

Olga Myronova^{1*}, Vyacheslav Goryany²

¹Univerzitet u Duisburgu, Institut za tehnologije metala, Duisburg, Nemačka

²Karl Buch Walzengießerei GmbH & Co. KG, Siegen, Nemačka

Naučni rad

ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585

UDC: 620.172.24-034.14:66.094.5

<https://doi.org/10.5937/zasmat2102113M>



Zastita Materijala 61 (2)

113 - 125 (2021)

Utica j nemetalnih uključka ka na razaranje mehanički opterećenih čeličnih proizvoda

IZVOD

U radu su detaljno opisani razlozi pucanja čeličnih proizvoda i pored toga što su svi uslovi mehaničkog opterećenja ispoštovani – radna naprezanja bila su mnogo manja od maksimalnog naprezanja na zatezanje primenjene vrste čelika. Dubinska metalografska analiza, kao i analiza naprezanja pokazuju da se osnovni uzrok tome nalazi u nastajanju nemetalnih uključka ka u samom materijalu proizvoda, koji suštinski menjaju njegove mehaničke karakteristike.

Ključne reči: nemetalni uključki, čelični valjci, mehanički lom, kefcijent termičkog širenja, metalografska ispitivanja

1. SUŠTINSKI ODGOVOR NA PROBLEM PUCANJA ČELIČNIH PROIZVODA

U slučaju loma mehanički opterećenog čeličnog proizvoda, uvek se postavlja kontroverzno pitanje: „Zašto je došlo do razaranja iako su svi neophodni tehnološki uslovi za njegovo korišćenje bili potpuno ispunjeni?“. FEM-simulacija mehaničkih opterećenja i ukupnih naprezanja, koja bi se mogla da javljaju tokom delovanja sila rada, pokazala je da su maksimalna naprezanja na zatezanje u zoni eventuelnog loma znatno manja od kritičnog nivoa zatezne čvrstoće primenjene vrste čelika i ne bi mogla da budu uzrok loma. Metalografskim istraživanjima uzorka zone loma bili su identifikovani nemetalni uključki različitih vrsta i veličina.

2. NEMETALNI UKLJUČCI U ČELIKU

Nemetalni uključki se nalaze u svakom industrijski proizvedenom čeliku. Prema Flemingsu [1] industrijski čelik sadrži oko 10^8 cm⁻³ nemetalnih uključka ka, koji su veliki samo nekoliko mikrometara, ali mogu da brzo rastu čak i u izotermnim uslovima. Prema uzroku njihovog nastanka nemetalni uključki mogu se podeliti na endogene i egzogene. Prvi nastaju kao rezultat hemijskih reakcija u

procesu topljenja, dezoksidacije, izlivanja i sekundarne obrade čelika kao i u toku njegove kristalizacije. Nastajanje oksidnih uključka ka nastavlja se i nakon otvrdnjavanja čelika tokom njegova naknadnog hlađenja, što je povezano sa višestrukim smanjenjem rastvorljivosti kiseonika u čeliku. Endogeni uključki su delići obloge peći, lonca, čestice šarže, šljake, egzotermne mešavine itd. Nastajanje nemetalnih uključka ka zavisi od termodinamičkih parametara hemijskih reakcija

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0 \quad (1)$$

gdje su:

ΔG^0 – Gibsova energija; ΔH^0 – entalpija; T – temperatura; ΔS^0 – entropija.

Što je manja slobodna energija, to je veća verovatnoća nastajanja većine oksidnih uključka ka. Ova vrsta nemetalnih uključka ka najčešće se nalazi na površini loma čelika, slika 1 [2].

Na nemetalan uključek, koji se nalazi u rastopu čelika, deluju različite sile koje utiču na pravac njegova kretanja. Pored konvekcionih struja, deluju sila otpora rastopa, površinska energija nemetalnog uključka i dr. Prema Stoksovom zakonu nemetalni uključki kreću se na gore, ako je njihova gustina manja od gustine rastopa i kreću se na dole, ako je njihova gustina veća od gustine rastopa. Brzina kretanja nemetalnih uključka ka zavisi i od njihovog prečnika, saglasno jednačini:

*Autor za korespondenciju: Olga Myronova

e-mail: dr.goryany@alice-dsl.net

Rad primljen: 11. 02. 2021.

Rad prihvaćen: 17. 03. 2021.

Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

$$v = \frac{2r_U^2 g(\rho_M - \rho_U)}{9\eta_M} \quad (2)$$

gdje je:

r_U – radijus uključaka

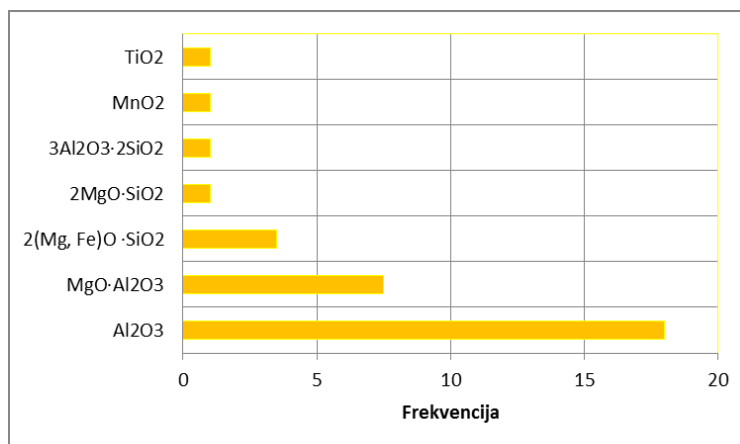
g – ubrzanje zbog gravitacije

ρ_M – gustina rastopa

ρ_U – gustina uključaka

η_M – dinamička viskoznost rastopa.

Navedena jednačina važi za tvrde nemetalne uključake veličine do 100 μm [3, 4].



Slika 1. Najzastupljeniji oksidni uključci na površini loma čelika [2]

Figure 1. The most common oxide inclusions on the fracture surface of steel [2]

Brzina kretanja tečnih nemetalnih uključaka određuje se jednačinom Ribčinskog-Adamara [4]

$$v = \frac{2(\rho_M - \rho_U)gr_U^2}{3\eta_M} \frac{\eta_M + \eta_U}{2\eta_M + 3\eta_U} \quad (3)$$

gdje je: η_U – dinamička viskoznost nemetalnog uključaka.

Praksa proizvodnje čelika pokazuje da mešanje rastopa dovodi do značajnog ubrzanja procesa njegovog pročišćavanja od nemetalnih uključaka. Brzina protoka metala dovoljna za uklanjanje uključaka koji imaju još veću gustinu u poređenju sa rastopom, u sloju ispod šljake određuje se jednačinom:

$$v_m = 9,38 \sqrt{\frac{gr_U(\rho_U - \rho_M)}{\rho_M}} \quad (4)$$

U toku kretanja nemetalnih uključaka dolazi do njihovog međusobnog kontakta, što može dovesti do integracije (koalescencije) tečnih uključaka, koji lako koaguliraju i rastu, i budu lakši od tvrdih nemetalnih uključaka asimiliranih od strane šljake. Tvrđi nemetalni uključci kao što $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ i $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ spajaju se sinterovanjem ili ljepljenjem, što dovodi do nastajanja klastera, koja su mogu da budu sastavljena od nekoliko stotina nejednako orijentisanih uključaka [5-8]. Konačno sinterovani klasteri imaju veličinu od oko 50 μm [6]. Nemetalni uključci mogu da rastu i putem njihove međusobne adhezije. U ovom slučaju lepe se za tvrde uključke, dok kapilarne sile reda veličine od

10^{-16} do 10^{-13} N, deluju između čvrstih i tečnih ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) uključaka, olakšavajući kompresiju i deformaciju tvrdih uključaka. Kapilarne sile djeluju na međusobnoj udaljenosti uključaka do oko 100 μm [9].

3. ULOGA NEMETALNIH UKLJUČAKA U RAZARANJU ČELIČNIH PROIZVODA

U zavisnosti od vrste nemetalni uključci poseduju različitu morfologiju, strukturu kristalne rešetke i mehaničke osobine kao što tvrdoća, čvrstoća, lomljivost, ponašanje prema deformaciji, što sve može značajno pogoršati mehaničke osobine čelika – njegovu čvrstoću na zatezanje, žilavost, elastične osobine, a takođe otpornost na koroziju. Nemetalni uključci imaju veliki uticaj na čvrstoću na zamor čelika. Oni mogu delovati kao inicirajući faktor za nastajanje pukotina usled zamora materijala [10, 11].

Pukotina se ne stvara na svakom oksidnom uključku smeštenom u osnovnoj strukturi čelika, koji se nalaze u području velikih opterećenja. Lokalna naprezanja u zoni nemetalnog uključka zavise od njegove veličine. Što je veća zepremina nemetalnih uključaka, to je veći negativni uticaj koji oni vrše na mehaničke osobine čelika, usled čega odgovarajuća zapremina osnovne strukture materijala dobija odgovarajuće napetosti pri opterećenju [12-14]. Kiessling i Nordberg uveli su koncept kritične veličine nemetalnih uključaka (d_{kr}), podelivši sve uključke u dve grupe: 1) opasne (makroskopske), čija je veličine veća od d_{kr} ; 2) dozvoljeni (mikroskopske), dimenzija manjih od d_{kr} . Izjednačavajući

kritičnu veličinu uključaka sa kritičnom veličinom defekta, dobili su vrijednosti kritične veličine nemetalnih uključaka od 50 do 500 μm , u zavisnosti od vrste čelika, sastava i rasporeda nemetalnih uključaka [13].

