

VPLIV ELEKTROMAGNETNEGA MEŠANJA NA MAKROSTRUKTURO IN MIKROSTRUKTURO KONTINUIRNO ULITIH GREDIC

THE STRUCTURE OF ELECTROMAGNETICALLY STIRRED CONTINUOUSLY CAST BILLETS

**Boštjan Arh¹, Dimitrij Kmetič¹, Franc Tehovnik¹, Vasilij Prešern²,
Blaženko Koroušič¹, Jakob Lamut³, Henrik Ploštajner⁴**

¹ Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

² Acroni Jesenice, Kidričeva 44, 4270 Jesenice, Slovenija

³ NTF - OMM Ljubljana, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

⁴ Inexa Štore, Štore, Slovenija

e-mail: bostjan.arh@imt.si

Prejem rokopisa - received: 2001-03-06; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-03-20

Uporaba elektromagnetnega mešanja (EMM) pri kontinuirnem litju prispeva k boljši kvaliteti gredic. Vpliv EMS na strukturo strjevanja smo preiskovali pri litju gredic 180 mm x 180 mm na napravi za kontinuirno litje jekla v železarni Inexa Štore. Z uporabo EMM se doseže izboljšanje kvalitete na površini, pod površino in notranji strukturi ulitega jekla z povečanjem sredinskega globulitnega področja ulitih gredic ali blumov. V prispevku je predstavljen vpliv elektromagnetnega mešanja na makrostrukturo in mikrostrukturo ulitih gredic.

Ključne besede: kontinuirno litje, elektromagnetno mešanje, makrostruktura, mikrostruktura

The use of electromagnetic stirring (EMS) for continuous casting brings metallurgical benefits to cast billets. At the Inexa Steelwork Štore we examined the influence of electromagnetic stirring on the solidification structure of cast steel billets with a size of 180 x 180 mm. EMS was applied to improve the surface and subsurface quality as well as the internal quality of continuously cast steel by enlarging the equiaxed zone of the cast billets or blooms. In this paper a comparison of the macrostructures of stirred and non-stirred billets is presented.

Key words: continuously cast billets, electro-magnetic stirring, macrostructure, microstructure

1 UVOD

Morfologija strjevanja neke zlitine je odvisna od termičnih pogojev na meji strjevanja, to je od razmerja G/R (temperaturni gradient/hitrost strjevanja)¹. Pri kontinuirnem ulivanju jekla je razmerje G/R takšno, da je na začetku morfologija strjevanja zrn stebričasta. Pri strjevanju se tvori na meji strjevanja med strjeno skorjo in talino kašasto področje. Če je strjevalna makrostruktura stebričasta, je rast zrn v kašastem področju koherentna z trdnim slojem. Mešanica se upira nadaljnjemu gibanju ter ovira tok taline. Tako kašasto področje vpliva na makroizcejanje, medtem ko je enakoosna zrnata (globulitna) oblika strjevanja ponavadi združena z bolj izotropnimi mikroizcejami. Zato je koristno, da pride čim prej do spremembe iz stebričaste v enakoosno morfologijo strjevanja zrn. Mehanizem tvorbe enakoosnih-globulitnih zrn razlagata dve teoriji:

- heterogena nukleacija² - raznovrstnost kali zrn, pri čemer naj bi bile kali oksidni vključki
- multiplikacija zrn³ - množenje zrn s taljenjem ali lomljenjem vrhov zrn zaradi sile toka taline na meji strjevanja.

Konvektivni tok taline, ki se pojavi pri strjevanju zaradi temperaturnih razlik v ulitku, je posledica različne gostote taline. Če je konvektivni tok dovolj močan, se

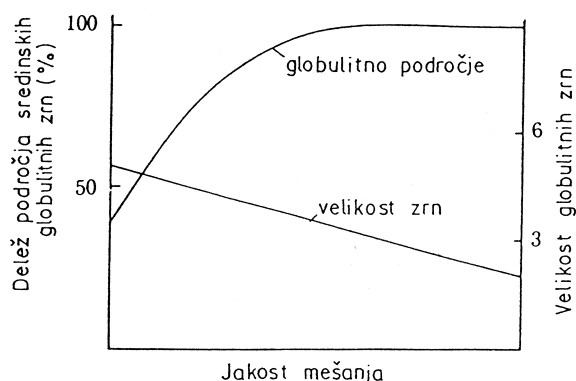
lahko loči del kašaste cone zaradi odtalitve vrhov strjenih zrn. Tako so ločeni delci zrn kali enakoosnih zrn. Povečani tok taline poveča množenje kali z drobljenjem vrhov zrn, kar se kaže v zgodnejši pretvorbi stebričastega strjevanja zrn v globulitno strjevanje^{4,5,6}.

