

## MAKROIZCEJANJE ULITIH GREDIC MACROSEGREGATIONS IN AS-CAST BILLETS

**Boštjan Arh, Franc Tehovnik**

Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija  
bostjan.arh@imt.si

*Prejem rokopisa - received: 2003-06-03; sprejem za objavo - accepted for publication: 2003-03-05*

Nehomogenost je značilna za kontinuirno lito jeklo in je posledica velikega temperaturnega gradienta ob mejni ploskvi likvidus–solidus v vodno hlajeni kokili. Strjevalno strukturo sestavlja veliko področje stebričastih zrn, ki zajema od 50 do 90 % prečnega prereza ulitka, ostanek je področje enakoosnih zrn (globulitov). Stebričasta zrna so povezana z napakami ulitkov, kot so sredinsko krčenje (nastanek lunkejev), makroizcejanje (pozitivno in negativno), notranje razpoke (trakaste izceje).

Z uporabo elektromagnetnega mešanja (EMM) pri kontinuirnem ulivanju taline lahko izboljšamo kvaliteto ulitka z izboljšanjem homogenosti notranje makrostrukture, zmanjšanjem notranjih razpok, poroznosti in izcejanja ter tako dosežemo enakomernjšo kemijsko sestavo litega jekla. Predstavljeni so rezultati o vplivu mešanja taline tik pod kokilo na makroizcejanje kontinuirno ulitih gredic s kvadratnim prerezom 180 mm × 180 mm, ulitih v železarni Inexa, Štore.

Ključne besede: kontinuirno litje, elektromagnetno mešanje, lite gredice, prečno/osno makroizcejanje

Inhomogeneity is for continuous cast steel a consequence of the high temperature gradient at the liquid-solid interface in contact to the water-cooled mould. The as-cast microstructure consists of a wide region of columnar grains covering 50 to 90 % of the billet cross section and a region of equiaxed globular grains. In the region of columnar grains defect like porosity, macrosegregations and internal cracks are located.

Electromagnetic stirring (EMS) of the melt during the solidification improves the quality of the as-cast billets, increases the homogeneity of the macrostructure, decreases the formation of internal cracks, the porosity and the segregations. The effect of EMS on 180 × 180 mm continuous cast billets in steelwork Inexa Štore, are presented.

Key words: continuous casting, electromagnetic stirring, as-cast billets, cross and longitudinal macrosegregations

### 1 UVOD

Izceje so posledica zmanjšanja topnosti na fronti strjevanja in nastanejo zaradi gibanja obogatene taline zunaj fronte strjevanja zaradi:

- konvekcijskih sil, ki so posledica razlike v sestavi in temperaturi taline,
- gibanja tekočega jekla pri ulivanju v kokilo in
- gravitacijskih sil v tekočem jeklu.

Pri močni stebričasti rasti fronta strjevanja potiska talino pred seboj. Zato nastanejo osne makroizceje. Pri rasti velikega sredinskega globulitnega področja z bolj enakomerno porazdeljenimi mikroizcejami so osne makroizceje manj intenzivne<sup>1</sup>. Usmerjena rast in amplituda izcej sta toliko večja, kolikor je večji interval strjevanja jekla razlika med temperaturo taline in trdnega jekla ( $\Delta T$  med L in S). Na ta interval vplivajo poleg vsebnosti ogljika še legirni elementi. Vsi elementi vplivajo tudi na premenske točke jekla tako, da zožujejo področje avstenita (npr. alfageni elementi: Cr, Si, P, Al, Mo, W, V) ali tudi razširjajo to področje (npr. gamageni elementi: Mn, Ni, Co, N). Interval  $\Delta T$  med L in S je pri nizkolegiranih jeklih največji in pri vsebnostih ogljika od 0,5 % do 1,2 % C presega 120 K<sup>2</sup>.

Mori s sodelavci je ugotovil<sup>3</sup>, da se širina področja stebričastih zrn in sredinske izceje povečuje v zaporedju 0,3 % C, 0,1 % C, 0,6 % C v jeklu pri enakih razmerah kontinuirnega ulivanja. Velikost globulitov v sredini

gredice je manjša pri maloogljicnem jeklu kot pri visokoogljicnem, čeprav obe jekli kažeta razširjeno področje rasti stebričastih zrn. To je razložil z ožjim območjem strjevanja pri maloogljicnem jeklu, kjer je na razpolago krajši čas za rast enakoosnih zrn. Kljub temu pa so izceje ogljika, mangana, fosforja in žvepla pri maloogljicnem jeklu (0,1 %-0,2 % C) večje v primerjavi s srednje-ogljicnim jeklom (0,3 %-0,6 % C). To razlaga z drugačnim zaporedjem strjevanja, ki je tekoče  $\rightarrow \delta \rightarrow \gamma$  za maloogljicno jeklo in tekoče  $\rightarrow \gamma$  za visokoogljicno jeklo. Povečane makroizceje so posledica manjše topnosti mangana in ogljika v feritu v primerjavi z avstenitom, zato ostaja talina bogatejša s temi elementi.

V maloogljicnih jeklih z višjo vsebnostjo aluminija ter v srednje- in visokoogljicnih jeklih navadno srečujemo izceje tipa V. Visokoogljicna jekla z več kot 1 % C, legirana z majhnimi količinami kroma, niklja, volframa, kažejo izrazite osne izceje. Pri nerjavnih jeklih izcejajo poleg ogljika, mangana, žvepla, fosforja še nikelj, titan in molibden<sup>4</sup>. **Slika 1** prikazuje razmerje izcej za žveplo, mangan in fosfor v odvisnosti od vsebnosti ogljika v jeklu. Čeprav je velik raztros v analizah, pa velja za vsak element očitno neko določeno razmerje izcejanja<sup>5</sup>.

