

PROIZVODNJA I MIKROLEGIRANJE AUSTENITNOG NEHRĐAJUĆEG ČELIKA X8CrNiS18-9

PRODUCTION AND MICROALLOYING OF AUSTENITE STAINLESS STEEL X8CrNiS18-9

*Derviš Mujagić
Institut "Kemal Kapetanović" Zenica
Travnička cesta 7, Zenica*

SAŽETAK

U novije vrijeme sve se više primjenjuju modificirani nehrđajući čelici za izradu različitih konstrukcionih elemenata koji rade u složenim eksploatacionim uslovima. Čelik X8CrNiS18-9 (standard EN 10088-3:2005) je najčešće korišteni iz grupe austenitnih nehrđajućih čelika u pogledu mašinske obradivosti. Sadržaj sumpora koji je prisutan u ovom čeliku od 0,15 – 0,35% ima isključivi zadatak da poboljša mašinsku obradivost. Međutim, dok sumpor poboljšava mašinsku obradivost istovremeno smanjuje otpornost čelika prema koroziji, a utiče i na smanjenje mehaničkih osobina prije svega žilavosti čelika. Cilj ovog istraživanja je da se mikrolegiranjem borom, cirkonijem i telurom utvrdi mogućnost modifikacije nemetalnih uključaka. U ekperimentalnom dijelu istraživanja planirano je da se uradi osam talina. Prva talina će biti austenitni nehrđajući čelik X8CrNiS18-9 bez ikakvih modifikatora. Nakon toga u slijedećih sedam talina izvršit će se modificiranje sastava sa odgovarajućim sadržajima bora, cirkonija i telura. Od posebnog značaja je da se utvrdi ponašanje nemetalnih uključaka u procesu izrade konstrukcionog dijela i u kasnijoj eksploataciji. Iz tog razloga planirana je i simulacija prerade austenitnog nehrđajućeg čelika plastičnom preradom kovanjem i valjanjem sa dva različita stepena prerade. Nakon toga će biti uzeti uzorci i na njima urađena ispitivanja mikrostrukture.

Ključne riječi: austenitni nehrđajući čelik, nemetalni uključci, mašinska obradivost

SUMMARY

More recently a modified stainless steels has been used for production of various structural elements that work in complex operating conditions. Steel X8CrNiS18-9 (standard EN 10088-3: 2005) is the most commonly used from the group of austenitic stainless steel in terms of machinability. The content of sulphur present in the steel from 0,15 to 0,35% has the exclusive task to improve the machinability. However, while sulphur improves machinability it simultaneously reduces the resistance of steel to corrosion, but also affects the decrease in mechanical properties particularly steel toughness. The aim of this research is to determine the possibility of modifying non-metallic inclusions by microalloying with boron, zirconium and tellurium. In the experimental part of the research, it is planned to make eight melts. The first melt will be austenitic stainless steel X8CrNiS18-9 without any modifiers. After that, in the following seven melts, the composition will be modified with appropriate boron, zirconium and tellurium contents. It is of particular importance to determine the behavior of non-metallic inclusions in the process of making the structural part and in later exploitation. For this reason, a simulation of the processing of

austenitic stainless steel by plastic processing by forging and rolling with two different stages of processing is also planned. After that, samples will be taken and microstructure tests will be performed on them.

Keywords: austenitic stainless steel, nonmetallic inclusions, machinability

1. UVOD

Austenitni nehrđajući čelik X8CrNiS18-9 je čelik sa poboljšanom mašinskom obradivosti koji se obrađuje na automatiziranim alatnim strojevima. Jedan od ključnih zahtjeva za dizajn je najveće uklanjanje materijala po jedinici vremena i lomljivost strugotine. Stoga ovaj čelik sadrži povećan sadržaj sumpora kako bi se dobila veća količina mangan sulfida. Pored količine mangan sulfida, njihov oblik i način raspodjele u čeličnoj matrici također su vrlo važni za mehanička svojstva čelika, kao i za otpornost na koroziju. Na oblik, veličinu i raspodjelu mangan sulfida može se utjecati dodavanjem elemenata s visokim afinitetom prema kisiku, kao što su titan, magnezij ili cirkonij, dodavanjem kalcija ili REM elemenata ili dodavanjem telura.