Pojava pukotina povezanih sa prisustvom nemetalnih uključaka javlja se prvenstveno duž površine kontakta između uključaka i osnovnog materijala, a u slučaju velike krhkosti uključaka i u samom uključku. Prvo nastaju mikropukotine na većim uključcima. Sa povećanjem veličine uključaka smanjuje se veličina naprezanja, neophodnog za nastajanje mikropukotina. Razvoj nastale pukotine zavisi od osobina osnovnog materijala i udaljenosti uključaka od površine. Što je osnovni materijal plastičniji i što se uključak nalazi dalje od površine, to je manja koncentracija naprezanja u blizini uključaka i time je veće naprezanje potrebno za razvoj pukotine. Nemetalni uključak uzrokuje razaranje usljed kritičnog naprezanja koje je njime uzrokovano, pri čemu to naprezanje premašuje lokalnu plastičnost osnovnog materijala ili se pak razaranje javlja kao posledica krhkosti samog uključaka.

Posebno negativan uticaj na čvrstoću na zamor čelika imaju veliki uključci sa oštrim ivicama. Nemetalni uključci male veličine, koji se nalaze na velikoj udaljenosti jedni od drugih, ne dovode do nastajanja pukotina. Ako su uključci veliki i udaljenost između njima mala, dovoljna su znatno manja naprezanja, da bi došlo do loma čeličnog proizvoda [15]. Sa povećanjem frekvencije i amplitude promjene ciklusa opterećenja povećava se uloga nemetalnih uključaka malih dimenzija, koja zavisi od njihove sposobnosti da izazovu odgovarajuću koncentraciju naprezanja i slabljenje međufazne granice metal-uključak.

Žilavost loma čelika određuje se prisustvom velikih nemetalnih uključaka, koji se mogu lomiti pri izazivanju relativno malih deformacija [16]. Žilavost loma zavisi od zapreminske koncentracije i veličine uključaka, a takođe od mehaničkih osobina čelika

$$K_{1c} = F^{-\frac{1}{6}} \sqrt{2 \left(\frac{\pi}{6} \right)^{\frac{1}{3}} R_e E d} \quad (5)$$

gdje je:

F – zapreminski udeo nemetalnih uključaka

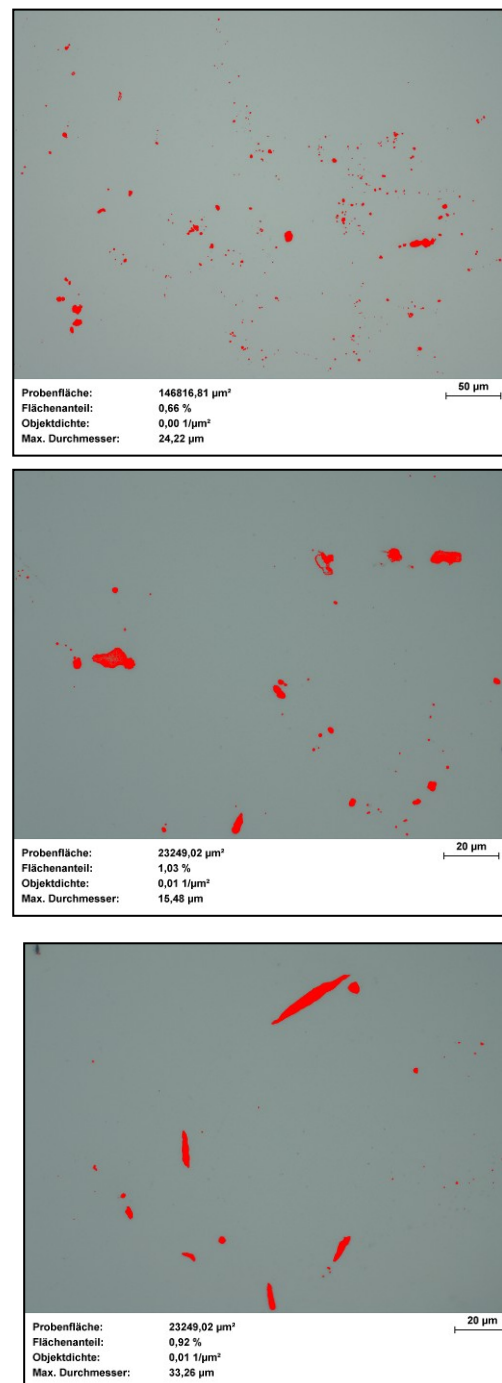
R_e – napon tečenja; E – Youngov modul

d – prečnik uključaka [13].

