
8	21 1065	4973	EVC 15	0.010	1.42	0.33	0.025	0.005	0.22	0.19	0.30	0.008	0.55	60	31	16
9	21 1156	5527	EVC 18	0.010	1.91	0.30	0.031	0.001	0.14	0.23	0.085	0.007	0.12	101	42	33
10	21 1101	4983	EVC 15	0.030	1.41	0.24	0.023	0.006	0.21	0.20	0.49	0.011	0.13	—	41	16
11	21 1100	4986	EVC 15	0.022	1.37	0.39	0.024	0.005	0.25	0.23	0.13	0.011	0.10	—	31	18

\* O<sub>2</sub> — povprečje (G + N + Sr + R) TVT  
 Povprečje za 11 šarž O<sub>2</sub> = 26 ppm

gem primeru pa med 60 in 124 ppm. Razlike so za pametno razlogo nesprejemljive in po mnenju jeklarjev netočne. Precejšnja razlika v vsebnosti kisika v trakovih je možno pripisati različnemu načinu litja, in sicer na račun onečiščenja jekla pri litju. Med trakovi, ki so bili izvaljeni iz bram, in tistimi, ki so bili izvaljeni iz konti vlitih slabov, je velika razlika prav v tem, da v drugih praktično ni vključkov aluminijevega oksida v nizih, ki so v prvih pogosti.

**5. METODOLOGIJA OVREDNOTENJA NEKOVINSKIH VKLJUČKOV**

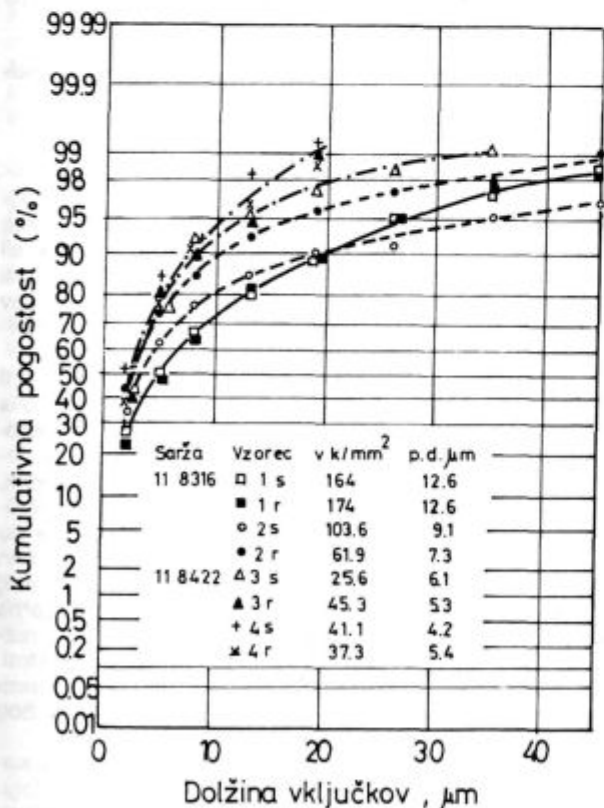
Na razpolago smo imeli napravo za analizo slike, ki je povezana z raster elektronskim mikroskopom. Naprava

je uporabna za velikostno analizo vključkov, katerih minimalna dimenzija je okoli 1 μm, razmerje debelina / dolžina pa ni manjše od 0.1.

Od vključkov, ki jih najdemo v dinamju jeklu, je zato mogoče zanesljivo ovrednotiti le zrnate oksidne vključke, sulfidne pa le tedaj, če niso lasaste oblike, katerih debelina je pogosto blizu 0.1 μm, razmerje debelina / dolžina pa blizu 0.01. Zato ovrednotenje vključkov na avtomatski napravi za analizo slike ni zanesljivo.

Iz enakih razlogov pa ni zanesljivo določanje površinske gostote vključkov. Zato smo analizo vključkov izvršili po kombinirani metodi.