Bor u austenitnim nehrđajućim čelicima omogućava taložno očvršćavanje (povećanje konvencionalne granice tečenja i zatezne čvrstoće), ali smanjuje otpornost na opću koroziju [1]. Bor se koristi kao legirajući element u mnogim materijalima, a u čeliku se najčešće koristi kao legirajući element zbog svog utjecaja na povećanje prokaljivosti. Dodatak bora do 0,01% u austenitnim čelicima poboljšava njihovu čvrstoću na visokim temperaturama. Čelici koji sadrže bor koriste se kao visokokvalitetni konstrukcijski čelici namijenjeni za toplinsku obradu, čelici za kaljenje i čelici za hladnu obradu, poput čelika za vijke [2].

Funkcija cirkonijuma nije da ostane u rastopljenom čeliku, već da ukloni nečistoće kisika, sumpora i dušika ili modificira nemetalne uključke formiranjem kompleksnih sulfida i oksisulfida. Cirkonijum sulfid je znatno stabilniji od mangan sulfida u čeliku. Stoga, ako je dovoljno slobodnog cirkonijuma dostupno tokom ranih faza skrućivanja tekućeg čelika, cirkonijum sulfid će se formirati i spriječiti stvaranje mangan sulfida. Cirkonijum sulfid je mnogo vatrostalniji od mangan sulfida i praktično se ne deformira tokom toplog valjanja [3].

Utvrđeno je da dodatak cirkonijuma poboljšava tvrdoću i ne smanjuje udarnu žilavost. Dodatak cirkonijuma uzrokuje da sulfidni uključci budu kuglasti, a ne izduženi, što poboljšava čvrstoću i duktilnost mikrolegiranog čelika [4].

Dodavanje telura posljedica je sposobnosti podmazivanja mangan telurida. Telur se u čelicima javlja u uključcima u obliku mangan (sulfo) telurida ($MnTeXS(1-x)$), ili kao bijeli omotač mangan sulfida, ili u obliku globularnih uključaka, koji se nalaze u bazi mangan sulfida ili mangan silikata [5].

Uključci mangan telurida ($MnTe$) očigledno su efikasniji od sumpora u pogledu mašinske obradivosti austenitnih nehrđajućih čelika. Kao i selen, on također potiče globularizaciju i širenje uključaka sulfida. Iako je telur sada prepoznat kao snažan modifikator sumpora, kao i aditiv za obradivost kada se koristi u kombinaciji s olovom i sumporom [6], on također ima nedostatak jer uzrokuje probleme s vrućom obradom austenitnih nehrđajućih čelika i nije korišten u komercijalne svrhe [7].

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Metalografsko ispitivanje uzoraka u ljevanom stanju

Topljenje i livenje austenitnog nehrđajućeg čelika X8CrNiS18-9 vršeno je u vakuumskoj indukcijskoj peći kapaciteta 20 kg, maksimalne snage 40 kW (slika 1). Peć je namijenjena za proizvodnju tečnog metala visoke čistoće, a nalazi se u Laboratoriju za preradu metala Instituta "Kemal Kapetanović".

Da bismo istražili mogućnost modifikacije nemetalnih uključaka mikrolegiranjem sa borom, cirkonijem i telurom planirano je da se uradi osam talina. Prva talina je austenitni nehrđajući čelik X8CrNiS18-9 bez ikakvih modifikatora. Nakon toga u slijedećih sedam talina izvršeno je modificiranje sastava sa odgovarajućim sadržajima bora, cirkonija i telura i to tako da svaki od navedenih elemenata bude dodat samostalno, a zatim u kombinacijama sa dva, te na kraju sa sva tri legirajuća elementa. Hemijske analize svih varijanti talina date su tabeli 1.



Slika 1. Vakuumska indukcijska peć (VIP) 20 kg

Tabela 1. Hemijske analize svih varijanti talina [8]

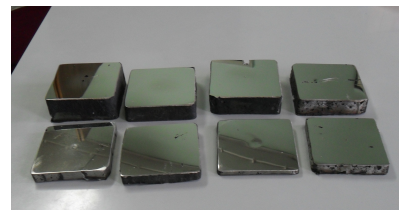
Oznaka taline	Hemijski sastav (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	B	Zr	Te
V 1759	0,03	0,42	0,61	0,021	0,18	18,3	9,4	—	—	—
V 1763	0,05	0,47	0,66	0,021	0,19	18,5	9,5	0,004	—	—
V 1764	0,04	0,35	0,75	0,021	0,17	18,8	9,4	—	0,016	—
V 1765	0,05	0,40	0,80	0,010	0,16	18,9	9,3	—	—	0,033
V 1769	0,04	0,49	0,69	0,012	0,17	18,5	9,1	0,004	0,009	—
V 1768	0,04	0,35	0,78	0,011	0,18	18,8	9,3	0,004	—	0,039
V 1770	0,03	0,47	0,72	0,012	0,18	18,5	8,9	—	0,007	0,040
V 1771	0,04	0,44	0,78	0,012	0,19	17,1	9,3	0,006	0,012	0,042