4. METALOGRAFSKA ISTRAŽIVANJA

Stepen čistoće ispitivanih uzoraka čelika određen je uz pomoć programa Soft Imaging System. Definisani su sledeći parametri: površina uzorka, zapreminski udeo nemetalnih uključaka, gustina

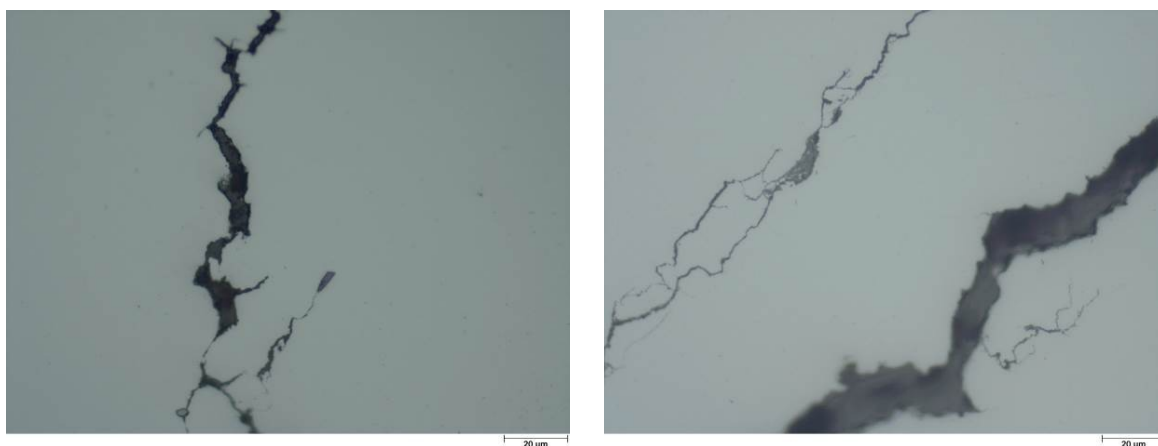
raspodele i maksimalni prečnik nemetalnih uključaka. U toku metalografskih istraživanja bili su identifikovani raznovrsni Al-Ca-Mg-S nemetalni uključci, slika 2.



Slika 2. Identificirani nemetalni uključci

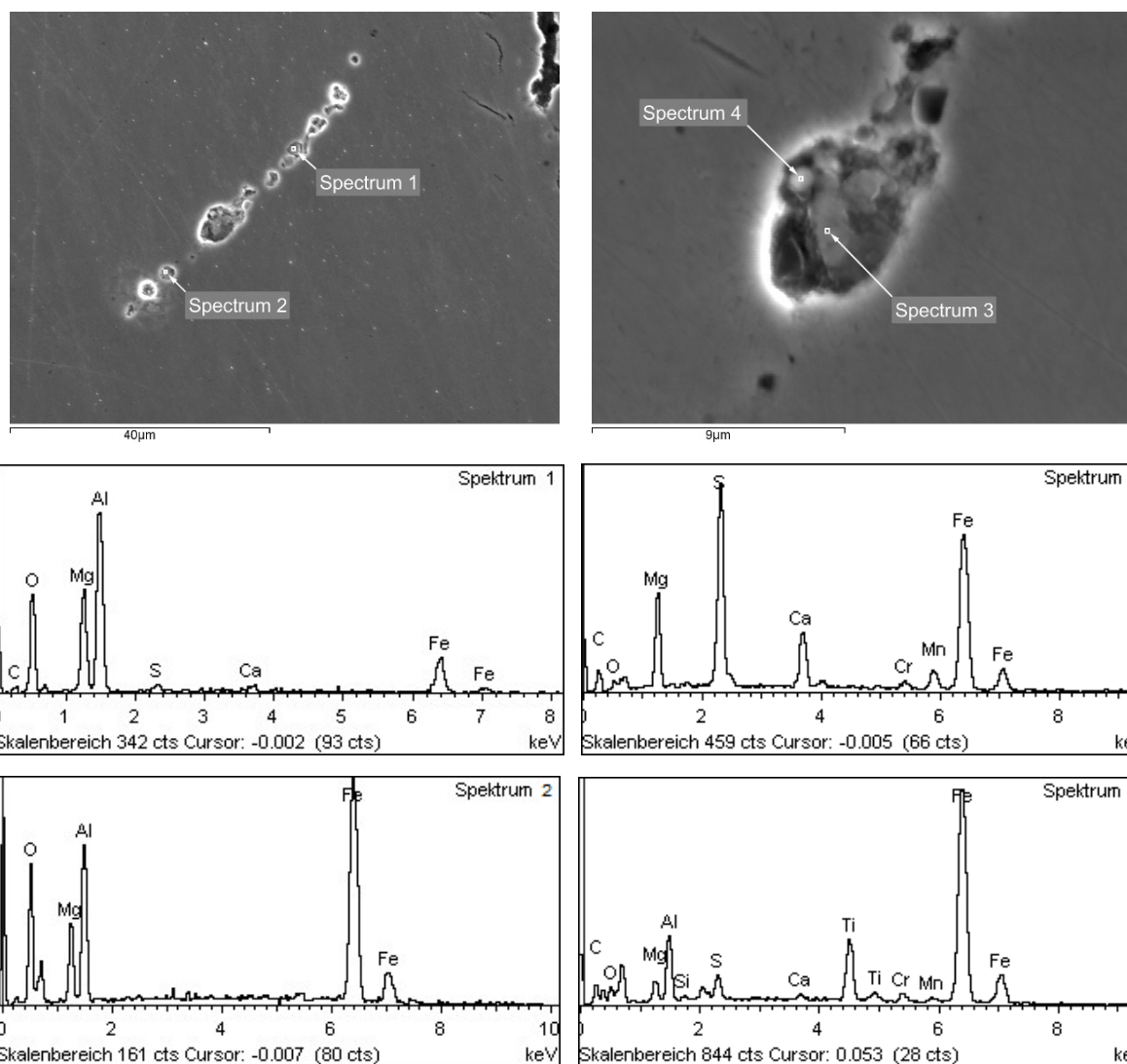
Figure 2. Identified non-metallic inclusions

