

LASTNOSTI IN MIKROSTRUKTURA AVSTENITNIH NERJAVNIH JEKLENIH PESKOV

PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF THE AUSTENITIC STAINLESS STEEL SHOT

Tonica Bončina, Franc Zupanič, Ivan Anžel, Alojz Križman

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1999-12-07; sprejem za objavo - accepted for publication: 1999-12-20

V naši raziskavi smo primerjali lastnosti in mikrostrukturo dveh vrst litih avstenitnih nerjavnih jeklenih peskov. Jekleni peski A so bili izdelani z nizkotlačno asimetrično vodno atomizacijo v odprti komori, peski B pa s plinsko atomizacijo. Primerjava napak in obrabne obstojnosti med peski A in B je pokazala, da imajo peski B manjši delež votlosti, večji delež okroglosti in boljše obrabno obstojnost. Peski A so prevlečeni z debelo oksidno plastjo, ki nastane zaradi reakcije delcev s kisikom ali vodno paro med sferoidizacijo ali po njej. To je tudi vzrok za velik delež peskov nepravilne oblike in votlosti pri peskih A. Čeprav imajo peski A in B koncentracijo zlitinskih elementov v predpisanih mejah, pa se mikrostrukturi razlikujeta. Manjši delež C, Mn in Ni v peskih A vpliva, da se v mikrostrukturi poleg avstenita pojavlja še delta ferit, medtem ko imajo peski B popolno avstenitno mikrostrukturo.

Ustrezno kvaliteto avstenitnih nerjavnih jeklenih peskov se lahko doseže:

- če poteka atomizacija v razmerah, pri katerih na površini delcev ne nastaja trdna oksidna plast
- če je kemijska sestava nerjavnega jekla taka, da je mikrostruktura po atomizaciji v celoti avstenitna (dovolj visoka koncentracija C, Mn in Ni pri dani koncentraciji Cr).

Ključne besede: avstenitni nerjavni jekleni peski, mikrostruktura, oksidna plast, atomizacija

This paper deals with the properties and the microstructures of two cast austenitic stainless steel shots. The stainless steel shot A was made by asymmetric water atomisation in an open chamber and shot B by gas atomisation in an inert atmosphere. The shot B possesses a smaller fraction of voids, a larger fraction of spherical shot and superior wear resistance. At the shot A the reaction of the particles with oxygen and water vapour during the atomisation caused the formation of a thick oxide layer on the surface of the particles and voids. The oxide layer is one of the main reasons for the irregular shape of the particles and voids in the shot A. Despite the chemical compositions of both shots being similar and fulfilling the adequate specifications, their microstructures differ considerably. The microstructure of the shot B is fully austenitic, but the microstructure of the shot A consists of austenite and delta ferrite because of the smaller content of the gamma forming elements (C, Mn and Ni).

The results of the investigation suggest that a better quality of austenitic stainless steel shot can be obtained by:

- Melt atomisation without the presence of oxygen and water vapour to prevent the formation of a thick oxide layer on the particles.
- Convenient selection of the chemical composition in order to obtain fully austenitic microstructure.

Key words: austenitic stainless steel shot, microstructure, oxide layer, atomisation

1 UVOD

Povpraševanje po nerjavnih jeklenih granulatih se je v zadnjem obdobju izrazito povečalo. Avstenitni nerjavni jekleni peski so praviloma nemagnetni in se v primerjavi z visokoogljčnimi jeklenimi odlikujejo z mnogo večjo obrabno obstojnostjo ter krajšim časom obdelave površine izdelkov. Le-ta dobi bleščeč kovinski sijaj¹. Poleg tega na površini izdelkov ni ostankov abrazivnega sredstva, ki lahko povzroči lokalno korozijo². Avstenitne nerjavne jeklene peske uporabljajo za čiščenje, obrezovanje in izboljšanje površine zahtevnejših kovinskih materialov, (ulitki iz aluminijevih, cinkovih, magnezijevih, nikljevih zlitin), kot tudi za končno obdelavo površin izdelkov iz nekovinskih materialov^{1,2}.