Elektromagnetno mešanje taline v kokili (M-EMM) ali pod njo in v sekundarni coni strjevanja (S-EMM) znatno poveča področje sredinskih enakoosnih zrn in zmanjša makroizcejanje.

Namesto razpok in lunckerjev v osi nemešane gredice nastane pri mešani gredici razpršena sredinska poroznost, periodično osno locirane V- izceje pa se pri mešani gredici združijo v sredinski pas V izcej. Z globulitnim strjevanjem sredine žile ne odpravimo popolnoma sredinskega izcejanja. Z elektromagnetnim mešanjem taline jekla v območju končnega strjevanja tekočega korena (F-EMM) lahko zagotovimo tudi minimalne pasove V-izcej<sup>6</sup>.

Izboljšanje kakovosti ulitka se torej lahko doseže z mešanjem taline na več mestih vzdolž žile kontinuirne naprave, skladno z vrsto jekla in želeno kakovostjo ulitka. Iz **slike 2** je razvidno, da se pri srednjeogljčnih jeklih povprečna stopnja izcejanja in standardna deviacija zmanjšata pri uporabi M-EMM, še veliko bolj pa se stopnja izcejanja zmanjša pri kombinaciji mešanja z M+F EMM ali M+S+F EMM. Pri visokoogljčnih jeklih (**slika 2**) se standardna deviacija sredinskih izcej zmanjša pri mešanju taline v kokili (M), medtem ko se povprečna stopnja izcejanja ne zmanjša. Pri M+F EMM ali M+S+F EMM so sredinske izceje manjše, torej so manjše stopnje izcejanja in manjši odmiki izcejanja od povprečja<sup>7</sup>.

Pri krožno-ločnih kontinuirnih livnih napravah prihaja do usedanja zrn globulitov v žili na zunanjo stran loka naprave. Tako pride do strjevanja, kjer je področje globulitnih zrn v žili premaknjeno k zunanemu radiju loka kontinuirne naprave, od notranjega loka naprave proti sredini žile pa je makrostruktura strjevanja stebričasta. Lahko se zgodi, da področje končnega strjevanja oziroma geometrijska sredina odlitka nima globulitne makrostrukture, še vedno pa se lahko pojavi linijsko izcejanje. Temperature pregretja morajo biti nizke, da dosežemo zelo široko globulitno strjevalno strukturo, ki mora biti razširjena preko geometrijske sredine.

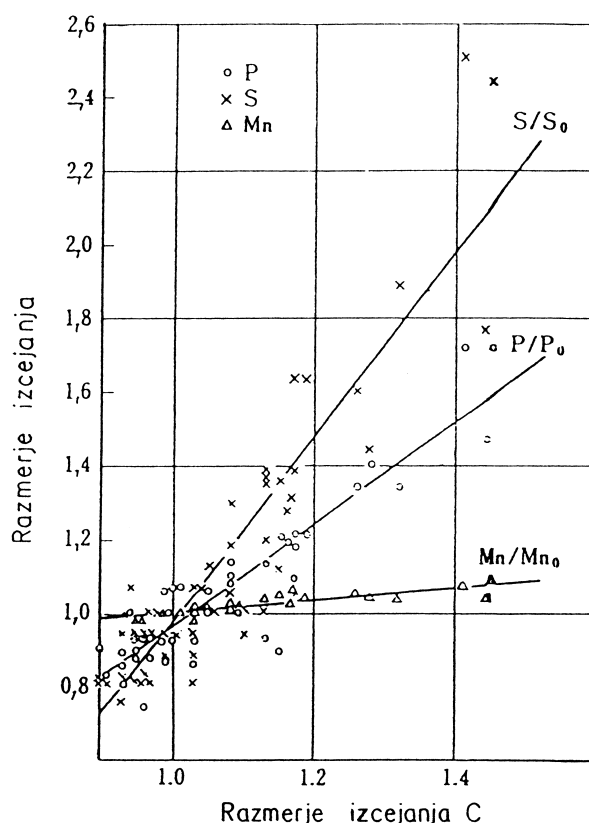
Z elektromagnetnim mešanjem taline jekla (EMM) v območju sekundarnega hlajenja žile pri krožno-ločnih kontinuirnih napravah ustvarimo dodatno možnost za omejitvev sredinskih izcej v gredicah.

Vpliv uporabe EMM na sredinsko izcejanje lahko prikažemo s primerom ulite gredice iz visokoogljčnega jekla (0,73 % C) z oceno izcejanja ogljika, mangana, žvepla in fosforja za nemešano in mešano gredico (**slika 3**). Vzdolž osi mešane gredice je povprečna stopnja izcejanja manjša. Standardni odklik od srednje vrednosti izcejanja je za vse elemente bistveno nižji<sup>8</sup>.

Cilj te raziskave je bil preveriti učinek elektromagnetnega mešanja taline tik pod kokilo na makroizceje v kontinuirno ulitih gredicah iz različnih konstrukcijskih jekel in jekel za toplotno obdelavo.

## 2 EKSPERIMENTALNO DELO

Vpliv elektromagnetnega mešanja smo preiskovali v gredicah prezezo 180 mm × 180 mm iz trožilne naprave za kontinuirno litje v železarni Inexa, Štore.