Neki od njih inicirali su nastajanje pukotina i doprinosili njihovom razvoju, slika 3, dok se drugi drobili tokom plastične prerade kovanjem, i bili linearno raspoređeni u području nastalih pukotina, slike od 4 do 6.



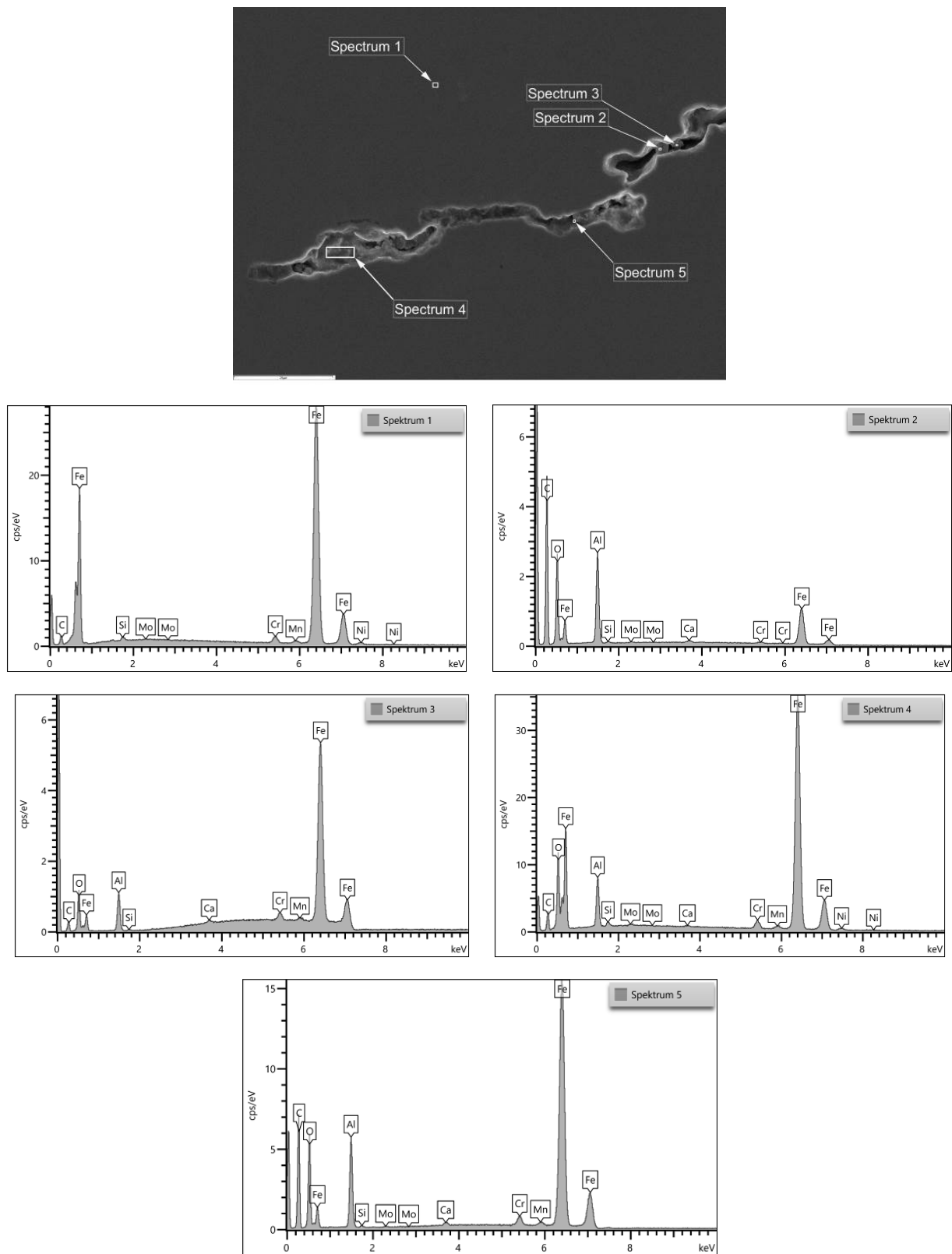
Slika 3. Nastanak i razvoj pukotina na nemetalnim uključcima