Proizvajalci ponujajo različne vrste nerjavnih peskov, ki so izdelani po različnih postopkih. Njihove lastnosti se praviloma precej razlikujejo. V našem prispevku primerjamo značilne lastnosti avstenitnih nerjavnih peskov

dveh proizvajalcev. Prav tako podajamo rezultate metalografske analize, s katero pojasnimo razlike lastnosti obeh peskov.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

V tej raziskavi smo analizirali jeklene peske dveh proizvajalcev. Pri proizvajalcu A (označba vrste peska A) poteka atomizacija z asimetrično nizkotlačno vodno atomizacijo v odprti komori, v podobnih razmerah kot razpršujejo tudi visokoogljčne jeklene peske^{4,5}. Peske proizvajalca B (vrste peska B) izdelujejo s plinsko atomizacijo, vendar natančnejših podatkov o tehnologiji izdelave nimamo. Podrobneje smo analizirali granulacijo, ki vsebuje delce premera med 0,125 in 0,6 mm. Ta granulacija je tudi tržno najpomembnejša. Določili smo kemično sestavo, velikostno porazdelitev delcev, trdoto, obrabno obstojnost, delež makronapak in mikrostrukturo.

Makroskopske napake smo kvantitativno analizirali skladno s standardom SAE J 827⁶, ki je sicer namenjen za visokoogljčne jeklene peske, vendar ga je mogoče smiselno uporabiti tudi za opredelitev napak v nerjavnih jeklenih peskih. Za analizo smo spolirane vzorce, ki vsebujejo po 100 delcev, opazovali s svetlobnim mikroskopom in določili delež posameznih vrst napak. Delež posameznih makronapak je podan v odstotkih in pomeni število delcev med stotimi, v katerih velikost napake presega kritično vrednost. Tako smo določili delež votlosti, strjevalne poroznosti in razpok ter delež delcev z nepravilno obliko.

Obrabna obstojnost je bila določena z Ervinovim preskusom⁷. To je tehnološki preskus, pri katerem se simulirajo razmere pri peskanju in je najpomembnejše kakovostno merilo.

Za natančnejšo metalografsko analizo smo vzorce brusili do povprečne polovice premera zrna, polirali in jedkali z raztopino: 10 ml glicerola, 10 ml HCl, 5 ml HNO₃, 5 ml 3% H₂O₂. Za analizo makro- in mikrostruktur smo uporabili svetlobno in elektronsko vrstično mikroskopijo ter EDS-analizator.

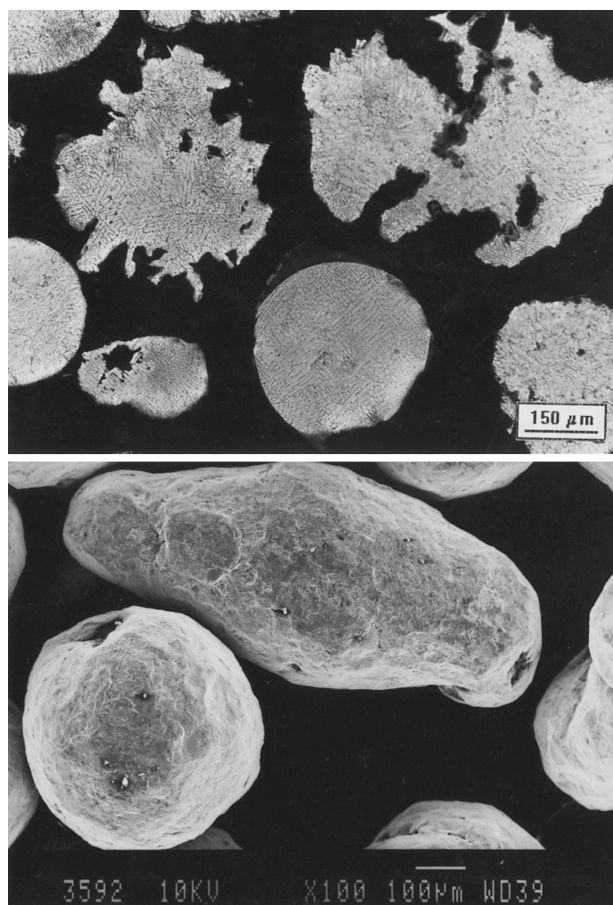
3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Lastnosti avstenitnih nerjavnih peskov

Kemični sestavi obeh zlitin smo določili s spektralno analizo. Podani sta v **tabeli 1**. V vzorcu B je nekoliko več niklja, ogljika in mangana. V obeh primerih je koncentracija zlitinskih elementov v mejah, ki jih podajata proizvajalca^{2,3}.