Slika 2. Ingot nakon rezanja ploče za metalografska ispitivanja [8]

2. Na slikama su prikazani uključci prosječne veličine, dok su u tabeli 2 navedeni i pojedinačni uključci koji su znatno veći od prosječnih.

Nakon očvršćavanja iz ingota su uzeti uzorci, neposredno uz glavu ingota, za metalografsko ispitivanje ljevanog stanja. Na slici 2. je predstavljen ingot V1759 nakon rezanja ploče za metalografska ispitivanja, dok su na slici 3. prikazani svi uzorci za metalografska ispitivanja u ljevanom stanju nakon završene pripreme (brušenja i poliranja). Nakon toga izvršena je analiza sadržaja, veličine i raspodjele nemetalnih uključaka u nenagriženom stanju, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli

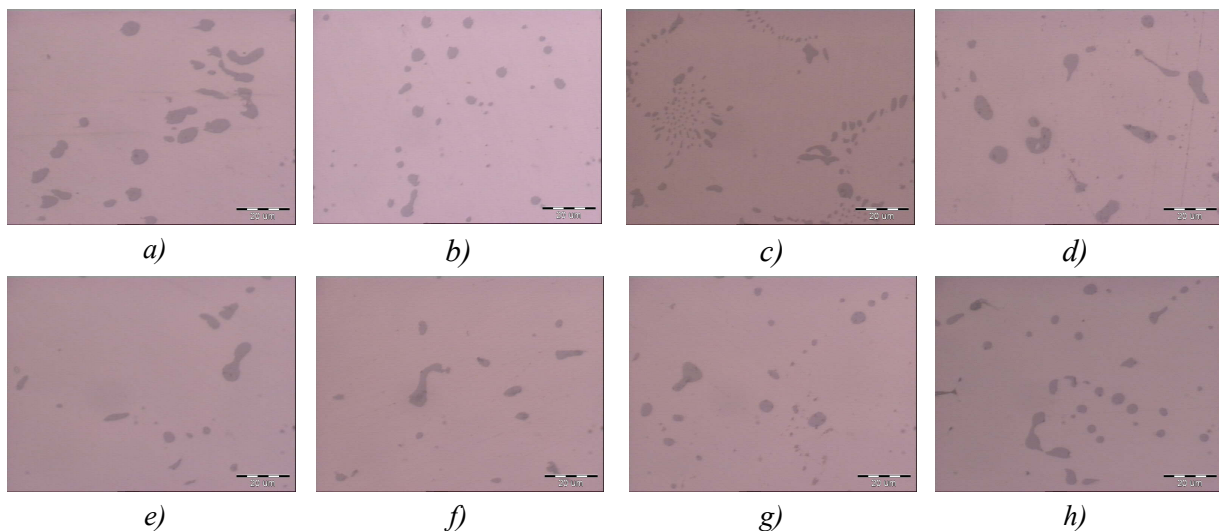


Slika 3. Uzorci za metalografska ispitivanja u ljevanom stanju [8]

Tabela 2. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka u ljevanom stanju [8]

Talina (Oznaka uzorka)	Veličina uključaka sulfida (μm)	Napomena	Ukupan broj uključaka po zonama*		
			I	II	III
1 – ljevano	200,1; 150,0 90,0; 85,0 60,1; 55,5 40,8	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka; Poroznosti veličine 264 i 140 μm	7	8	4
2 – ljevano	221,2; 125,7 92,8; 37,1	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	7	5	6
3 – ljevano	115,3; 193,1 69,2	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	3	3	6
4 – ljevano	162,1; 110,8 63,1	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	1	5	7
5 – ljevano	64,0; 100,8 150,0; 104,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	8	2	8
6 – ljevano	31,0; 25,0 120,0; 28,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	3	1	2
7 – ljevano	54,0; 75,0 102,0; 168,0 184,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka	4	8	8
8 – ljevano	110,0; 90,0 80,0; 35,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka; Uočena poroznost	4	Sitni uključci	Sitni uključci

Snimanje uzoraka izvršeno je na optičkom mikroskopu tipa Olympus PMG3 (slike 4a – 4h).