Figure 3. Formation and development of cracks on non-metallic inclusions

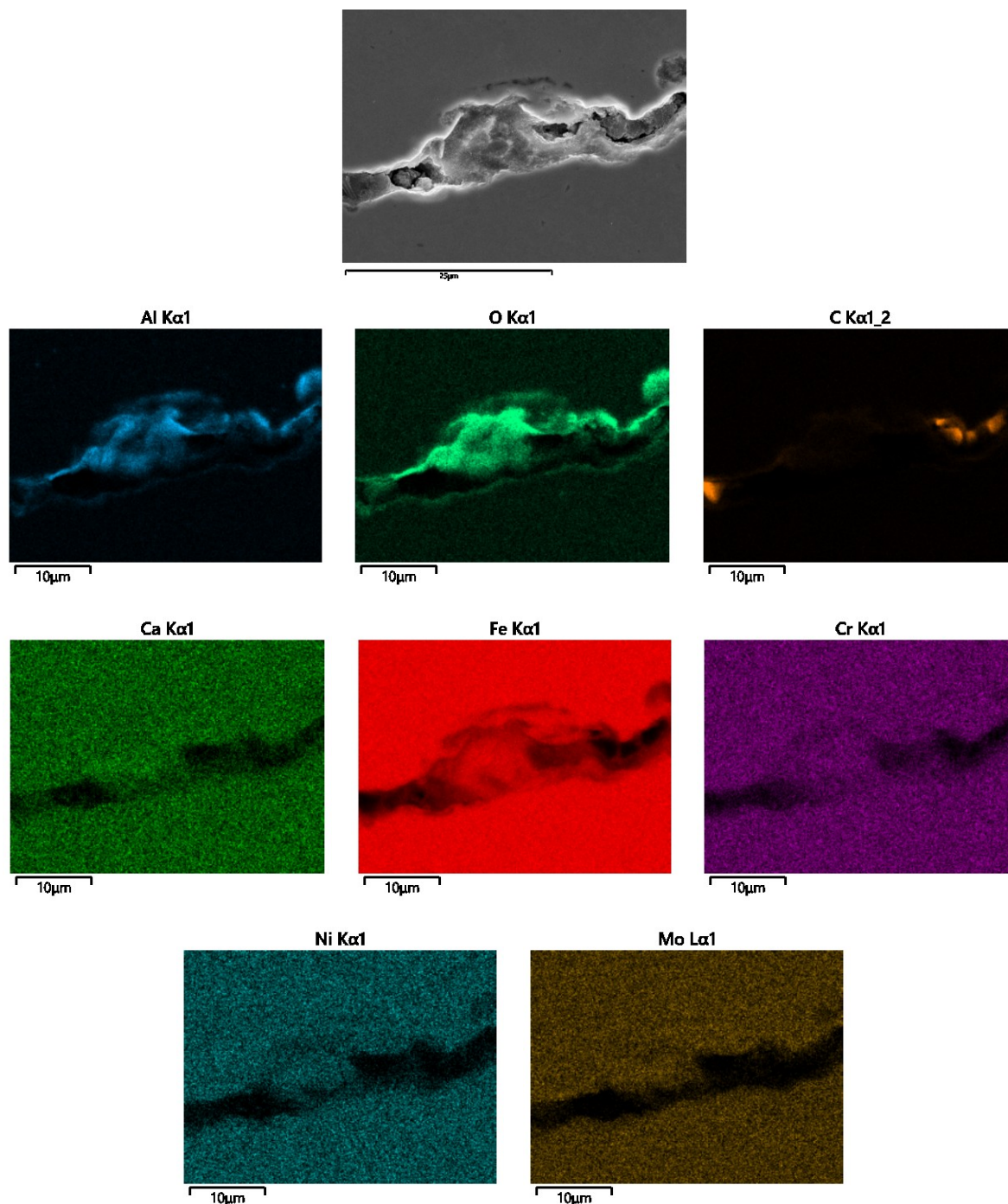


Slika 4. Linearno raspoređeni nemetalni uključci: SEM/EDX analiza u određenim tačkama