Kemijska sestava, trdota, fizikalne napake in vrsta mikrostrukture so pomembni dejavniki, ki vplivajo na obrabno obstojnost peskov^{4,7}. **Tabela 2** podaja primerjavo okroglosti, trdote in obrabne obstojnosti peskov A in B. Razlika med trdoto peskov A in B je 60 HV (A ima za 27% večjo trdoto) in obrabno obstojnostjo 1552 ciklov (B ima za 40% večjo obrabno obstojnost).

Nerjavni jekleni peski A imajo bistveno slabšo okroglost in tudi številne močno nepravilne delce z mnogo izjedami, ki segajo globoko v notranjost (**slika 1**). Poleg tega so v tem pesku pretežno delci bolj grobih frakcij, medtem ko je v vzorcu B večji delež finih frakcij (**slika 2**). Votlost, strjevalna poroznost in razpoke se določajo po standardu SAE s svetlobnim mikroskopom pri 50-kratni povečavi. Primerjava med deležem napak v peskih A in B je podana v **tabeli 3**. Rezultati kažejo, da je v peskih A zelo velik delež votlosti in majhen delež okroglosti. Votlost se šteje kot napaka, kadar površina votlinice v prerezu presega 10% celotnega prereza zrna in ima gladko površino. Votlost nastane ob izločanju plinov, raztopljenih v talini med ohlajevanjem in strjevanjem zlitine. S preiskavo pri večjih povečavah s svetlobnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom smo ugotovili, da votlinice v vzorcu A nimajo gladke notranje površine, ampak so le-te hrapave in prevlečene



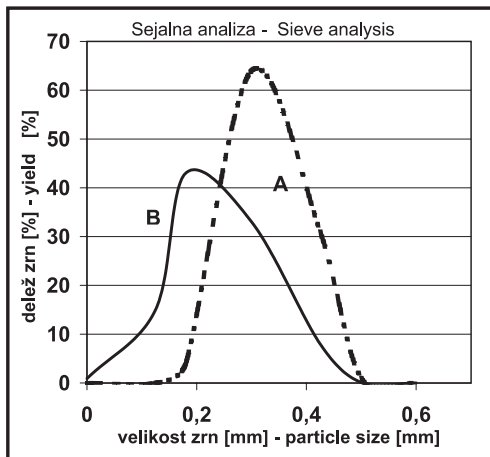
Slika 1: Nepravilno oblikovani delci peska A

Figure 1: Particles of Irregular shape of the shot A

z oksidno plastjo. Tudi zunanja površina nekaterih zrn peska je obdana z debelo oksidno plastjo velikosti do 30 µm (**slika 3**). Iz tega sklepamo, da je temeljni vzrok za nastanek "votlosti" oksidacija kapljic taline in tvorba trdne oksidne plasti. Ker se oksidna plast pojavlja tudi na zunanjih površinah, lahko rečemo, da se nekateri delci oksidirajo med sferoidizacijo in jo tako ovirajo oz. preprečijo (delci nepravilnih oblik), nekateri pa po tem procesu (okrogli delci z oksidno plastjo).

Oksidno plast smo analizirali z EDS-metodo in ugotovili, da v sestavi prevladuje SiO₂, katerega prosta tvorbeno energija je najbolj negativna med oksidi vseh navzočih elementov (**slika 4a**), ponekod pa se v oksidni plasti pojavlja tudi Cr-oksidi (**slika 4b**). Nasprotno, na delcih vzorca B ni debele oksidne plasti, hkrati ima ta vzorec večji delež okroglosti in manjši delež votlosti.