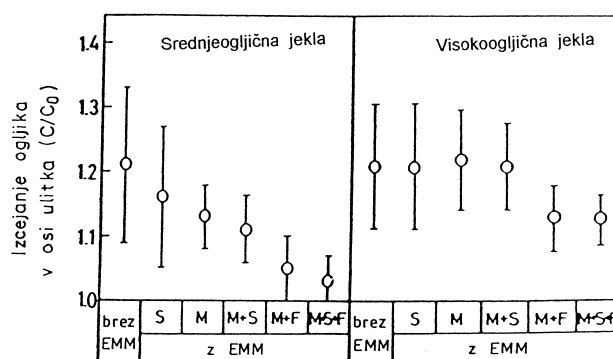


**Slika 1:** Razmerje med izcejanjem C in izcejanjem Mn, P ter S<sup>5</sup> (C/C<sub>0</sub> = vsebnost v osi strjevanja / vsebnost C v jeklu; Mn/Mn<sub>0</sub> = vsebnost Mn v osi strjevanja / vsebnost Mn v jeklu; S/S<sub>0</sub> = vsebnost S v osi strjevanja / vsebnost S v jeklu; P/P<sub>0</sub> = vsebnost P v osi strjevanja / vsebnost P v jeklu)

**Figure 1:** Relation between the segregation of C and the segregation of Mn, P and S<sup>5</sup>

(C/C<sub>0</sub> = composition of C along the central axis / composition of C in steel; Mn/Mn<sub>0</sub> = composition of Mn along the central axis / composition of Mn in steel; S/S<sub>0</sub> = composition of S along the central axis / composition of S in steel; P/P<sub>0</sub> = composition of P along the central axis / composition of P in steel)

Kemijske analize izdelanih talin in parametri ulivanja so v **tabelah 1 in 2**. Pri ulivanju se je uporabljal zaprt sistem. Elektromagnetni mešalniki so vgrajeni tik pod

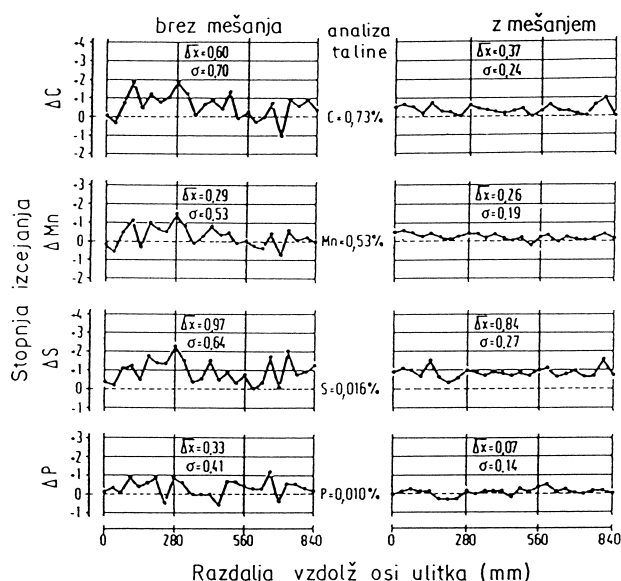


**Slika 2:** Učinek elektromagnetnega mešanja na zmanjšanje sredinskih izcej kontinuirno ulitih gredic<sup>7</sup>

**Figure 2:** Influence of electromagnetic stirring on central segregation in the as-cast billets<sup>7</sup>

**Tabela 1:** Kemijske analize izdelanih talin  
**Table 1:** Chemical composition of the melts

Jeklo	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Al
16MnCr5	0,17	0,24	1,18	0,016	0,024	0,92	0,10	0,03	0,028
ST52-3/1	0,20	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	0,30	0,66	0,010	0,008	0,10	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:** Potek vzdolžnih osnih izcejev nemešane in mešane gredice<sup>8</sup>  
**Figure 3:** Longitudinal segregations in stirred and in a non-stirred billets<sup>8</sup>

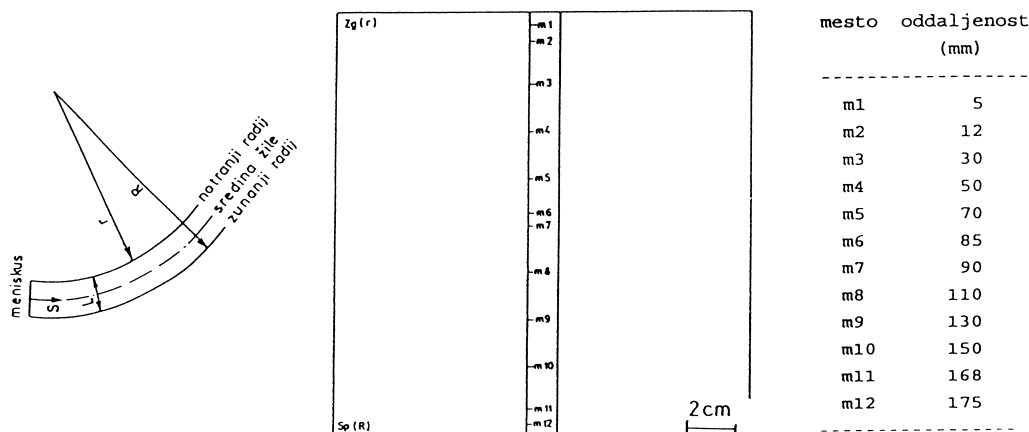
kokilo kontinuirne naprave in povzročajo horizontalno vrtenje taline okrog osi žile. Induktivni elektromagnetni mešalniki so štiripolni, dvofaznega tipa in delujejo z

omrežno frekvenco. Preiskave smo izvršili na prečnih prerezi nemešanih in mešanih gredic, kjer smo s kemijsko analizo na kvantometru ugotavljali koncentracije ogljika, silicija, mangana, fosforja, žvepla, kroma in vanadija po prerezu gredice od notranjega radija proti zunanjemu. Nekaj analiz ogljika in žvepla smo za primerjavo naredili tudi po klasični kemijski analizi.