Slika 4. Uzorci u ljevanom stanju [8]

2.2. Metalografsko ispitivanje uzoraka u kovanom stanju

Prvi stepen deformacije, kovanje na presi i čekiću, se provodio do dimenzije cca ϕ 50 mm. Temperaturni interval kovanja je od 1149 – 1260 °C. Vrijeme dogrijavanja nakon zahlađenja ingota iznosi 10 min. Svi uzorci su prekovani na hidrauličnoj presi snage 44 kW (slika 5), dok je

završno kovanje rađeno na zračnom čekiću snage 24 kW (slika 6) koji se nalaze u Laboratoriju preradu metala Instituta "Kemal Kapetanović". Uzorci nakon provedenog procesa kovanja i grube mašinske obrade prikazani su na slici 7.



Slika 5. Hidraulična presa



Slika 6. Zračni čekić

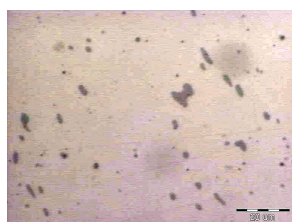


Slika 7. Uzorci nakon provedenog procesa kovanja i grube mašinske obrade [8]

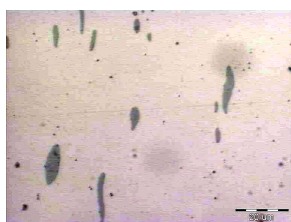
Kao i kod ljevanih uzoraka izvršena je analiza sadržaja, veličine i raspodjele nemetalnih uključaka u nenagriženom stanju, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 3 i na slikama 8a do 8h.

Tabela 3. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka u kovanom stanju [8]

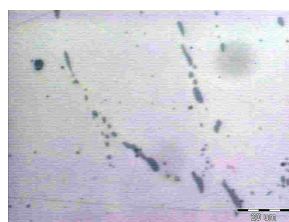
Oznaka uzorka	Veličina uključaka (μm)	Napomena
1 – kovano	Kompleksni globularni uključci: 50,0; 90,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
2 – kovano	Najduži sulfidni uključak: ~ 80,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
3 – kovano	Kompleksni uključci: 50,0 x 20,0; 25,0 x 20,0 48,0 x 18,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
4 – kovano	Globularni uključak: ~ 20,0 Kompleksni uključak: 139,0 x 30,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
5 – kovano	Kompleksni uključak: 50,0 x 10,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
6 – kovano	Kompleksni uključci: 63,0 x 18,0; 126,0 x 10,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka; Jedno gnijezdo kompleksnih uključaka
7 – kovano	Kompleksni uključci: 70,0 x 30,0; 150,0 x 30,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka
8 – kovano	Kompleksni uključci: 350,0 x 80,0; 50,0 x 20,0	Mnogo sitnih sulfidnih uključaka



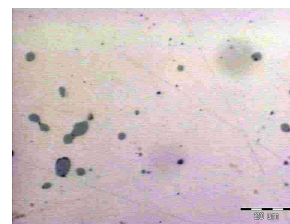
a)



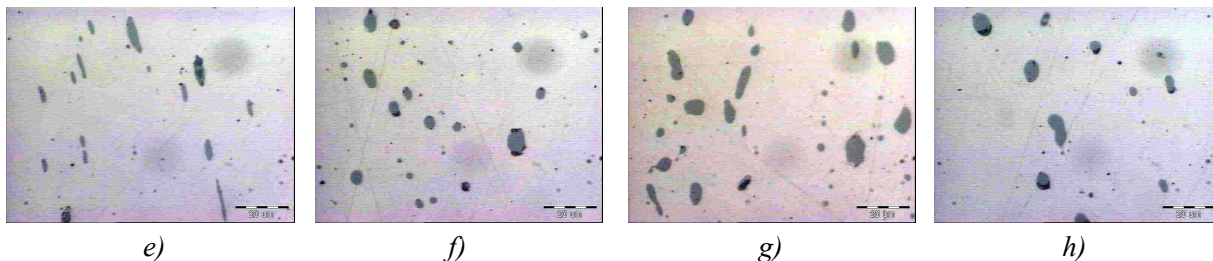
b)



c)



d)



Slika 8. Uzorci u kovanom stanju [8]

2.3. Metalografsko ispitivanje uzoraka u valjanom stanju

Nakon kovanja, uzorci su podvrgnuti novom stepenu deformacije valjanjem. Do dimenzije koja je predviđena za polaznu dimenziju na valjaonici (22 x 46 mm) svi uzorci su prekovani na hidrauličnoj presi. Svi uzorci su nakon kovanja na presi vraćeni na dogrijavanje, te se, nakon dostizanja temperature neophodne za deformaciju, pristupilo valjanju.