Na podlagi ugotovitev lahko sklepamo, da je vzrok za votlost in nepravilno obliko delcev predvsem oksidacija med atomizacijo, ko se delec strjuje. Pri vodni atomizaciji lahko nastane oksidna plast, ko kapljica taline reagira z vodo ali z vodno paro. Pri plinski atomizaciji brez dostopa kisika in vode, kjer bi se izognili vodnemu mediju in s tem oksidni plasti, lahko



Slika 2: Graf sejnalne analize peskov A in B
Figure 2: The sieve analysis of the shot A and B

pričakujemo bolj okrogle delce peska brez debelejšje oksidne plasti.

Strjevalna poroznost in razpoke so v nekaterih delcih v peskih A in B, vendar v večini primerov ne presegajo kritične vrednosti.

Tabela 1: Kemična sestava litih avstenitnih nerjavnih jeklenih peskov v mas. %

Table 1: Chemical composition of the cast austenitic stainless steel shot in mass. %

Element	Cr	Ni	Si	Mn	Al	C	P	S
Vzorec A	17,6	7,8	1,9	1,1	0,1	0,17	0,012	0,011
Vzorec B	17,3	9,4	1,9	1,5	0,1	0,24	0,012	0,015

Tabela 2: Primerjava okroglosti, trdote, obrabne obstojnosti peskov vzorca A in B

Table 2: Comparison of the spheroidity, hardness and wear resistance shot A and B

Lastnost	Okroglost %	Trdota HV 1	Obrabna obstojnost cikli
Vzorec A	54	280	3942
Vzorec B	80	220	5494

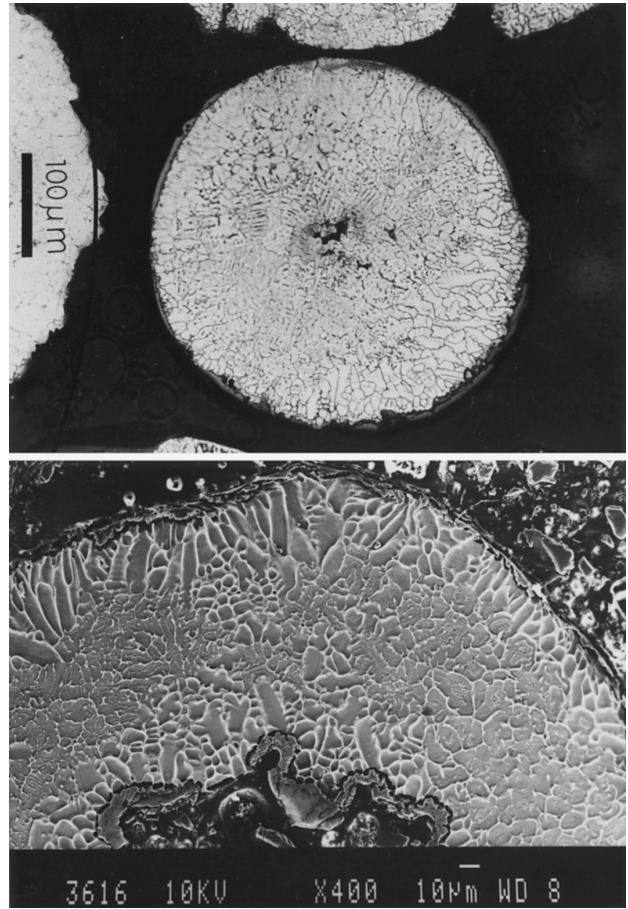
Tabela 3: Primerjava števila napak: votlosti, strjevalne poroznosti in razpok