Na vseh vzorcih smo na 9 mestih za vsak vzorec ali 36 na kolobar prešteli in izmerili vse sulfidne in oksidne vključke, ki jih je bilo mogoče razločiti v mikroskopu pri

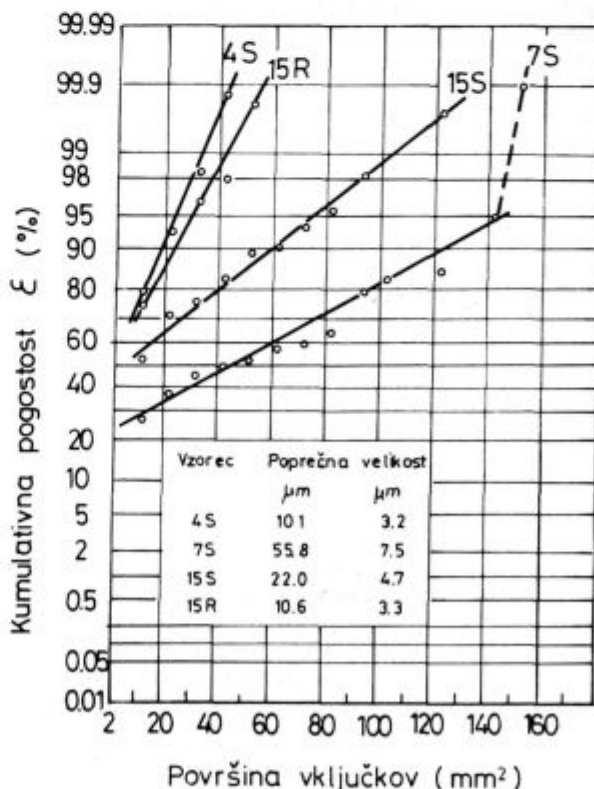


Slika 6.

Dolžinska porazdelitev vključkov manganovega sulfida v trakovih

Fig. 6

Length distribution of manganese sulphide inclusions in strips



Slika 7.

Velikostna porazdelitev oksidnih vključkov v trakovih

Fig. 7

Size distribution of oxide inclusions in strips

povečavi 500 $\times$ . Predvidevamo, da smo zabeležili vse vključke, daljše od 1  $\mu\text{m}$ . Poleg tega smo za nekatere vzorce izvršili tudi avtomatično analizo deleža, ki ga na obrusku zavzema površina oksidnih vključkov, in določili tudi velikostno porazdelitev vključkov. Za nekaj vzorcev smo izdelali histograme, ki kažejo porazdelitev sulfidnih vključkov po dolžini in oksidnih vključkov po površini, oboje kot relativno pogostost v odvisnosti od dolžine oziroma površine vključkov (slika 6 in slika 7).

Število oksidnih in sulfidnih vključkov je bilo v različnih vzorcih zelo različno. Temu primerna je seveda statistična napaka. Kljub sistematični merilni netočnosti v našem primeru pa so histogrami dokaj zanimivi in dokaj objektivna slika velikostne porazdelitve vključkov, da je možna objektivna ocena jekla.

## 6. MIKROMORFOLOGIJA SULFIDNIH VKLJUČKOV

Vključke manganovega sulfida v klasično vlitim jeklu lahko po obliki razdelimo v 5 skupin z različno obliko:

- lasasti vključki z razmerjem debelina / dolžina pod 0.01; to so vključki z debelino do 0.5  $\mu\text{m}$ ;
- razpotegnjeni vključki z razmerjem debelina / dolžina 0.1 do 0.05;
- lečasti vključki z razmerjem debelina / dolžina 0.5;
- zrnati vključki, v katerih sta sulfidna in oksidna faza zraščeni;
- zelo redki valjasti vključki ali prizmatični sulfidni vključki.