Na **sliki 4** je prikazan prečni prerez gredice, mesta meritve koncentracije elementov vzdolž prečnega prereza gredice in položaj zgornjega in spodnjega dela odrezanega prereza gredice v žili kontinuirne livne naprave. Mesto zgornjega roba prečnega prereza gredice (Zg) je notranji radij ( $r$ ) ločne livne naprave. Zunanji radij ( $R$ ) ločne kontinuirne livne naprave pa je mesto spodnjega prečnega prereza gredice.

### 3 REZULTATI

Preiskovali smo izcejanje gredic ulitih brez in z uporabo elektromagnetnega mešanja taline tik pod kokilo. Izcejanje posameznih elementov smo izrazili s stopnjo izcejanja, to je z razmerjem med vsebnostjo elementa na različnih mestih po prečnem prerezu gredice in končno sestavo taline jekla. Pri vrednosti koeficienta izcejanja 1 ni izcejanja. Pri vrednostih koeficientov izcejanja pod 1 ali nad 1 govorimo o negativnem oziroma pozitivnem izcejanju. Zniževanje vrednosti koeficienta



**Slika 4:** Mesta določitve koncentracije elementov na prerezu preseka gredice. Položaj glede na radij žile (gredice)  
**Figure 4:** Positions of the analysis points on the billet cross section with reference to the strand

**Tabela 2:** Stopnje izcejanja C, Mn, P in S na prečnem prerezu gredice  
**Table 2:** Segregations index of C, Mn, P and S on the billet cross section

Jeklo	ST52-3		ST52-3		CK45		CK60	
Talina	28364/1 /2		28365/1 /2		28366/1 /2		28374/1 /2	
C/Co p	0,98	1,00	1,06	1,02	1,03	1,02	1,03	1,03
st. dev.	0,03	0,05	0,03	0,09	0,01	0,05	0,01	0,05
Mn/Mno p	1,00	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
st. dev.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02
P/Po p	0,92	0,93	1,04	1,0	1,0	0,95	0,85	0,85
st. dev.	0,07	0,09	0,06	0,09	0,07	0,12	0,13	0,09
S/So p	0,85	0,87	1,0	0,93	0,96	0,84	0,95	0,93
st. dev.	0,09	0,08	0,12	0,17	0,12	0,1	0,17	0,22

1 - nemešano, 2 - mešano, C/Co p - povprečni delež izcejanja C (Mn, P in S), st. dev. - standardna deviacija

**Tabela 3:** Stopnje izcejanja C, Mn, P, S, Cr in V na prečnem prerezu gredice

**Table 3:** Segregation index of C, Mn, P, S, Cr and V on the billet cross section

Jeklo	50CrV4		31CrV3		16MnCr5	
Talina	29503/1 /2		29504/1 /2		29168/1 /2	
C/Co p	1,07	1,06	0,94	0,98	1,00	1,02
st. dev.	0,06	0,03	0,05	0,04	0,10	0,08
Mn/Mno p	1,04	1,02	0,97	0,97	1,05	1,04
st. dev.	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
P/Po p	0,89	0,81	0,89	0,89	0,95	0,95
st. dev.	0,15	0,06	0,05	0,08	0,07	0,10
S/So p	1,24	1,15	0,85	0,94	1,08	1,1
st. dev.	0,24	0,16	0,09	0,06	0,16	0,09
Cr/Cro p	1,03	1,02	1,03	1,03	1,06	1,06
st. dev.	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
V/Vo p	0,84	0,84	0,76	0,76	-	-
st. dev.	0,02	0,05	0,01	0,02	-	-

1 - nemešano, 2 - mešano, C/Co p - povprečni delež izcejanja C (Mn, P, S, Cr in V), st. dev. - standardna deviacija

**Tabela 4:** Stopnje izcejanja C, Mn, P, S, Cr in V v osi strjevanja gredice

**Table 4:** Segregation index of C, Mn, P, S, Cr and V along the longitudinal axis of a billet

Jeklo	Talina	C/Co	Mn/Mno	P/Po	S/So	Cr/Cro	V/Vo
ST52-3	28364/1	0,95	0,99	0,89	0,90	0,98	-
	/2	0,93	0,99	1,00	0,90	0,99	-
ST52-3	28365/1	1,03	1,00	1,12	1,22	1,00	-
	/2	1,00	0,98	1,00	0,89	0,97	-
CK45	28366/1	1,03	0,99	0,9	0,75	0,99	-
	/2	1,01	1,00	1,1	0,87	1,00	-
CK60	28374/1	1,02	0,95	0,69	0,78	0,95	-
	/2	1,02	0,97	0,92	0,88	0,97	-
16MnCr5	29168/1	0,76	1,00	0,81	0,79	1,04	-
	/2	1,13	1,03	0,81	1,25	1,01	-
50CrV4	29503/1	1,26	1,15	1,4	2,0	1,11	0,84
	/2	1,14	1,03	0,84	1,4	1,03	1,02
31CrV3	29504/1	0,83	0,96	0,89	0,71	1,03	0,76
	/2	0,97	0,98	0,96	0,96	1,04	0,78