Kontinuirno mešanje poveča tok taline in pripomore k odpravljanju preostalega pregretja v kašasti coni oziroma na meji strjevanja, s tem vpliva na zmanjšanje razmerja G/R, kar učinkuje na zgodnejšo spremembo stebričaste v enakoosno morfologijo strjevanja zrn. Dejavniki, ki vplivajo na strukturo in lastnosti litih gredic, so temperatura litja, hitrost litja, presek ulitka, sestava jekla^{7,8,9,10}. **Sliki 1 in 2** prikazujeta vpliv elektromagnetnega mešanja na delež globulitnega oziroma sredinskega področja enakoosnih zrn po preseku ulitka.

Namen raziskave je bil ugotoviti učinek elektromagnetnega mešanja (EMS) med redno proizvodnjo na makro- in mikrostrukturo litih gredic in mikrostrukturo valjanih polproizvodov.

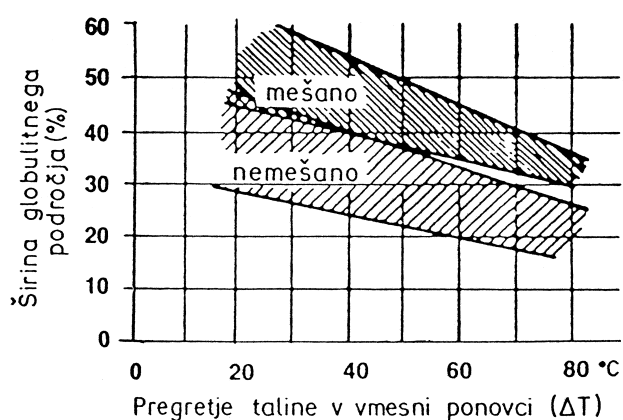
2 EKSPERIMENTALNO DELO

Vpliv elektromagnetnega mešanja smo preiskovali pri litju gredic preseka 180 x 180 mm na trožilni napravi



Slika 1: Delež globulitnega sredinskega področja in velikost enakosnih zrn glede na jakost mešanja ⁶

Figure 1: Fraction of equiaxed-crystal zone and the size of their globulitic crystals from the magnitude of stirred ⁶



Slika 2: Delež globulitnega sredinskega področja brez EMM in z njim pri različni temperaturi pregretja taline ⁷

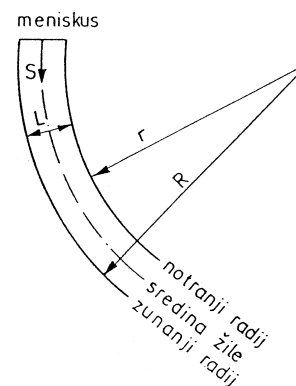
Figure 2: Fraction of equiaxed-crystal zone cast with and without EMS using different superheat above liquid metal ⁷

za kontinuirno litje v železarni Inexsa Štore. Kemijske analize izdelanih talin in parametri ulivanja so prikazani v tabeli 1 in 2. Pri ulivanju se je uporabljal zaprt sistem. Elektromagnetni mešalniki so vgrajeni tik pod kokilo kontinuirne naprave in povzročajo vrtenje taline okrog vertikalne osi žile. Induktivni elektromagnetni mešalniki so štiripolni, dvofaznega tipa in delujejo z mrežno frekvenco. Preiskave so potekale na prečnih presekih gredic. Vzorce mešanih in nemešanih gredic smo jemali z ene žile, da bi bili pogoji ulivanja čimbolj enaki, in sicer tako, da se je od začetka ulivanja uporabljalo

Tabela 1: Kemijske analize izdelanih talin

Table 1: Chemical analysis of the steels

Jeklo	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Al
16MnCr5	0,17	0,24	1,18	0,016	0,024	0,92	0,1	0,03	0,028
ST52-3/1	0,2	0,38	1,51	0,009	0,011	0,11	0,12	0,004	0,026
ST52-3/2	0,18	0,39	1,27	0,008	0,009	0,09	0,11	0,03	0,041
31CrV4	0,37	0,22	0,65	0,029	0,006	0,67	0,12	0,03	0,027
CK45	0,46	0,3	0,66	0,01	0,008	0,1	0,08	0,02	0,032
50CrV4	0,48	0,27	1,13	0,025	0,005	1,14	0,16	0,04	0,026
CK60	0,58	0,27	0,64	0,013	0,009	0,17	0,13	0,02	0,023



Slika 3: Položaj zgornjega in spodnjega dela prečnega preseka gredice glede na radij livne naprave

Figure 3: Position above and below the transverse section of the billet with respect to the radius of strand

elektromagnetno mešanje, po 25 minutah ulivanja pa smo mešalnike izklopili. Na sliki 3 je shematsko prikazan položaj zgornjega dela prečnega preseka gredice ob radiju r in spodnjega dela preseka gredice ob radiju R iz žile glede na radij kontinuirne livne naprave.