V večini primerov najdemo v jeklu dve, včasih tudi tri vrste sulfidnih vključkov. Pogosto zasledimo, na sorazmerno majhni površini enega zornega polja pri 500 $\times$  povečavi, istočasno lečasto in lasasto oblikovane sulfidne vključke. Razlaga njihove koeksistence je razlika v specifični plastičnosti sulfida. Poznano je, da je v sulfidnih vključkih del žvepla lahko nadomeščen s kisikom in da so tako zvani oksisulfidi slabo deformabilni, imajo majhno sposobnost za preoblikovanje pri temperaturah valjanja. Na sliki 6 prikazana odvisnost med velikostjo in komulativno pogostostjo vključkov v pollogaritmičnem prikazu, nima oblike premice. To pa seveda pove, da porazdelitev ni normalna, da je med vključki relativno preveč kratkih. Če drži mnenje, da se veliki vključki deformirajo bolj kot majhni<sup>9</sup>, bi pričakovali ravno obratno, več dolgih vključkov. Preiskana jekla se med seboj močno razlikujejo po številu vključkov na enoto površine in nekoliko manj, vendar še vedno precej, tudi po dolžini. Vrednost zmnožka števila vključkov in povprečne dolžine (grobo ocenjena količina sulfidne mase) raste s količino žvepla v jeklu, vendar je raztros zelo velik.

V jeklih, vlitih v brame, je bila vsebnost žvepla v razponu od 0.002 do 0.013 %, povprečno 0.007 %.

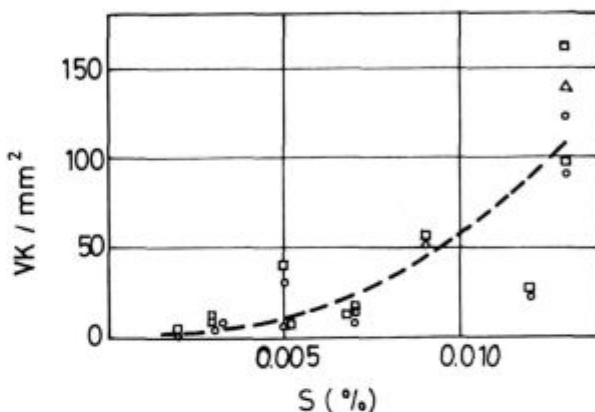
V konti litih jeklih je vsebnost žvepla v razponu od 0.001 do 0.013 %, povprečno 0.005 %, torej so ta jekla v povprečju bolj čista.

V jeklih, ki so bila konti vlita, najdemo samo dve vrsti vključkov. Zraščence sulfidne in oksidne faze ter lečaste sulfidne vključke. V vseh preiskanih jeklih je bila količina sulfidnih vključkov, ki jih razpoznamo v optičnem mikroskopu, premajhna za zanesljivo oceno po uporabljeni metodi. Vključki so redki in po dolžini ne presegajo 3  $\mu\text{m}$ . Verjetno bi bilo potrebno uporabiti metodo, ki bi omogočala analizo vključkov pod 1  $\mu\text{m}$ .

Naj poudarimo, da v nobenem primeru konti litega jekla nismo našli razpotegnjenih sulfidov. Take vključke smo našli v trakovih, ki so bili izvaljani iz bram še pri 0.003 % žvepla. Iz vsebnosti mangana je mogoče sklepati, da je praktično vse žveplo vezano v manganov sul-

fid v jeklih obeh vrst. Dejstvo, da najdemo v konti jeklih le vključke z velikostjo pod 3  $\mu\text{m}$ , navaja na sklep, da so v teh jeklih vključki bolj številni, vendar pa pod velikostjo, ki jo je mogoče opredeliti v optičnem mikroskopu. V vzorcih z manj kot 0.003 % S v optičnem mikroskopu ni več opaziti sulfidnih vključkov, kar pa se ne dogaja pri jeklih, vlitih v brame.

Čeprav naša analiza zajema le v optičnem mikroskopu vidni del sulfidnih vključkov, je zanimivo razmerje med količino žvepla in gostoto sulfidnih vključkov (slika 9). Vidimo, da število vključkov na enoto površine raste, ko se večja vsebnost žvepla v jeklu, po neki nelinearni odvisnosti, rast pa je hitrejša, čim več je žvepla v jeklu.