Table 3: Comparison of the Physical defect: voids, shrinkage and cracks

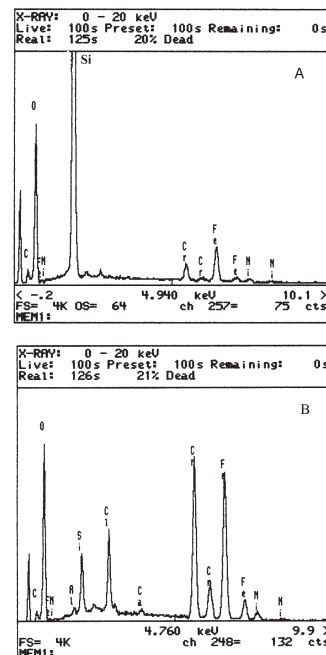
Lastnost	Votlost	Strjevalna poroznost	Razpoke
Vzorec A	20	2	0
Vzorec B	2	2	0

3.2 Mikrostruktura avstenitnih nerjavnih peskov

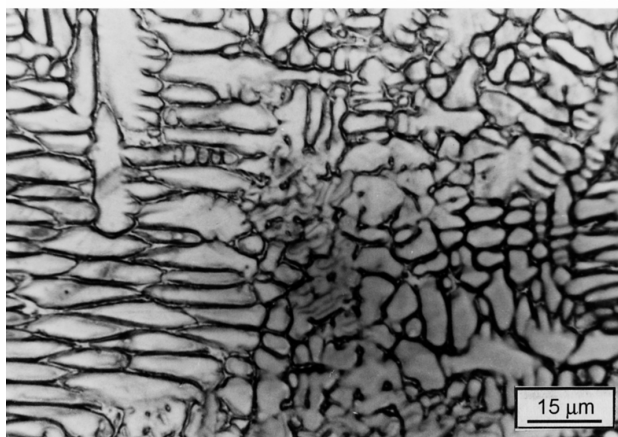
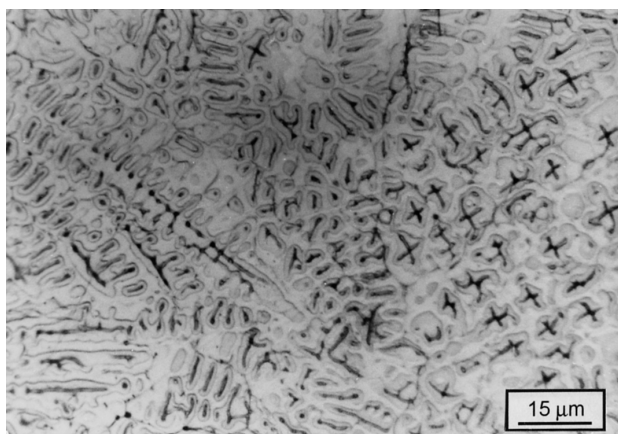
Z metalografsko analizo smo ugotovili, da je mikrostruktura vzorca A iz dendritov avstenita in delta ferita (skeletasti ferit), ki je ostanek nepopolne peritekt-



Slika 3: Oksidna plast na zunanji površini in v votlinici delca A
Figure 3: Oxide layer on the surface of the particles and voids in the shot A



Slika 4: EDS spekter oksidne plasti na peskih A
Figure 4: EDS spectrum of the oxide layer on the shot A

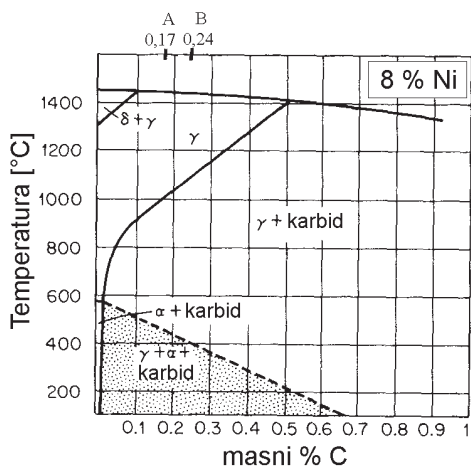


Slika 5: Mikrostruktura: a) avstenitni nerjavni peski A (delta ferit in avstenit), b) avstenitni nerjavni peski B (avstenit)

Figure 5: Microstructure: a) The austenitic stainless steel shot A (delta ferrite and austenite), b) The austenitic stainless steel shot B (austenite)

tične reakcije (slika 5a), mikrostruktura vzorca B pa je iz dendritov avstenita (slika 5b).