Figure 4. Linearly distributed non-metallic inclusions: SEM / EDX analysis at specific points



Slika 5. Aluminijum oksid dužine ~150 μm: SEM/EDX analiza u određenim tačkama
 Figure 5. Aluminum oxide length ~ 150 μm: SEM / EDX analysis at specific points



Slika 6. Detalj slike 5. Distribucija elemenata u identifikovanom nemetalnom uključku. SEM/EDX-Mapping
 Figure 6. Detail of Figure 5. Distribution of elements in the identified non-metallic inclusion:
 SEM / EDX-Mapping

U različitim fazama tehnološkog procesa obrade metala dolazi do njegovog višestrukog zagrevanja, što dovodi do intenzivne difuzije hemijskih elemenata, sadržanih u uključcima, uz stvaranje velikog broja sitnih (jednostavnih) i složenih oksida. Unutrašnja (sekundarna) oksidacija sa stvaranjem satelitskih uključaka, širi se na rastojanja nekoliko puta veća od veličine primarnih klastera [15].

Veoma važnu ulogu imaju nemetalni ukljucci u poboljšanom čeliku. Naprezanja, koja mogu da nastanu u toku termičke obrade, određuju cerasatnoću nastajanja zaostalih naprezanja u toku hlađenja metala. Veličina ovih naprezanja je direktno povezana sa termo-fizičkim osobinama nemetalnih uključaka i osnovne strukture čelika, tabela 1.

Tabela 1. Termo-fizičke osobine nemetalnih uključaka [13, 17-23]

Table 1. Thermo-physical properties of non-metallic inclusions [13, 17-23]

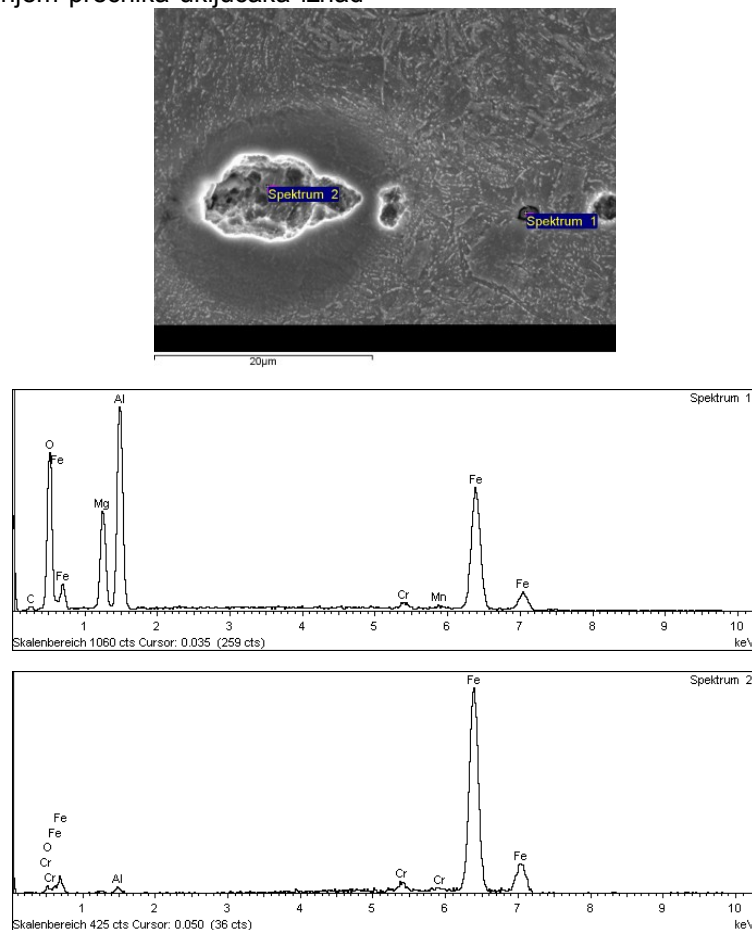
Vrsta nemetalnog uključaka		Temperatura topljenja °C	Gustina g/cm ³	Koeficijent termičkog širenja (0 – 800°C) $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Mikrotvrdoća kN/mm ²	Youngov modul $E \cdot 10^3$ N/mm ²	Puasonov koeficijent ν
Sulfide	FeS	1195	4,58-4,76	18,1	3,724		
	MnS	1530-1620	3,90-4,05	18,1		(69-138)	~ 0,30
	CaS	2400	2,59	14,7			
Kalcijum aluminate	CaO·6Al ₂ O ₃	1330-1839		8,8		(113)	0,234
	CaO·2Al ₂ O ₃			5,0			
	CaO·Al ₂ O ₃		2,98-3,67	6,5			
	12CaO·7Al ₂ O ₃			7,6			
	3CaO·Al ₂ O ₃			10,0			
Špinele	MgO·Al ₂ O ₃	2135	3,50-4,10	8,4	13,72	271	0,260
	MnO·Al ₂ O ₃	1560	4,23	8,07	14,7-16,7		
	FeO·Al ₂ O ₃	1780	4,05	8,6			
Ostali oksidi	MnO	1650-1725	5,18-5,45	11	1,911-2,16	(178)	(0,306)
	MgO	2800	3,58-3,65	13,5	8,89-9,07	306	0,178
	CaO	2570-2600	3,32-3,37	13,7	5,88	182,7	0,21
	Al ₂ O ₃	2020-2050	3,90-3,97	8-8,4	19,6-39,2	389	0,250
	Cr ₂ O ₃	2265	5,215	7,9			
	FeO	1368	5,70	14,2	5,39		
	Fe ₂ O ₃	1565	5,24	12,2			
	Fe ₃ O ₄	1597	5,17	15,3		(33,8)	(0,26)
	TiO ₂	1640-1840	4,24	8,19	9,8		
	V ₂ O ₃	2300	5,21	9,6	28,81		
Kvarz	SiO ₂	1700-1720	2,65	3,8	11,76-15,68		0,170
Silikati	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	1535	3,16	(5,0)	14,7	143,4	0,24
	2MnO·2Al ₂ O ₃ ·5SiO ₂	1140	3,68	(~ 2,0)			
	3MnO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	1195	4,18	6,52	9,8-10,8		
	MnO·SiO ₂	1291	3,72	8,47			
	FeO·SiO ₂	1375	3,50				
	CaO·SiO ₂	1540	2,90-2,92	8,4		63,6	0,284
Nitridi	TiN	2927-2950	5,29-5,43	9,4	19,6	(317)	(0,192)
	AlN	2150-2650	3,05-3,26	9,35	12,0-12,05	60,37	
	VN	2320	6,1	8,1	14,89		
	ZrN	2980	5,30				0,16
	CrN	1497-1770	5,90	7,5	10,68	323,4	
Osnovna struktura čelika	Austenit (1%C, 1,5%Cr) (850°C → M _s)		8,00	(23,0)			
	Martensit		7,75	(10,0)		212,3	
	Ferit			14,8 (20-700°C)		208	0,283