Slika 9.

Odvisnost med količino S in številom sulfidnih vključkov na enoto površine vzdolžnega preseka

Fig. 9

Relationship between the amount of S and the number of sulphide inclusions per unit area of longitudinal section

## 7. OKSIDNI VKLJUČKI

V obeh jeklih najdemo vsaj 4 vrste oksidnih vključkov, ki so si podobni. To so zrnati vključki z obliko nepravilnega poliedra, zrnati vključki z obliko kock ali paličk, zrnati zraščenci oksidov in sulfidov ter krogličasti vključki. V trakovih iz konti slabov nismo našli vključkov v nizih, kot so vključki v trakovih iz bram, ki so iz aluminijevega oksida.

Med različnimi trakovi so precejšnje razlike v gostoti točkastih vključkov. V trakovih, izvaljanih iz bram, je bila gostota točkastih oksidov manjša. Tako imamo v trakovih iz konti slabov v povprečju 50.6 vključkov/mm<sup>2</sup>, v trakovih iz bram pa le 17 vključkov/mm<sup>2</sup>. Drugi dejavnik, pomemben za oceno vključkov, je njihova velikost. Velikostna porazdelitev je v vseh primerih log-normalna do 95 % vseh vključkov. Povprečna velikost je med 2 in 2.2  $\mu\text{m}$  v trakovih iz konti vlitih slabov in 4.7  $\mu\text{m}$ , torej dvakrat večja, v trakovih iz bram. Dvakrat večja linearna velikost pa ustreza 8-krat večji prostornini. Torej je razmerje v velikosti večje od razlike v površinski gostoti. To dovoljuje sklep, da je v trakovih iz bram večja masa oksidov, torej je po tem merilu te vrste jeklo bolj onečiščeno.

Jeklo za obe vrsti trakov, tiste iz bram in iz konti slabov, je bilo izdelano po podobni tehnologiji. Zato je logičen sklep, da je razlika v povprečni velikosti vključkov posledica razlike v hitrosti strjevanja. Jeklo se v bramah počasneje strjuje, zato se lahko vključki združujejo v večje, celo take, ki se zdrobijo v procesu valjanja in jih najdemo v trakovih v obliki nizov. Analiza ni pokazala

nobene korelacije med količino kisika in številom oksidnih vključkov na enoto površine. Kot je omenjeno v uvodu, nekovinski vključki ovirajo premikanje mej magnetnih domen, torej povečujejo energijo, potrebno za spremembo magnetnega polja, in v končni meri povečujejo koercitivnost in vatne izgube. Literarni podatki<sup>4</sup> navajajo kot posebno škodljive precipitate z velikostjo pod 0,1 μm.

To niso oksidne faze, temveč sulfidi in nitridi, ki nastanejo iz faz, ki so se raztopile v jeklu pri segrevanju pred valjanjem, mogoče pa tudi pri hitrem strjevanju. Kako je s prisotnostjo, količino in velikostjo vključkov oziroma precipitativ z velikostjo pod 1 μm v naših jeklih za elektro pločevine, ne vemo, saj te raziskave še niso bile izvršene. Vir 5 navaja, da je gostota vključkov pod 1 μm večja od 100 vključkov/mm<sup>2</sup>; v nekem jeklu, manj čistem, kot je naše, s 70–90 vključki/mm<sup>2</sup>, velikosti nad 1 μm.

Iz vsega doslej odkritega bi lahko še najbolj zanesljivo domnevali, da gre za vključke, ki jih nismo mogli videti pri 500× povečavi. Zanimivo je, da v trakovih iz konti vlitih jekel z vsebnostjo pod 0,003 % S nismo opazili sulfidov. Sulfidi pa po vsej verjetnosti so, vendar tako majhni, da jih v optičnem mikroskopu nismo videli.