Tabela 2: Temperatura ulivanja, temperatura likvidus jekla, temperatura pregretja in hitrost ulivanja

Table 2: Casting temperature, liquidus temperature of steels, superheat temperature and cast velocity of molten steels

Jeklo	T. vliv. (°C)	T. liq. (°C)	T. preg. (°C)	H. uliv. (m.min ⁻¹)
16MnCr5	1545	1511	34	1,5
ST52-3/1	1540	1507	33	1,6
ST52-3/2	1553	1510	43	1,5
31CrV4	1545	1498	47	1,4
CK45	1533	1492	41	1,5
50CrV4	1527	1486	41	1,5
CK60	1523	1483	40	1,4

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

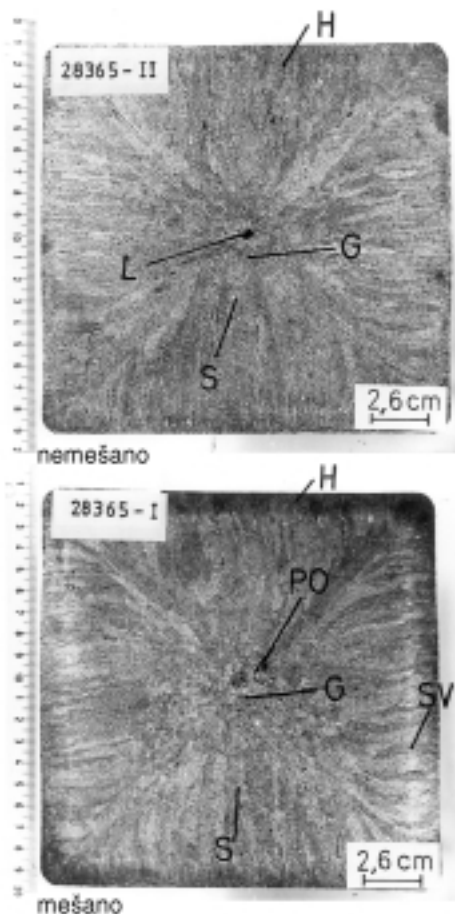
3.1 Makrostruktura litih gredic

Primerjava makrostruktur na prečnih presekih gredic, ulitih z uporabo elektromagnetnega mešanja in brez nje, kaže, da se z mešanjem poveča področje sredinskih globulitnih zrn, področje stebričastih zrn pa je ožje. Pri mešanih gredicah se po preseku gredice od roba dobrih 10 mm pojavlja svetlejši pas negativnih izcejev. Na sliki 4

sta fotografiji makrostrukture preseka nemešane in mešane gredice za jeklo ST52-3/1 ulite pri temperaturi pregretja 43 °C. Na sliki nemešane gredice je prikazano široko področje stebričastih zrn, ki sega skoraj do same sredine gredice, in makrolunker v sredini gredice. Pri mešani gredici se opazi rahlo povečano področje sredinskih globulitnih zrn. Globulitna zrna v sredini gredice so groba in področje teh zrn je manjše kot pri talini enake vrste jekla, ulite z 10 °C nižjo temperaturo pregretja (tabela 2). Za hitro strjenim robnim področjem je svetlejši pas. Slika 5 prikazuje makrostrukturo prečnega preseka gredic jekla CK60. Pri mešani gredici je opaziti široko področje stebričastih zrn. V zgornjem delu gredice se opazi razpoke. Področje sredinskih globulitov je ozko, v sredini gredice pa je viden makrolunker. Pri mešani gredici se vidi povečano področje globulitnih zrn. Povečana je sredinska poroznost in makrolunker je še opazen.

Slika 6 prikazuje Baumann-ov odtis prečnega preseka za kontinuirno ulito gredico jekla 16MnCr5 z 0,024

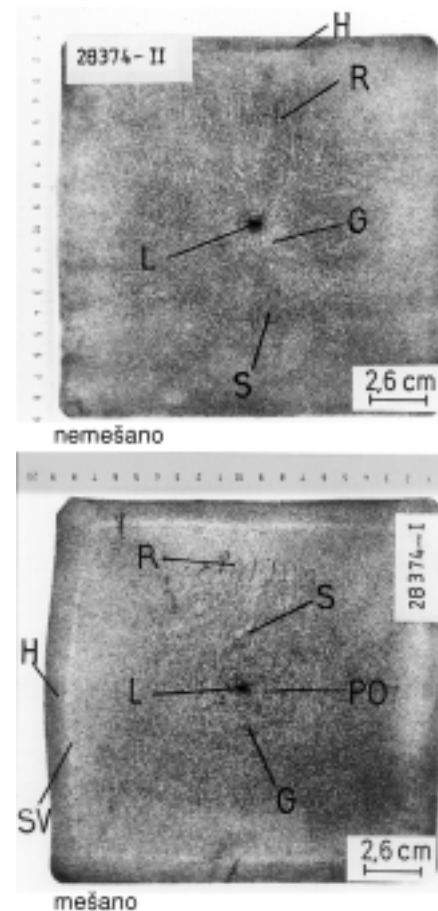
%S. Iz odtisa preseka nemešane gredice je razvidno, da za hitro strjenemu robnemu področju sledijo usmerjena stebričasta zrna. V osrednjem delu gredice usmerjena rast preide v neusmerjena stebričasta zrna. Področje globulitnih zrn v sredini gredice je majhno. Makrolunker je glede na geometrijsko sredino premaknjen navzgor. Pri mešani gredici se za mestom mešanja (svetlejši pas okoli preseka gredice) rast stebričastih zrn nadaljuje. Vendar je opazno široko področje globulitnih zrn, ki je pomaknjeno predvsem na spodnjo stran gredice, to je na zunanji radij loka žile. Z roba zgornjega dela gredice, to je z notranjega radija loka žile pa rastejo stebričasta zrna globoko proti sredini gredice. Makrolunkerja ni opaziti. Področje usmerjene in neusmerjene rasti stebričastih zrn je ožje. V spodnjem delu gredice usmerjena stebričasta rast zrn kmalu preide v globulitna zrna. Na odtisu preseka mešane gredice se vidi, da za svetlejšim pasom rastejo stebričasta zrna glede na stranice gredice proti sredini pod rahlim kotom. Vzrok tega je mešanje taline in toka taline v smeri urinega kazalca.