1 - nemešano, 2 - mešano, C/Co - povprečni delež izcejanja C (Mn, P, S, Cr in V, (C/Co = vsebnost C v osi strjevanja / končna vsebnost C v jeklu)

pri pozitivnem izcejanju in zviševanje vrednosti koeficienta pri negativnem izcejanju proti vrednosti 1, pomeni v obeh primerih zmanjšanje izceje. Na to je potrebno biti pozoren pri ocenjevanju izcejanja, ki je opisano v nadaljevanju. Izcejanje ogljika, mangana, fosforja, žvepla ter kroma in vanadija na prečnem prerezu nemešane in mešane gredice je prikazano v **tabelah 2 in 3**; vrednost stopnje izcejanje v osi strjevanja prečnega prereza gredic pa v **tabeli 4**.

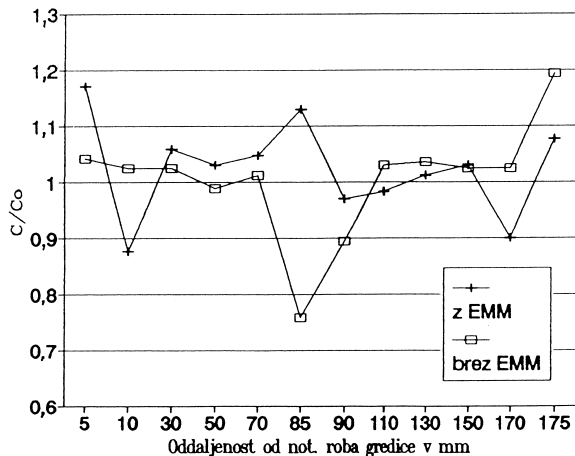
Izcejanje ogljika po prerezu gredice z elektromagnetnim mešanjem taline se zmanjša pri talini 28364 (jeklo ST52-3) s temperaturo litja 1540 °C z 0,98 na 1,00 in pri talini 28365 iste vrste jekla s temperaturo litja 1553 °C, z 1,06 na 1,02. Povprečno izcejanje žvepla pri mešani gredici je manjše samo pri talini 28364 in se zmanjša z 0,85 na 0,87. Izcejanje fosforja pri tej šarži pa se zmanjša z 0,92 na 0,93 pri mešani gredici, pri talini 28365 pa z 1,04 pri nemešani gredici na 1,00 pri mešani gredici.

Pri talini 28366 (CK45) se zmanjša samo povprečno izcejanje ogljika z 1,03 na 1,02 pri mešanju. Pri talini 28374 (CK60) izcejanje ogljika ostane enako tudi pri mešani gredici. Pri talini 29503 (50CrV4) se povprečno izcejanje pri mešani gredici zmanjša z 1,07 na 1,06. Izcejanje žvepla se zmanjša zaradi mešanja z 1,24 na 1,15, mangana pa z 1,04 na 1,02. Pri talini 29504 (31CrV3) se zmanjša izcejanje ogljika pri mešani gredici z 0,94 na 0,98, izcejanje žvepla pa z 0,85 na 0,94. Razlik v izcejanju kroma in vanadija med nemešano in mešano gredico pri zadnjih dveh jeklih ni opaziti. Pri talini 29168 (16MnCr5) je povprečna stopnja izcejanja ogljika po prečnem prerezu nemešane gredice 1,00, pri mešani gredici pa 1,02, izcejanja žvepla pri nemešani gredici je 1,16, pri mešani gredici pa 1,26.

Makroizceje v osi strjevanja gredice so manjše pri mešanih gredicah. Stopnja izcejanja ogljika pri mešani gredici taline 28365 se zmanjša z 1,03 na 1,00, pri talini 28366 pa se pri negativnem izcejanju stopnja izcejanja poveča z 0,99 na 1,00, in izcejanja ni. Prav tako se zmanjša izcejanje žvepla s tem ko se stopnja izcejanja poveča z 0,75 na 0,87. Izcejanje ogljika v osi gredice taline 28374 je enako pri nemešani in mešani gredici. Pri talini 29503 se zmanjša stopnja izcejanja ogljika z 1,26 na 1,14 pri mešani gredici, stopnja izcejanja mangana z 1,15 na 1,03, žvepla z 2,0 na 1,4, kroma z 1,11 na 1,03, vanadija pa se zmanjša z 0,84 na 1,02. Pri gredicah šarže 29504 se z elektromagnetnim mešanjem taline pri ulivnju zmanjša stopnja izcejanja ogljika v osi strjevanja z 0,83 na 0,97, pri manganu z 0,96 na 0,98, pri fosforju z 0,89 na 0,96 ter koeficient izcejanja žvepla z 0,71 na 0,96 in s tem zmanjša izcejanje. Na izcejanje kroma in vanadija mešanje ne vpliva.