Slika 9. Valjanje uzoraka na SKET valjaonici

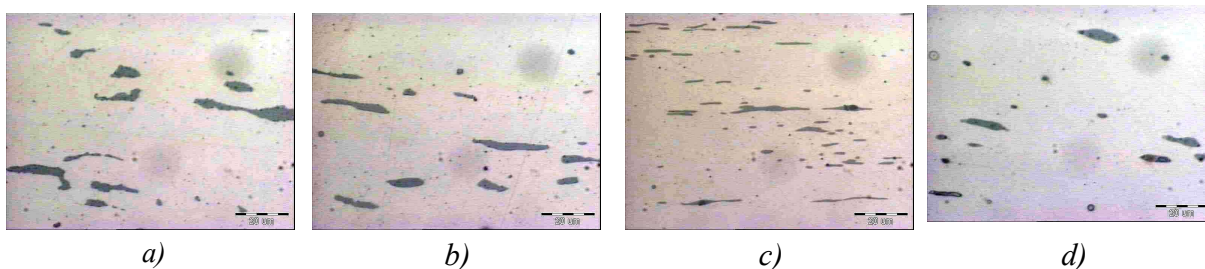
Valjanje se vršilo na valjaonici SKET, pri čemu je prilikom prve provlake presjek uzoraka reducirao na 18 mm, dok je drugom provlakom postignuta konačna dimenzija uzoraka 14 x 50 mm. Brzina valjanja je iznosila 400 o/min. Nakon završetka valjanja svi uzorci su podvrgnuti gašenju u vodi, kako bi se izbjegao uticaj senzibilizacije. Svi uzorci su proizvoljne dužine zavisno o količini materijala po pojedinim varijantama. Na slici 9 prikazan je proces valjanja na navedenoj valjaonici, dok je na slici 10 prikazan izgled svih uzoraka nakon provedenog procesa valjanja.

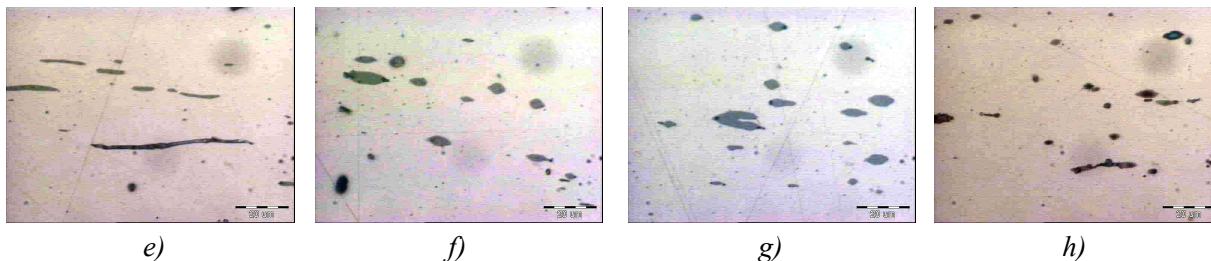


Slika 10. Uzorci nakon procesa valjanja [8]

Po završetku drugog stepena deformacije (valjanje na dimenzije 14 x 50 mm), uzeti su uzorci za provođenje metalografskih ispitivanja za valjano stanje. Izvršena je analiza sadržaja, veličine i raspodjele nemetalnih uključaka u nenagriženom stanju, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 4. Ispitivanje je izvršeno u skladu sa standardom ASTM E45-11 – Standardne ispitne metode za određivanje sadržaja uključaka u čeliku.

Ocjena sadržaja nemetalnih uključaka provedena je poređenjem sa skalom standarda ASTM E 45-11. Standard BAS EN 10088-1 ne propisuje granične vrijednosti za sadržaj nemetalnih uključaka. Snimanje uzoraka izvršeno je na optičkom mikroskopu tipa OLYMPUS PMG3 (slike 11a – 11h).