Slika 4: Makrostruktura prečnega preseka nemešane in mešane gredice jekla ST52-3, ulito z 43 °C pregretjem taline

Figure 4: Macrostructure from transverse section of steel billets ST52-3 cast with and without EMS using 43 °C superheat above liquid metal

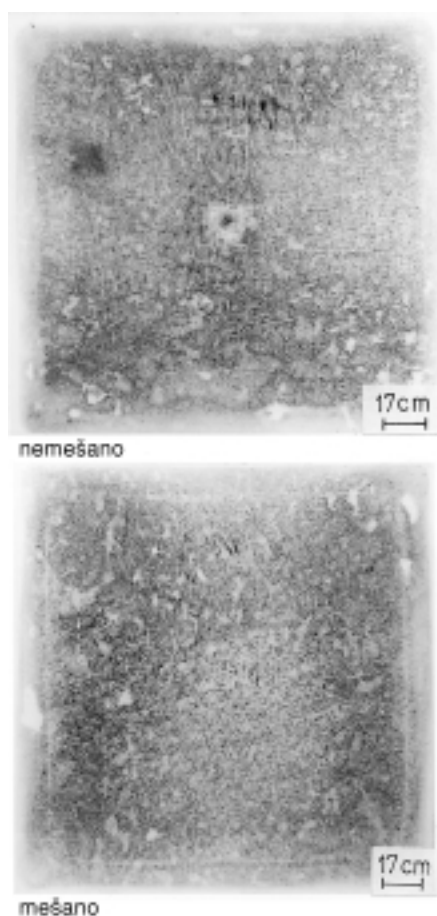
S - stebričasta zrna, PO - porozna sredina, G - sredinska globulitna zrna, L - luncker, H - hitro strjeno robno področje, R - razpoka, SV - svetlejši pas



Slika 5: Makrostruktura prečnega preseka nemešane in mešane gredice jekla CK60

Figure 5: Macrostructure from transverse section of steel billets CK60 cast with and without EMS

S - stebričasta zrna, PO - porozna sredina, G - sredinska globulitna zrna, L - luncker, H - hitro strjeno robno področje, R - razpoka, SV - svetlejši pas



Slika 6: Baumann-ov odtis prečnega preseka nemešane in mešane gredice jekla 16MnCr5 (izcejanje S)
Figure 6: Sulphur printing from transverse section of stirred and non-stirred steel billets 16MnCr5

V tabeli 3 je podan delež področja globulitnih zrn v odstotkih za prečne vzorce mešanih in nemešanih gredic. Največji delež sredinskih globulitnih zrn je pri mešanih gredicah dosežen pri litju jekla 16MnCr5. Nato sledita z manjšim deležem globulitnih zrn mešane gredice jekla 31CrV3 in ST52-3/1. Gredice jekla ST52-3/2 z 10 °C višjo temperaturo litja izkazuje manjši delež področja sredinskih globulitnih zrn. Manjše področje globulitnih zrn se opazi pri talinah z večjo vsebnostjo ogljika, to je pri gredicah jekel CK45 in 50CrV4. Najmanjši delež področja sredinskih globulitnih zrn pri mešani gredici pa je dobljen pri gredicah jekla CK60.

Na prečnih presekih mešanih gredic se vidi, da je področje sredinskih globulitnih zrn glede na geometrijsko sredino gredice pomaknjeno na eno stran, to je na spodnjo stran preseka gredice v smeri zunanega radija (R) loka kontinuirne naprave. Delež sredinskih globulitnih zrn preko geometrijske sredine gredice je v zgornjem delu gredice zelo majhen. Koeficient asimetričnosti (h1/h2) podaja, kakšna je razširjenost področja globulitnih zrn okoli geometrijske sredine - tabela 3.