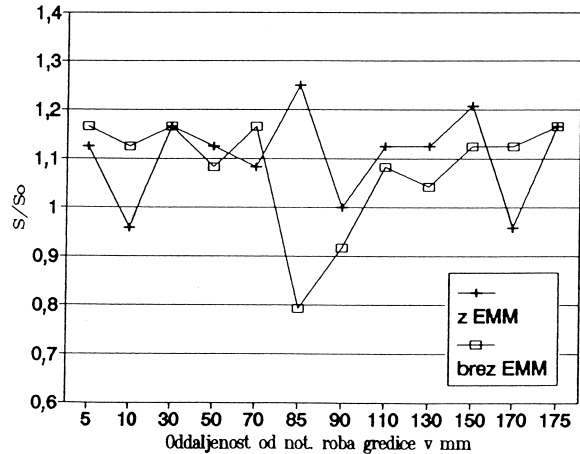
#### 4 DISKUSIJA

Izcejanje je manjše, če so stopnje izcejanja bližje vrednosti 1. Rezultati v **tabeli 2** večinoma ne kažejo



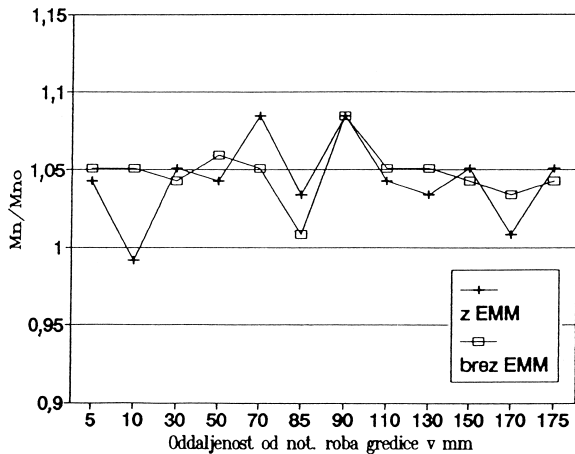
Slika 5: Stopnja izcejanja C na prečnem prerezu gredice, talina 29168 - jeklo 16MnCr5

Figure 5: Segregation index for C on the billet cross section, cast nr. 29168 - steel 16MnCr5



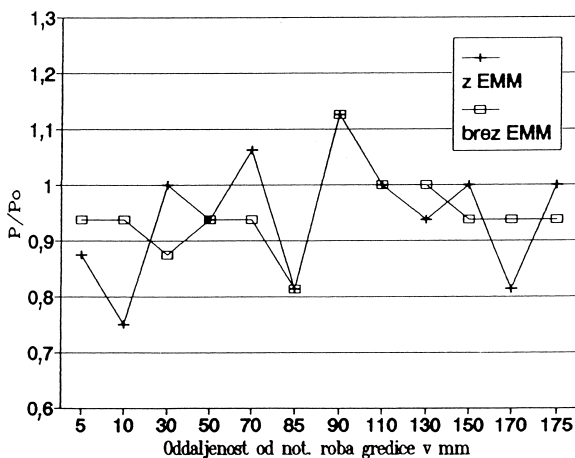
Slika 8: Stopnja izcejanja S na prečnem prerezu gredice, talina 29168 - jeklo 16MnCr5

Figure 8: Segregation index for S on the billet cross section, cast nr. 29168-steel 16MnCr5



Slika 6: Stopnja izcejanja Mn na prečnem prerezu gredice, talina 29168 - jeklo 16MnCr5

Figure 6: Segregation index for Mn on the billet cross section, cast nr. 29168 - steel 16MnCr5



Slika 7: Stopnja izcejanja P po prečnem prerezu gredice, talina 29168 - jeklo 16MnCr5

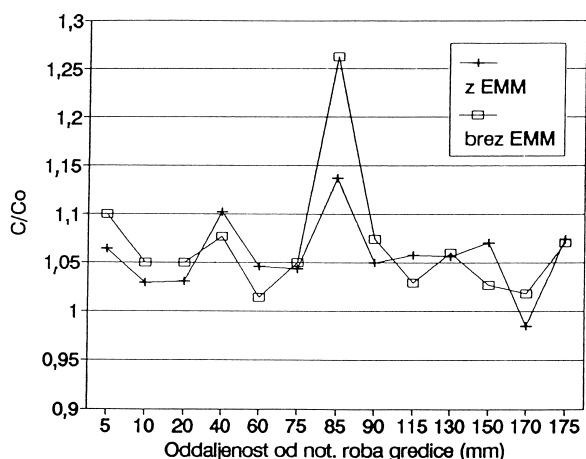
Figure 7: Segregation index for P on the billet cross section, cast nr. 29168 - steel 16MnCr5

zmanjšanja izcejanja na prerezu pri gredicah, ki so bile ulite z mešanjem taline pod kokilo. V tabeli 3 pa se kaže pozitiven vpliv mešanja predvsem pri talinah 29503 in 29504 iz jekel 50CrV4 in 31CrV3, kjer so stopnje izcejanja v tabeli 3 pri mešanih talinah bližje vrednosti 1. Standardni odklik in stopnja variacije izcejanja preko prereza sta manjša pri gredicah ulitih z elektromagnetnim mešanjem taline. Vzrok, da pri nekaterih talinah ni opaziti znatnega učinka mešanja, je lahko v pre-majhnem številu izmerjenih mest po prerezu gredice ali napačno izbrana analizna mesta. Lahko je tudi stopnja izcejanja manjša od relativne napake pri določevanju koncentracije elementov na kvantometru, ki smo ga uporabili, ker je bilo število meritev veliko. Problem je tudi v tem, da analiza zajame relativno veliko površino ( $d = 7$  mm), zato meritev ni dovolj selektivna, ker so lahko manjše komponente makrostrukture gredice. Zato je rezultat povprečna koncentracija relativno velike površine, v kateri so različne komponente makrostrukture.