Slika 11. Uzorci u valjanom stanju [8]

Tabela 4. Rezultati metalografskih ispitivanja uzoraka u valjanom stanju (standard ASTM E45-11)[8]

Oznaka uzorka	Sulfidi		Napomena
	Tanki	Debeli	
1 – valjano	3	1,5	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od $2\mu\text{m}$. Uočen je i kompleksni uključak veličine $250\mu\text{m}$.
2 – valjano	3	1	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od $2\mu\text{m}$.
3 – valjano	3	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od $2\mu\text{m}$. Uočen je i kompleksni oksisulfidni uključak veličine $500\mu\text{m}$.
4 – valjano	3	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od $2\mu\text{m}$. Uočeni su i kompleksni uključci veličine: $600, 500, 300, 200\mu\text{m}$.
5 – valjano	1,5	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od $2\mu\text{m}$. Uočeni su i kompleksni uključci veličine: $600, 300\mu\text{m}$.
6 – valjano	1,5	1	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od $2\mu\text{m}$. Uočen je i kompleksni uključak veličine $150\mu\text{m}$.
7 – valjano	1,5	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od $2\mu\text{m}$. Uočeni su i kompleksni uključci veličine: $600, 150, 60\mu\text{m}$.
8 – valjano	1,5	3	Uočeno mnogo sitnih sulfidnih uključaka čija je debljina manja od $2\mu\text{m}$. Uočeni su i kompleksni uključci veličine: $500\mu\text{m}$.

3. ZAKLJUČAK

Cilj istraživanja bio je analizirati sadržaj, veličinu i raspodjelu nemetalnih uključaka u nenagriženom stanju austenitnog nehrđajućeg čelika X8CrNiS18-9, sa i bez legiranja borom, cirkonijem i telurom. Pored toga, istraživao je i utjecaj gore navedenih kemijskih elemenata na promjenu vrste i kemijskog sastava nemetalnih uključaka. Nakon provedenih ispitivanja, moguće je izvući sljedeće zaključke:

- Osnovne vrste uključaka u ovom čeliku su manganovi sulfidi.
- Utjecaj na oblik i veličinu nemetalnih uključaka posebno pokazuju cirkonij i telur.
- Dodavanje telura cirkoniju i boru poboljšava globularizaciju austenitnog nehrđajućeg čelika X8CrNiS18-9, u tom pogledu telur je posebno dominantan.
- Nemetalni uključci se mogu modificirati, posebno u kombinaciji sa telurom, čime se s jedne strane osigurava dobra mašinska obradivost, a s druge strane izbjegava negativan utjecaj na svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika X8CrNiS18-9

4. REFERENCE:

- [1] Stjepan Kožuh: "Special steels - script", University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Sisak, 2010
- [2] N. Haračić: "Boron and low - alloy steels for cementation and direct hardening "- *Mašinstvo*4 (6), (2002), 215 – 226
- [3] M. Taguchi, H. Sumitomo, R. Ishibashi, Y. Aono, Effect of Zirconium Oxide Addition on Mechanical Properties in Ultrafine Grained Ferritic Stainless Steels, *Materials Transactions*, Vol. 49, No. 6 (2008) pp. 1303 to 1310
- [4] M. Makesh Kumar, S.S. Mohamed Nazirudeen, P. Dhanapal, Investigation on micro-alloyed steels, *International journal of advanced scientific research and technology*, Issue 2, Volume 3, June 2012 Dostupno na: <http://rspublication.com/ijst/june12/20.pdf> [12.09.2025.]
- [5] K. Hribar: Vpliv kovinskih in nekovinskih dodatkov na obliko vključkov in tehnološke lastnosti jekel, Magistrsko delo, Jesenice, 1981
- [6] J. Grum: Quantitative analysis of sulphide inclusions in free cutting steels and their influence on machinability, *Acta Stereologica*, Volume 18, Number 3, p. 319-331
- [7] D. Mujagić, A. Imamović, M. Oruč, S. Muhamedagić: Analysis of the type and chemical content of the inclusion on SEM of the stainless steel with and without the addition of Zr and Te: 4th International Conference „NEW TECHNOLOGIES NT-2018“ Development and Application, Sarajevo, 14-16. June 2018, 72-79
- [8] D. Mujagić – "Contribution to research of influence microalloying with boron, zirconium and tellurium on properties of austenitic stainless steel with sulphur addition X8CrNiS18-9", PhD thesis, University of Zenica, Faculty of Metallurgy and Technology, Zenica, January 2017