Tabela 3: Delež globulitnega sredinskega področja in njihova asimetričnost

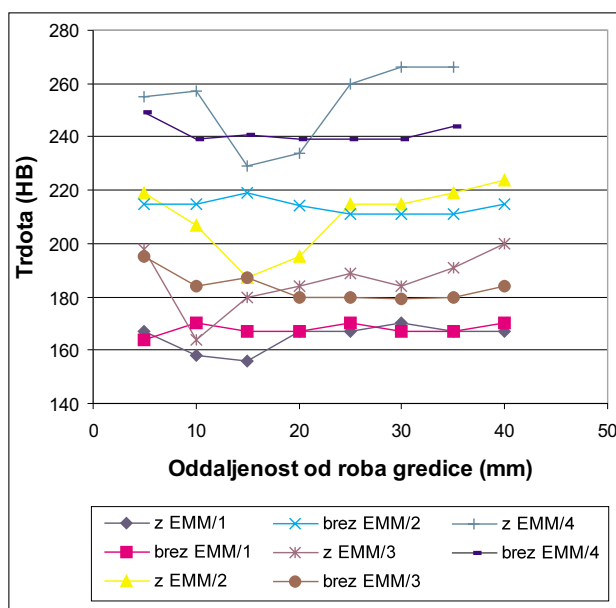
Table 3: Fraction of equiaxed-crystal zone and their asymmetry

Jeklo		Globulit. pod. (%)	H1/h2
16MnCr5	mešano	38	0,30
	nemešano	14	-
ST52-3/1	mešano	35	0,33
	nemešano	14	-
ST52-3/2	mešano	26	0,28
	nemešano	11	-
31CrV4	mešano	37	0,38
	nemešano	12	-
CK45	mešano	31	0,5
	nemešano	15	-
50CrV4	mešano	32	0,33
	nemešano	14	-
CK60	mešano	24	0,46
	nemešano	12	-

Na prečnih presekih mešanih makrojedkanih gredicah se na razdalji 10 do 15 mm od roba opazi svetlejši pas. Ti pasovi nastanejo zaradi mešanja na mestu postavitve EMM vzdolž žile^{7,11}. To so pasovi negativnih izcej topnih elementov v jeklu. Zaradi negativnega izcejanja (ogljika) pride na teh mestih do zmanjšanja trdote. Na sliki 7 so za nekatere taline prikazane izmerjene površinske trdote od roba gredice proti sredini.

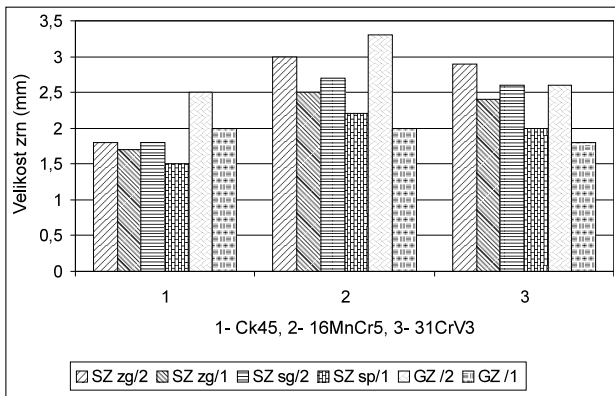
3.2 Mikrostruktura litih gredic

Pri mikrostrukturnih preiskavah smo opazili podobne razlike v strukturi kot pri makrostrukturni. Področje stebričastih zrn je pri mešanih gredicah ožje, zrna pa so



Slika 7: Površinske trdote HB za jeklo 1- ST52-3, 2- CK45, 3- 16MnCr5, 4-31CrV3

Figure 7: Skin-hardness (HB) for the qualitative steels: ST52-3, CK45, 16MnCr5 and 31CrV3



Slika 8: Širina stebričastih zrn v zgornji in spodnji polovici prečnega preseka gredice in premeri sredinskih enakoosnih zrn pri nemešani in mešani gredici

Figure 8: Width of columnar crystals from above and below transverse section of billet, and diameter of equiaxed crystals from stirred and non-stirred billets

SZ Zg - povprečna širina stebričastih zrn v zgornji (r) polovici gredice
 SZ Sp - povprečna širina stebričastih zrn v spodnji (R) polovici gredice