Literarni podatki navajajo, da so vatne izgube linearno odvisne od tiste čistoče, ki jo pojmujejo kot vsebnost spremljajočih elementov<sup>1,2</sup> S, O<sub>2</sub> in N<sub>2</sub>. Ti elementi se vežejo v sulfide, okside in nitride, ki so tem številnejši, čim manjši so.

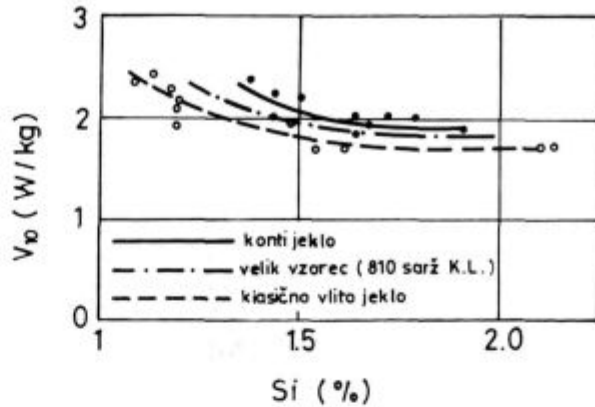
### 8. MIKROSTRUKTURA

Vzorci za preiskave smo izbrali tako, da je vsebnost silicija v trakovih med 1,1 in 2,13 %. Vzorci pripadajo trem različnim kvaliteta dinam jekla. Razlike v mikrostrukturi med trakovi iste kvalitete so relativno majhne. Nekoliko večje pa so razlike med različnimi vrstami jekla in so posledica zmanjšane hitrosti statične rekristalizacije ferita zaradi povečane vsebnosti silicija v jeklu.

V glavah trakov, izvaljanih iz bram, najdemo v sredini različno močne izceje, v katerih so zrna manjša, perlitna pa je mnogo več, kot ob površini. Treba je pripomniti, da gre v tem primeru le za krajši del traku in ne predstavlja tipične strukture dinam trakov. V trakovih, zvaljanih iz bram, je včasih opaziti v površinskem pasu posamezna velika zrna, ki so zrasla zaradi deformacijsko inducirane rasti zrn ferita med valjanjem in po njem. Za obe vrsti trakov lahko trdimo, da je mikrostruktura podobna. Opazimo poznane razlike v mikrostrukturi med jeklom tik ob površini in jeklom v notranjosti. Obe vrsti trakov kažeta podobno velikost zrn in praktično enake značilnosti. Ob obeh površinah nastopa drobno poligonalno, rekristalizirano zrno, v sredini pa večje, nekoliko podolgovato zrno. S stališča mikrostrukture imajo trakovi, zvaljani iz konti jekel, bolj enakomerno mikrostrukturo po vročem valjanju. Ni jasno, ali v kontinuiranih slabih pri temperaturah valjanja ni mogoč proces selektivne rasti zrn ferita ob površini ali pa je iz še neznanega razloga proces rekristalizacije med vročim valjanjem lažji in hitrejši v konti jeklih kot v jeklih, vlitih klasično v brame. Namen tega dela je pokazati na morebitne razlike v mikrostrukturi, zato o mehanizmu nastanka ne bomo razpravljali.

### 9. MAGNETNE LASTNOSTI

Vsebnosti ogljika po razogljčenju kažejo, da je bil proces razogljčenja v vseh trakovih učinkovit. Velikost rekristaliziranih zrn in tekstura rekristalizacije sta toliko podobna, da se to ne more odražati neposredno na magnetnih lastnostih. Pač pa so te odvisne od količine

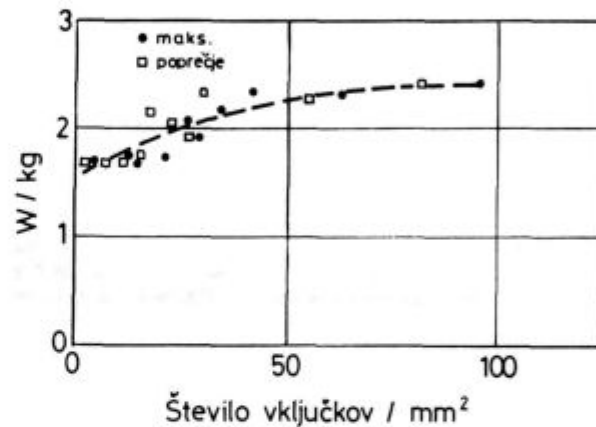


Slika 8.