Glede na kemično sestavo obeh vzorcev (tabela 1) in fazni diagram pri vsebnosti 18% Cr in 8% Ni⁸ (slika 6)



Slika 6: Fazni diagram nerjavnih jekel, ki vsebujejo 18% Cr in 8% Ni⁸

Figure 6: Phase diagram of 18% Cr stainless steel containing 8% Ni⁸

bi pričakovali, da se prične strjevanje pri obeh vzorcih s primarno kristalizacijo avstenita in ne delta ferita. Vendar, če upoštevamo Schneiderjevo modifikacijo Schaefflerjevega diagrama⁹, pri katerem izračunamo Cr-in Ni-ekvivalent po enačbah:

$$Ni_{ekvivalent} = \% Ni + \% Co + 0,5 \% Mn + 30 \% C \quad (1)$$

$$Cr_{ekvivalent} = \% Cr + 2 \% Si + 1,5 \% Mn + 5 \% V \quad (2)$$

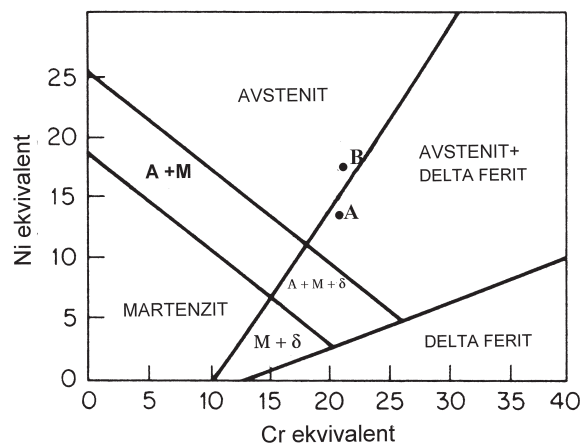
ugotovimo, da je vzorec A v področju avstenita in delta ferita, vzorec B pa v področju čistega avstenita (slika 6). Z uporabo Post-ove in Eberly-jeve enačbe¹⁰:

$$\%Ni = \frac{\%Cr + \%1,5Mo - 20}{12} - \frac{\%M}{2} - 35\%C + 15 \quad (3)$$

ugotovimo, da je pri danih koncentracijah zlitinskih elementov potrebna koncentracija Ni, da dosežemo popolno avstenitno mikrostrukturo v peskih A enaka, 9%, v peskih B pa 6,5%. To se sklada z mikrostrukturno analizo in položajem zlitin v Schneiderjevem diagramu (slika 7). Pri dani koncentraciji Cr (alfagenih elementov), z večanjem koncentracije C, Mn in drugih gamagenih elementov povečamo možnost primarne kristalizacije avstenita, hkrati pa potrebujemo nižjo koncentracijo Ni, da dobimo popolno avstenitno lito mikrostrukturo pri sobni temperaturi. Ker je delta ferit magneten, lahko izmerimo njegov delež v mikrostrukturi¹¹. V vzorcu A je delež delta ferita v mejah od 0,25 do 1,7%. V vzorcu B pa se pojavlja samo v nekaterih zrnih peska in še to pod 0,05%.

Posamezna zrna peska v vzorcu A se zelo razlikujejo po obliki dendritov. V nekaterih rastejo dendriti avstenita usmerjeno s površine delca proti notranjosti. Veliko zrn peska pa ima pretežno globularno ali enakoosno mikrostrukturo. Zrna peska v vzorcu B so si podobna. Avstenit ima deloma celično deloma dendritno morfologijo. V notranjosti jeklenih zrn se morfologija spremeni v dendritno oz. pojavijo se dendritne celice, zaradi zmanjšane hitrosti rasti.

V vzorcu A smo opazili bolj izrazito izcejanje zlitinskih elementov: Cr, Ni, in Si. Ker je porazdelitveni



Slika 7: Položaj peskov A in B v Schneiderjevem diagramu⁹

Figure 7: Position of the shots A and B in the Schneider's diagram⁹

koeficient teh elementov manjši od ena, se njihova koncentracija povečuje od središča dendritov proti meddendritnem prostoru. Razlog za izrazitejšo izcejanje v vzorcu A je tudi prisotnost delta ferita. Z kvantitativno EDS-analizo smo ugotovili stopnjo izcejanja v obeh vzorcih (**tabela 4**).