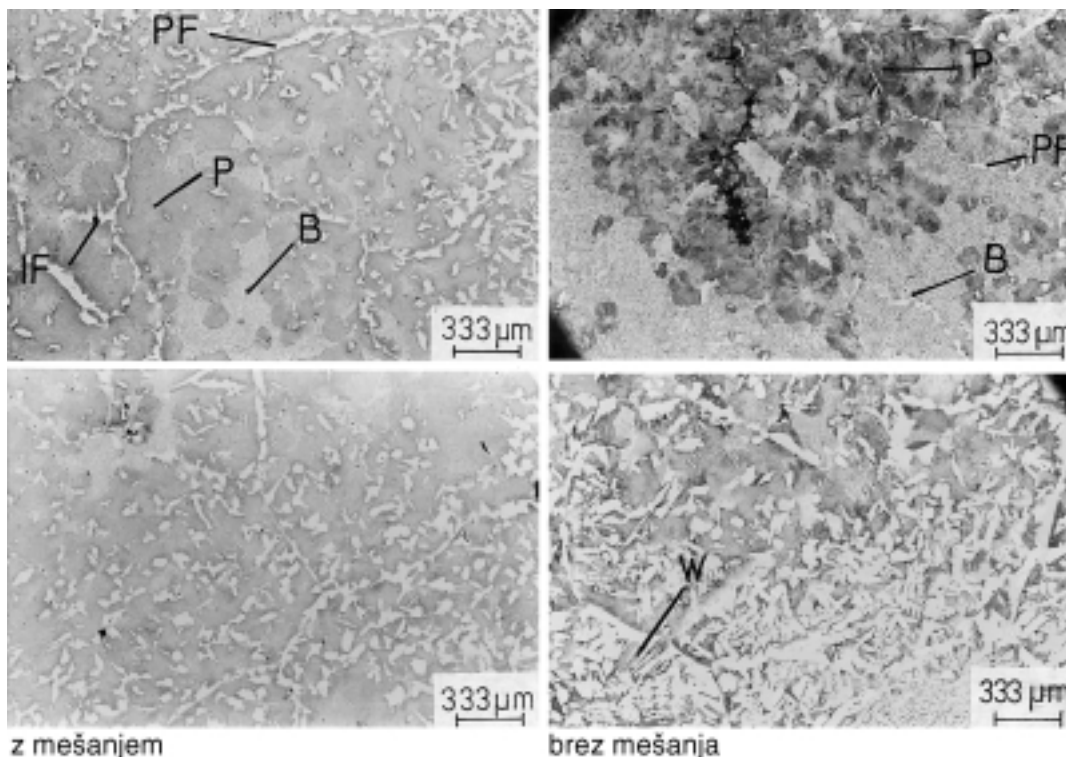
GZ - povprečni premeri sredinskih enakoosnih zrn

/1, /2 - -1 - z EMM, 2 - brez EMM

manjša. Prav tako so globulitna zrna na teh vzorcih manjša. Porozna področja so sorazmerno majhna in večjih lunckerjev ni opaziti. Na sredini je več nekovinskih vključkov. Nizi evtektičnih sulfidnih vključkov so pri mešanih vzorcih manjši.

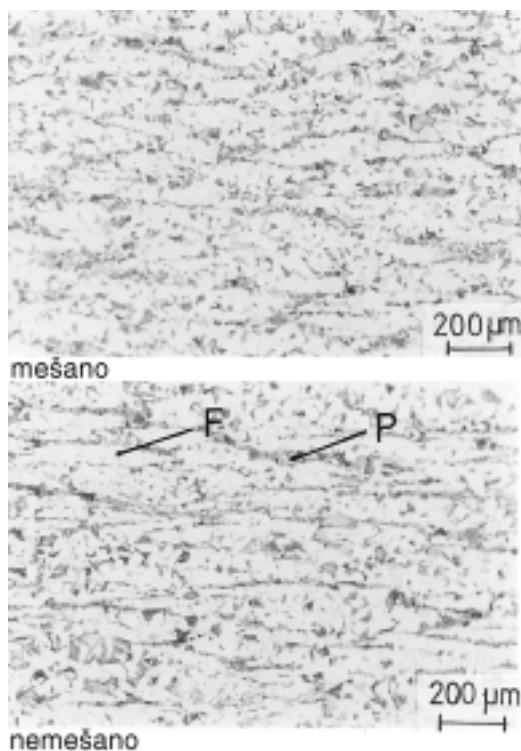
Stebričasta zrna so daljša na zgornji polovici preseka gredice. Področje stebričastih zrn in širina zrn sta manjši pri mešanih gredicah. Primerjava zrn zgornjega dela proti spodnjemu delu mešane gredice kaže, da so stebričasta zrna na zgornjem delu gredice širša. Zato sklepamo, da po preseku gredice med zgornjo in spodnjo polovico gredice ohlajevalna hitrost ni enaka. Velikost globulitnih zrn v sredinskem globulitnem področju gredice je pri mešani gredici manjša. V področju svetlejšega pasu nismo pri mešani gredici opazili v mikrostrukturi nobenih posebnosti. Na **sliki 8** je prikazana širina stebričastih zrn in premer enakoosnih zrn v sredinskem globulitnem področju za gredice jekla Ck45, 16MnCr5 in 31CrV3. V gredici jekla 31CrV4 nastopa tik pod površino gredice področje drobnih globulitov, ki prehajajo v bolj grobe globulite v coni svetlejšega pasu. Od tod dalje rastejo usmerjena stebričasta zrna. Pri gredicah jekel 16MnCr5 in CK45 je pod površino ozko in neenakomerno področje globulitnih zrn. Temu področju sledijo drobna stebričasta zrna, ki so tudi v coni svetlejšega pasu. Od mesta svetlejšega pasu proti sredini gredice rastejo širša usmerjena stebričasta zrna. Pri nemešanih presekih gredic se opazi, da so stebričasta zrna v prvem delu svojega področja ožja kot v drugem delu. Verjetno je vzrok temu v hitrejšem ohlajevanju v začetku njihove rasti.