Odvisnost med količino silicija v jeklih in vatnimi izgubami pri 1.0 T

Fig. 8.

Relationship between the silicon content in steel and the core loss at 1.0 T



Slika 10.

Odvisnost med gostoto vključkov MnS in vatnimi izgubami pri 1.0 T

Fig. 10

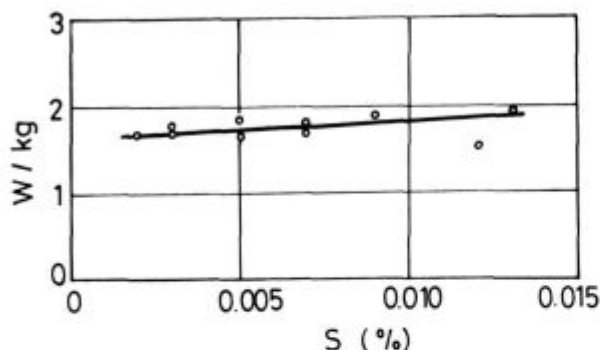
Relationship between the density of MnS inclusions and the core loss at 1.0 T

silicija, kot to prikazuje **slika 8**. Pri povečanju količine Si od 1,1 na 1,6 % se zmanjšajo vatne izgube za okoli 0,5 W/kg, izmerjeno pri 1 Tesla. Število preiskanih šarž je sicer premajhno za statistično zanesljive sklepe; če pa krivuljo primerjamo z analizo velikega vzorca, 810 šarž, vidimo, da to polkvantitativno analizo lahko ocenimo kot verodostojno.

Dobra je korelacija med številom sulfidnih vključkov in vatnimi izgubami (**slika 10**) pri klasično vlitim jeklu, kjer je delež vidnih sulfidnih vključkov večji kot pri konti jeklu.

Pri konti vlitim jeklu, kjer je delež vključkov, ki jih vidimo v optičnem mikroskopu, bistveno manjši, te korelacije nismo potrdili. Pač pa pri tem jeklu nekoliko rastejo vatne izgube z vsebnostjo žvepla (**slika 11**).

V sestavi ni razlike med jeklom, ki je bilo vlieto v brame in konti vlieto v slabe. Mikrostruktura in vsebnost ogljika sta po razogljčenju in rekristalizaciji podobna, zato sklepamo, da so večje vatne izgube pri trakovih iz konti slabov posledica večje dispergiraniosti nekovinskih faz, torej manjših sulfidnih, oksidnih in nitridnih vključkov in precipitativ. Negativni vpliv večje dispergiraniosti je celo prevladal nad pozitivnim vplivom manjše vsebnosti kisika, dušika in v manjši meri tudi žvepla.



Slika 11.

Ovisnost med količino S v jeklu in vatnimi izgubami pri 1.0 T

Fig. 11

Relationship between the amount of S in steel and the core loss at 1.0 T

## 10. ZAKLJUČEK

Rezultati preiskav na trakovih 11 šarž, zvaljanih iz konti litih slabov, v primerjavi z rezultati trakov 11 šarž, zvaljanih iz klasično vlitih bram, kažejo naslednje značilnosti:

— Pri enaki vsebnosti žvepla v jeklu je manjše število in manjša velikost sulfidnih vključkov, ki jih je mogoče razločiti v optičnem mikroskopu in so večji od  $1\ \mu\text{m}$ . Verjetno je to posledica prisotnosti sulfidnih vključkov pod  $1\ \mu\text{m}$ , kar bo treba dokazati.