V osi gredice pričakujemo največje makroizcejanje in pozitiven vpliv mešanja na zmanjšanje izcej elementov, ki najbolj izcejajo: žveplo, fosfor in ogljik, kot prikazuje tabela 4. Mangan, krom in vanadij izcejajo manj. Pri gredicah ulitih z elektromagnetnim mešanjem taline tik pod kokilo je osno izcejanje manjše.

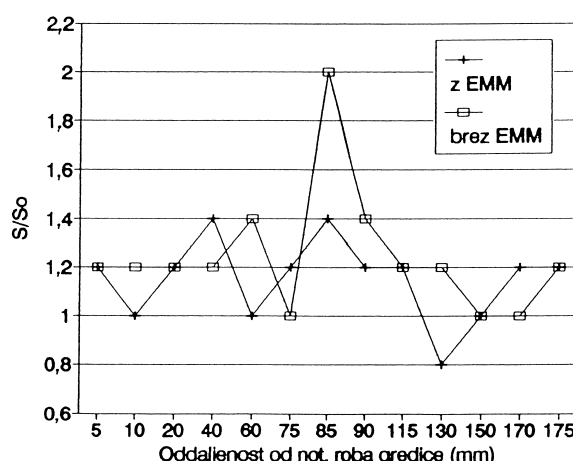
Slike 5, 6, 7 in 8 prikazujejo izcejanje ogljika, mangana, fosforja, žvepla preko prereza gredice za talino 29168 (jeklo 16MnCr5).

Na sliki 5, ki prikazuje izcejanje ogljika na prečnem prerezu nemešane in mešane gredice, vidimo v sredini nemešane gredice močno negativno izcejanje. Pri mešani gredici je viden 10 mm od vsake strani roba gredice pas negativnih izcej, v osi strjevanja oziroma v sredini gredice pa je pozitivno izcejanje. Negativno izcejanje ogljika v sredini nemešane gredice je znak V-izceje na mestu meritve. Negativno izcejanje ogljika okrog 10 mm od vsake strani roba mešane gredice pa je posledica



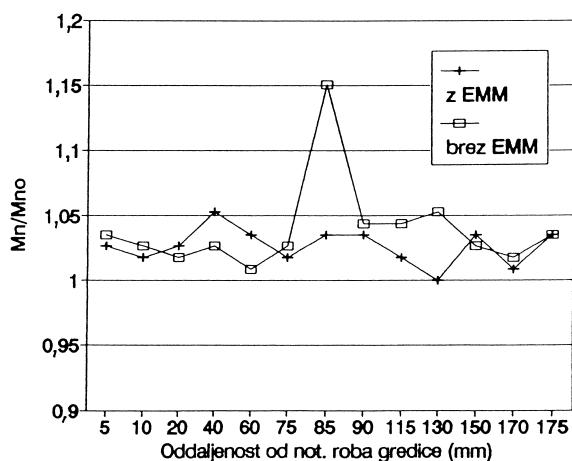
Slika 9: Stopnja izcejanja C na prečnem prerezu gredice, talina 29503 - jeklo 50CrV4

Figure 9: Segregation index for C on the billet cross section, cast nr. 29503-steel 50CrV4



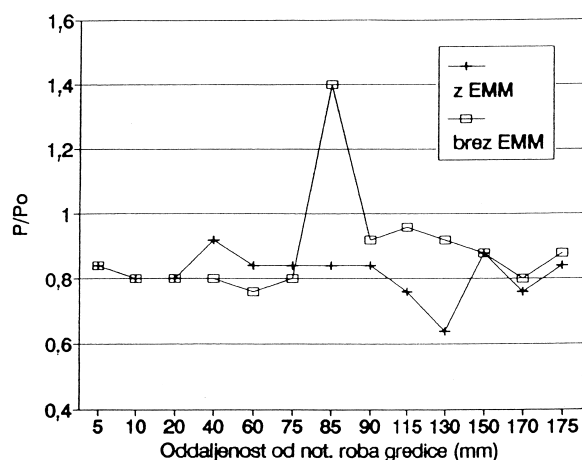
Slika 12: Stopnja izcejanja S na prečnem prerezu gredice, talina 29503 - jeklo 50CrV4

Figure 12: Segregation index for S on the billet cross section, cast nr. 29503-steel 50CrV4



Slika 10: Stopnja izcejanja Mn na prečnem prerezu gredice, talina 29503 - jeklo 50CrV4

Figure 10: Segregation index for Mn on the billet cross section, cast nr. 29503 - steel 50CrV4



Slika 11: Stopnja izcejanja P na prečnem prerezu gredice, talina 29503 - jeklo 50CrV4

Figure 11: Segregation index for P on the billet cross section, cast nr. 29503 - steel 50CrV4

nastanka belega pasu na mestu mešanja taline v območju sekundarnega hlajenja žile. To je v tem primeru tik pod kokilo, kjer ima strjena srajčka že debelino okrog 10 mm. Vsekakor je pozitivno izcejanje v sredini mešane gredice manjše kot sredinsko negativno izcejanje ogljika pri nemešani gredici. Potek izcejanja mangana in fosforja na slikah 6 in 7 je podoben, le izceje fosforja so večje. Izcejanje žvepla je prikazano na sliki 8 in je podobno izcejanju ogljika, le da je izcejanje žvepla v sredini gredice nekoliko večje. Pri mešani gredici je osno pozitivno izcejanje manjše kot negativno izcejanje v osi strjevanja nemešane gredice. Stopnja izcejanja nad nivojem vrednosti 1 ali pod njim so posledice različne vsebnosti elementa po prerezu gredice.