Tabela 4: Razlika v koncentracijah zlitinskih elementov v središču dendritov in v meddendritnem prostoru v mas. %

Table 4: Difference between concentration alloying elements in the centre of dendrites and in the interdendritic region in mass. %

	VZOREC A		VZOREC B	
	v središču dendritov	v meddendritnem prostoru	v središču dendritov	v meddendritnem prostoru
Cr	16-15,5	24-22,5	16-17	22
Ni	6,5-7,3	7,8-7,3	8	9
Si	1,8	3,5-5,5	2-3,5	4-6,5

4 SKLEPI

V naši raziskavi smo primerjali lastnosti in mikrostrukturo dveh vrst litih avstenitnih nerjavnih jeklenih peskov. Jekleni peski A so bili izdelani z nizekotlačno asimetrično vodno atomizacijo v odprti komori, peski B pa s plinsko atomizacijo.

Pri primerjavi fizikalnih napak (votlost, strjevalna poroznost in razpoke), okroglosti in obrabne obstojnosti imajo peski vzorca B manjši delež votlosti, večji delež okroglosti in boljše obrabno obstojnost.

Z metalografsko analizo posameznih jeklenih zrn smo ugotovili, da se na nepravilnih delcih in na notranjih površinah votlin pojavlja debela oksidna plast. Vzroka za nastanek toge oksidne plasti (sestavljena je pretežno iz SiO₂ in Cr₂O₃) sta reakcija najreaktivnejših elementov (Si in Cr) z zračnim kisikom in vodno paro.

Čeprav sta kemični sestavi vzorcev A in B v predpisanih mejah, pa ima manjša koncentracija elementov Ni, C in Mn v vzorcu A in kinetika peritektične reakcije velik vpliv na mikrostrukturo. Mikrostruktura peskov vzorca A je sestavljena pretežno iz dendritov avstenita in delta ferita. Mikrostruktura vzorca B pa iz dendritov avstenita. Manjše razdalje med debli in vejami dendritov ter deloma pojav celične strjevalne morfologije, dokazujejo večjo ohlajevalno hitrost peskov v vzorcu B.

Glede na značilnosti peskov vzorca B sklepamo, da so bili izdelani s plinsko atomizacijo ali v vakuumu ali v varovalni atmosferi, kjer je dober prenos toplote z delcev na okoliški medij. Vsekakor dobimo z vodno atomizacijo peske, ki so manj kvalitetni.

5 LITERATURA

- ¹ Available from world wide web: <<http://www.vulkan-st.de>>
- ² Available from world wide web: <<http://www.pan-abrasives.com.sg>>
- ³ The brochure of Abrasiv Muta, **1996**
- ⁴ F. Zupanič, T. Bončina, A. Križman, R. Rudolf, *Kovine zlit. tehnol.*, Ljubljana, 33(**1999**)5, 359-363
- ⁵ A.J. Yule, J.J. Dunkley: Atomization of the melts, Oxford **1994**
- ⁶ SAE J827, **1994-07**, High Carbon Cast Steel Shot
- ⁷ Technical dokumentation: Ervin abrasives test machine, Ann Arbor, Mich 48106
- ⁸ Colombiert, L., and J. Hochman: Stainless and heat resisting steels, Scripta Technica Ltd., Edward Arnold, St. Martin Press, New York **1968**, p.16
- ⁹ H. Schneider: Investment Casting of High-Hot-Strength 12% Chromium Steel, *Foundry Trade Journal*, 108 (**1960**) 562-563
- ¹⁰ C.B. Post in W.S. Eberly: *Trans. Am. Soc. Met.*, 39 (**1947**) 868
- ¹¹ Horst Blaumenauer: Werkstoffprüfung, 6th ed. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig-Stuttgart, **1994**, p.384