— Večje število točkastih oksidnih vključkov, ki so zelo enakomerno porazdeljeni v jeklu, oziroma večja gostota točkastih oksidnih vključkov. Razlika v številu je

pri enaki analizi trikratna. Vendar je v konti vlitim jeklu v povprečju linearna velikost dvakrat manjša kot v trakovih iz bram.

— V trakovih, izvaljanih iz konti slabov, ni oksidnih vključkov v nizih.

— Razlika v velikosti in porazdelitvi oksidnih vključkov je lahko posledica manjšega združevanja vključkov zaradi hitrejšega strjenja jekla. Ni izključeno, da del oksidnih vključkov, ki imajo po velikosti močnejši vpliv na magnetne izgube, ni viden v optičnem mikroskopu.

— V trakovih, zvaljanih iz konti slabov, ima jeklo bolj enakomerno mikrostrukturo kot v trakovih, zvaljanih iz bram. Kaže, da se večja enakomernost v sestavi in čistoči v primerjavi s klasično vlitimi bramami (noga, glava) odraža v večji sposobnosti jekla za rekristalizacijo med procesom vročega valjanja.

— Rahlo povečanje izgub v trakovih iz konti jekla pri magnetenju je verjetno posledica prisotnosti večjega števila vključkov, velikosti okrog  $0.1\ \mu\text{m}$ , v primerjavi s klasično vlitim jeklom.

## LITERATURA

1. Fritz Bölling, Trends und Ziele in der Entwicklung hochwertiger Elektroblech, Stahl u. Eisen 107 (1987)
2. M. Barisoni, Present Trends to improve the magnetic properties of nonoriented silicon electrical Steels, BTF 1988 (special issue)
3. F. Vodopivec, Železarski zbornik 13, 1979, 161
4. A. Segal, Metals Technology 4, 1977, 177
5. H. A. Wriedt, Metalurgical transactions 7 A, 1976, 711
6. Fritz Bölling, Hochwertiges Electroblech für die Energietechnik Stahl u. Eisen 102, 1982, 17, 833
7. H. Huneus, Stahlwerke Bochum Aktiengesellschaft (1985) interna publikacija

## ZUSAMMENFASSUNG

Ein Vergleich der in Brammenkokilen vergossenen und Stranggegossener Stähle für nichtorientierte Elektrobleche.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an Bändern von 11 Schmelzen ausgewalzt aus Stranggegossenen Brammen im Vergleich zu den Ergebnissen aus Bändern von 11 Schmelzen ausgewalzt aus klassisch vergossenen Brammenblöcken zeigen folgende Eigenheiten:

— Bei gleichem Schwefelgehalt im Stahl ist die Zahl und die Grösse der Sulfideinschlüsse die im optischen Mikroskop erkannt werden können und sind grösser als  $1\ \mu\text{m}$ , kleiner in Bändern aus stranggegossenem Stahl. Wahrscheinlich ist das die Folge der Anwesenheit von Sulfideinschlüssen unter  $1\ \mu\text{m}$  was noch zu beweisen ist.

— Die Zahl der Punktförmigen Oxideinschlüsse die im Stahl sehr gleichmässig verteilt sind ist grösser bzw. die Dichte der Punktförmigen Oxideinschlüsse ist grösser. Der Unterschied in der Zahl ist bei gleicher Analyse dreifach. Jedoch ist im Stranggegossenem Stahl die Lineare Grösse im Durchschnitt um einmal kleiner als in Bändern aus Brammenblöcken.

— In Bändern ausgewalzt aus stranggegossenen Brammen sind keine Oxideinschlüsse in Reihen zu finden.

— Der Unterschied in der Grösse und Verteilung der Oxideinschlüsse kann die Folge kleinerer Zusammenballung der Einschlüsse wegen schnellerer Erstarung von Stahl sein. Es ist nicht ausgeschlossen das ein Teil der Oxideinschlüsse die der Grösse nach einen stärkeren Einfluss auf die Magnetverluste haben im optischen Mikroskop nicht erkennbar ist.