Izcejanje ogljika, mangana, fosforja in žvepla po prečnem prerezu gredice taline jekla 29503 (50CrV4) je prikazano na slikah 9, 10, 11 in 12. Razporeditev ogljika po prerezu mešane gredice kaže enakomerno od obeh strani roba negativno izcejanje v območju belega pasu, oz. na mestu mešanja elektromagnetnega mešala. V sredini nemešane gredice je veliko pozitivno izcejanje, pri mešani gredici pa je stopnja izcejanja v sredini gredice precej manjša. Podobne razlike med izcejanjem v sredini nemešane in mešane gredice opazimo tudi pri manganu, fosforju in žveplu. Mangan in fosfor v sredini nemešane gredice pozitivno izcejata, pri gredici, uliti z elektromagnetnim mešanjem taline, pa izcejanja v sredini ni več. Žveplo najmočnejše izceja v sredini nemešane gredice. Stopnja izcejanja žvepla na tem mestu je znatno manjša pri mešani gredici. Intenzivnost izcejanja se zmanjšuje od žvepla in fosforja, preko ogljika do mangana. Krom in vanadij ne kažeta izrazitega izcejanja. Kot pri talini 29168 je tudi tu opaziti podobno izcejanje C in S. Pri mešanih gredicah pride do negativnega izcejanja elementov na mestu mešanja taline.

## 5 SKLEPI

Analizirali smo vpliv elektromagnetnega mešanja taline na izcejanje ogljika, mangana, fosforja, žvepla, kroma in vanadija v kvadratni gredici 180 mm × 180 mm. Mešalo je bilo nameščeno tik pod kokilo. Največje makroizceje nastanejo ob koncu strjevanja taline v sredini gredice zaradi razlike v topnosti sestavnih elementov v talini in v strjenem jeklu.

Stopnje izcejanja na prečnem prerezu gredic so pokazale, da se pri gredicah ulitih z elektromagnetnim mešanjem taline, povprečno izcejanje pri večini mešanih gredic ne zmanjša. Standardni odmik izcejanja preko prereza gredice je sicer manjši pri mešanih gredicah, kar kaže na večjo homogenost v kemijski sestavi jekla na prečnem preseku gredice, vendar so dejanske razlike v sestavi znotraj intervala sestave, ki ga predpisuje standard za preiskovano jeklo.

Strjevalna struktura je bolj homogena pri gredicah, ki so bile kontinuirno ulite z elektromagnetnim mešanjem taline. Delež globulitne sredinske cone je večji, vendar so stebričasta in globulitna zrna še vedno velika. Stebričasta zrna kljub mešanju rastejo še od mesta mešanja proti sredini gredice, dokler se talina toliko ne podhladi, da se začno tvoriti enakoosna zrna.

Makroizcejanje je največje v osi strjevanja lite gredice. Mešanje taline pri kontinuirnem ulivanju zmanjša osno izcejanje. V svetlejšem pasu je izcejanje negativno. Izcejanje ogljika in žvepla je podobno, izcejanje žvepla pa je največje.

Pri merjenju vsebnosti elementov z kvantometrom je zaradi velikega vzbujevanega merilnega področja

kvantometra težje registrirati lokalne spremembe koncentracije, ki so posledica dendritskih izcej. Intenzivnost in stopnja izcejanja sta odvisna tudi od vsebnosti elementa v jeklu.

Končni sklep je, da pri kontinuirnem ulivanju gredic 180 mm × 180 mm elektromagnetno mešanje taline tik pod kokilo povečuje homogenost jekla, predvsem pa se zmanjšajo izceje v osi strjevanja gredice.

## 6 LITERATURA

- <sup>1</sup> L. Huang, K. Schwerdtfeger: Laborveruche zur Entstehung der Makroseggregation beim Knüppelstangguss, Stahl und Eisen, 101 (1981), 47-51
- <sup>2</sup> R. Aberny, J. P. Birat, J.Chone: Interet metallurgique du brassage electromagnetique en coulee continue de produits longs, Revue de Metallurgie-CIT, (1982) 11, 901-916
- <sup>3</sup> H. Mori et al.: Macrostructure and segregation in continuously cast carbon steel billets, Trans. ISIJ, 12 (1972) 2, 102-111
- <sup>4</sup> J. J. Moore: Review of axial segregation in continuously cast steel, Iron and Steelmaker, 10 (1980), 11-20
- <sup>5</sup> H. Iwata et al.: Electromagnetic stirring of molten core in continuous casting of high carbon steel, Trans. ISIJ, 16 (1976) 7, 374-381
- <sup>6</sup> M. Dubke: Electromagnetisches Rühren beim Stranggiessen, Metallurgie des Stranggiessens- Giesen und Erstarren von Stahl, Stahl Eisen, Düsseldorf, 1992, 449-531
- <sup>7</sup> K. Ayata et al.: Improvement of macrosegregation in continuously cast bloom and billet by electromagnetic stirring, Trans. ISIJ, 24 (1984), 931-939
- <sup>8</sup> R. Jauch et al.: Electromagnetisches Rühren in sekundärkühlbereich von Vorblock and Knüppelstranggiessanlagen, Stahl und Eisen 104 (1984), 9, 429-434