Na **sliki 9** je na posnetkih prikazana mikrostruktura v področju lunckerja (L) in geometrijske sredine (S)



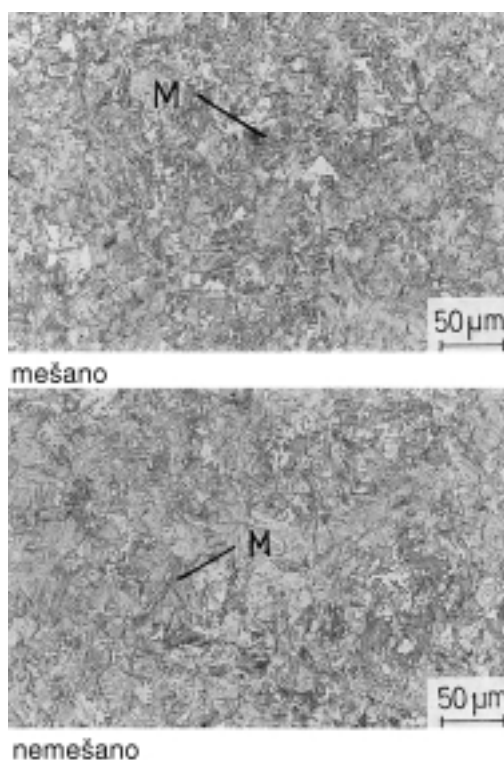
Slika 9: Mikrostruktura osrednjega dela mešane in nemešane gredice jekla 16MnCr5 - 30x - PF - poligonalni ferit, IF - igličasti ferit, P - perlit, B - bainit, W - widmanstätten mikrostruktura

Figure 9: Microstructure in the middle of a stirred and non-stirred billet of steel 16MnCr5



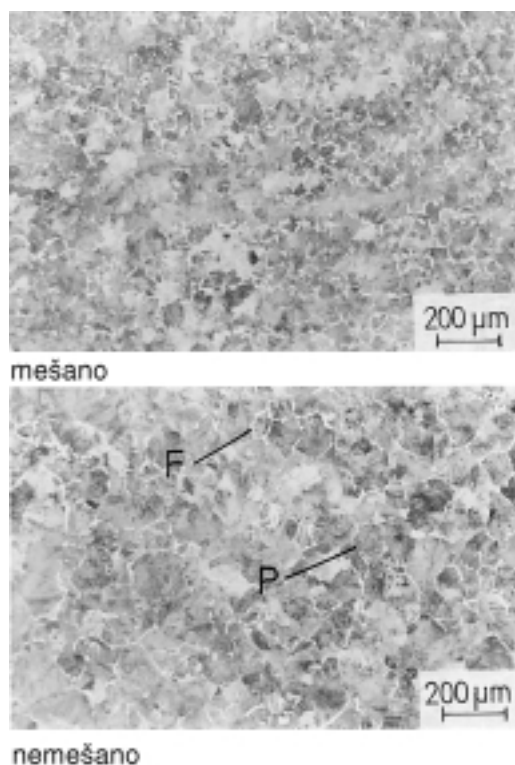
Slika 10: Feritno-perlitna mikrostruktura na sredini valjanca iz mešane in nemešane gredice jekla ST52-3

Figure 10: Ferrite-perlite microstructure in the middle of a rolled piece from a stirred and non-stirred billet of steel ST52-3



Slika 12: Martenzitna mikrostruktura na sredini valjanca iz mešane in nemešane gredice jekla 16MnCr5

Figure 12: Martensite microstructure in the middle of a rolled piece from a stirred and nonstirred billet of steel 16MnCr5



Slika 11: Feritno-perlitna mikrostruktura na sredini valjanca iz mešane in nemešane gredice jekla CK60

Figure 11: Ferrite-perlite microstructure in the middle of a rolled piece from a stirred and non-stirred billet of steel CK60

prečnega preseka nemešane in mešane gredice jekla 16MnCr5. Globulitna zrna v srednjem delu gredice so bolj groba pri mešani gredici. Ferit je izločen po mejah (poligonalni ferit) in v zrnih (igličasti ferit) v bolj grobi obliki pri nemešani gredici. Posebno veliko je ferita v sredini nemešane gredice. Prav tako je v nemešani gredici ob lunkerju zaradi večjega izcejanja elementov več bainita, kot pri mešani gredici.