— Das Mikrogefüge in Bändern, ausgewalzt aus Stranggegossenen Brammen ist gleichmässiger als in Bändern ausgewalzt aus Brammenblöcken. Es ist anzunehmen, dass sich die grössere Gleichmässigkeit in der Zusammensetzung und Reinheit im Vergleich zu Brammenblöcken (Fuss, Kopf) zeigt in grösserer Fähigkeit von Stahl für die Rekristallisation während des Warmwalzens.

— Eine geringe Vergrösserung der Verluste in Bändern aus Stranggegossenem Stahl bei der Magnetisierung ist wahrscheinlich die Folge einer grösseren Zahl von Einschlüssen der Grösse um  $0.1\ \mu\text{m}$  im Vergleich zu klassisch vergossenem Stahl.



## SUMMARY

Results of investigations of strips rolled of 11 batches of continuously cast slabs and of the same number of batches of slabs cast by standard technology give the following characteristics:

— At the same sulphur content in steel, the smaller is number and the smaller is size of sulphide inclusions which are still resolvable in optical microscope and are bigger than  $1 \mu\text{m}$ . This is probably due to presence of inclusions smaller than  $1 \mu\text{m}$ , but there it is still necessary to provide evidence for this.

— Greater number of point oxide inclusions which are very uniformly distributed in steel, or greater density of point oxide inclusions. Difference in number at the same chemical analysis is up to three times. But in continuously cast steel the average linear size of inclusions is half of that when strips are rolled from ingots.

— Oxide inclusions in strips rolled of continuously cast steel are never in strings.

— Difference in size and distribution of oxide inclusions can be ascribed to some coalescence due to faster solidification of steel. It is quite possible that a portion of oxide inclusions which have according to their size greater influence on magnetic losses is not resolvable in optical microscope.

— Strips rolled from continuously cast slabs have more uniform microstructure than the strips rolled from ingots. It seems that greater uniformity of composition and the purity of continuously cast steel compared with standard casting into ingots (tops, bottoms) enables higher ability of steel for recrystallization during the hot rolling.

— Slight increase in magnetization loss applying strips made of continuously cast steel can be probably ascribed to the presence of greater amount of inclusions of the size around  $0.1 \mu\text{m}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования лент 11-ти вставок прокатанных из непрерывно отлитых слэбов при сравнении с результатами лент 11-ти вставок, прокатанных из классически отлитых слэбов оказали следующие характерные особенности:

— при одинаковом содержании серы в стали количество и величина сульфидных включений, которые можно различить в оптическом микроскопе свыше  $1 \mu$  возможно, что это последствие присутствия сульфидных включений величины меньше  $1 \mu$ , что надо доказать.

— Большое число точковых оксидных включений, которые очень равномерно распределены в стали, относительно более густота точковых оксидных включений. Разница в количестве составляет три раза. Хотя при непрерывно отлитом стали в среднем величина один раз меньше чем в лентах в слэбах.

— В лентах прокатанных из непрерывно отлитых слэбов оксидных включений нет.

— Разница в величине и в распределении оксидных включений состоит в возможности в последствии недостаточного слияния включений вследствие более быстрого застывания стали. Не исключается, что часть оксидных включений, которые по величине имеют более сильное влияние на потери магнетизма не различается в оптическом микроскопе.

— В лентах, прокатанных из слэбов непрерывного литья имеет сталь более равномерную микроструктуру чем в лентах прокатанных из обжатых слэбов. Оказывается, что увеличенная равномерность состава и чистоты в сравнении с классическими отлитыми слэбами (нога, голова) отражается в лучшей способности стали для рекристаллизации) в течении процесса прокатывания.

— Рыхлое увеличение потерь в лентах из непрерывно отлитой стали в течении магнетизма возможно последствие большого количества включения величины приближ. 0. Сравнении в классически отлитой стал.