3.3 Mikrostruktura valjancev

Mikrostrukturne preiskave valjancev smo naredili pri vzorcih mešanih in nemešanih talin jekel ST52-3, CK45, CK60 in 16MnCr5. Profili valjancev jekel ST52-3, CK45 in CK60; okrogle dimenzije ($d=75$ mm), so bili izvaljani iz nemešanih in mešanih gredic s stopnjo predelave 7,3. Profila kvadratne dimenzije (80x80 mm) jekla 16MnCr5 sta bila izvaljana s stopnjo predelave 5,1. Mikrostrukturne preiskave smo naredili v področju ob površini in na sredini valjanca.

Manjša stebričasta in manjša globulitna zrna v jeklu ST52-3 imajo pri gredicah, ulitih z elektromagnetnim mešanjem, za posledico manj izrazito trakavost, ki je sicer značilna za to jeklo. Predvsem je pomembno, da so pasovi ferita in perlita ožji in krajši. Mikrostrukturne značilnosti v sredini valjancev za jeklo ST52-3 so prikazane na **sliki 10**. Pri srednje- in visokoogljčnih jeklih se opazi vpliv mešanja v manjši velikosti zrn na

sredini valjanca - **slika 11**. Intercepcijska dolžina avstenitnih zrn v sredini valjanca (jeklo 16MnCr5) iz nemešane gredice je bila 18,7, iz mešane gredice pa 16,1 (**slika 12**).

4 SKLEP

Elektromagnetno mešanje taline pri kontinuirnem litju ugodno vpliva na homogenost strjevanja. Primerjava makrostruktur na prečnih presekih gredic kaže, da se z mešanjem poveča področje sredinskih globulitnih zrn, področje stebričastih zrn pa se zoži. Na širšem področju sredinskega dela je opazna rahla poroznost, v sredini gredice pa ni več izrazitega lunkerja.

Velikost globulitnega področja je odvisna od temperature pregretja in sestave jekla. Večja temperatura pregretja taline ima za posledico manjšo sredinsko globulitno področje. Največje povečanje sredinskega globulitnega področja je doseženo pri srednjegljičnem jeklu, manjše pri maloogljičnem in najmanjše pri visokoogljičnem jeklu. Zaradi vpliva loka kontinuirne naprave pride do premaknitve področja sredinskih globulitnih zrn na spodnjo stran gredice oziroma na stran ulitka ob zunanem loku kontinuirne naprave. Delež globulitnih zrn v zgornjem delu gredice nad geometrijsko sredino je majhen.

Pri mešanih gredicah nastopa na mestu 10 do 15 mm od roba gredice svetlejši pas. Svetlejši pas na preseku mešane gredice nastane na mestu mešanja (mesto postavitve mešalnika vzdolž žile). Tu pride do negativnega izcejanja topnih elementov v jeklu kot posledica elektromagnetnega mešanja taline.

Mikrostruktura litih gredic ima pri mešanih gredicah ožje področje stebričastih zrn, kjer so zrna tanjša in krajša, globulitna zrna v sredini so manjša. Strjevalna makrostruktura pri mešani gredici je torej bolj homogena.

Pri valjancih, ki so bili izvaljani iz mešanih gredic, so zrna manjša, ožji pa so tudi pasovi ferita in perlit.

5 LITERATURA

- ¹ M. C. Flemings: Solidification Processing, Metallurgical transaction, 5 (1974), 2121-2134
- ² T. Ohashi, et. al.: Effect of oxides on nucleation behavior in supercooled iron, Transactions ISIJ 17 (1977), 262-270
- ³ S. O'Hara, W. A. Tiller: On the Mechanisms of crystal multiplication during solidification in the presence of fluid motion, TMS of AIME, 329 (1967), 497-501
- ⁴ M. Dubke: Elektromagnetisches rühren beim stranggiessen, Metallurgie des stranggiessens - Giesen und erstarren von stahl, Stahl eisen, Dusseldorf, 1992, 449-531
- ⁵ A. A. Tzavaras: Solidification control by electromagnetic stirring state of the art., Continuous Casting, 3 (1984), 47-67
- ⁶ J. J. Moore: Review of axial segregation in continuously cast steel, Iron and Steelmaker, 10 (1980), 8-16
- ⁷ J. J. Moore, N. A. Shah: A review of the effects of electromagnetic stirring (EMS) in C.C. steels, Continuous Casting, 3 (1984), 35-45
- ⁸ M. Diserens, et. Al.: Experiences on continuously cast billets influenced by electromagnetic stirring below mould, Scandinavian Yearnal of Metallurgy, 10 (1981), 19-23
- ⁹ R. Jauch, et al.: Elektromagnetisches rühren in sekundärklbereich von vorkblock und knüppelstranggiessanlagen, Stahl und Eisen 104 (1984), 9, 429-434
- ¹⁰ B. Arh: Master's degree, NTF-OMM, Ljubljana, 1996
- ¹¹ M. R. Bridge, G. D. Rogers: Structural effects and band segregate formation during the electromagnetic stirring of strand-cast steel, Metallurgical transactions B, 153 (1984), 561-589