Velika razlika u koeficijentama termičkog širenja nemetalnih uključaka i osnovne strukture čelika dovodi do nastajanja velikih naprezanja u toku hlađenja čelika. Ako je koeficijent termičkog širenja osnovnog metala viši od koeficijenta termičkog širenja nemetalnog uključaka, nastaju u toku hlađenja velika kompresivna naprezanja, koja mogu da dostignu nivo od 500 N/mm² [17,24]. Značajnu ulogu igra i vrsta uključaka. Najveća naprezanja razvijaju se na površini uključaka glinice, spinela i kalcijum aluminata [15,24], koji imaju manji koeficijent termičkog širenja u poređenju sa osnovnom strukturom čelika. Prema Kuslickom [25], koji je izvršio proračune radijalnih, tangencijalnih i aksijalnih termičkih naprezanja u loptastim i cilindričnim nemetalnim uključcima, najveća naprezanja nastaju u prisustvu glinice Al₂O₃ (1185-1283 MPa), a minimalna su u uključcima titan nitrida TiN (725-768 MPa). Negde u sredini sa stanovišta naprezanja nalaze se naprezanja izazvana prisustvom magnezijevog spinela MgO·Al₂O₃ (1008-1055 MPa). Naprezanja koja nastaju na površini uključaka snažno rastu sa povećanjem prečnika uključaka iznad

10 μm [15, 24]. Termička naprezanja se dodaju onima, koja su nastaju u procesu opterećenja i mogu da pređu kritičnu granicu, na kojoj je moguće nastajanje pukotina.

U slučaju, kada nemetalni uključak ima veću kontraktaciju od osnovne strukture čelika, može doći do narušavanja njihove povezanosti i odvajanja nemetalnog uključka od osnovne strukture čelika, što dovodi do nastajanja mikrošupljina, koja olakšavaju nastajanje mikropukotina i koja su se mogu pretvoriti u makropukotine. Što je veća razlika između koeficijenata termičkog širenja nemetalnih uključaka i osnovne strukture čelika, to je izraženiji njihov negativan uticaj na zamorne karakteristike čelika.

Na slici 7 prikazani su uključke glinice (2-4 μm) i mesta nekadašnje lokacije većih nemetalnih uključaka iste vrste, koji su se odvojili od osnovne strukture čelika i ostavili tragove aluminijuma u osnovnoj strukturi čelika. Prilikom pripreme uzoraka, statistički je više od 50% ovih šupljina ostaju bez "uložka", koji može ispasti ili se može isprati [26].



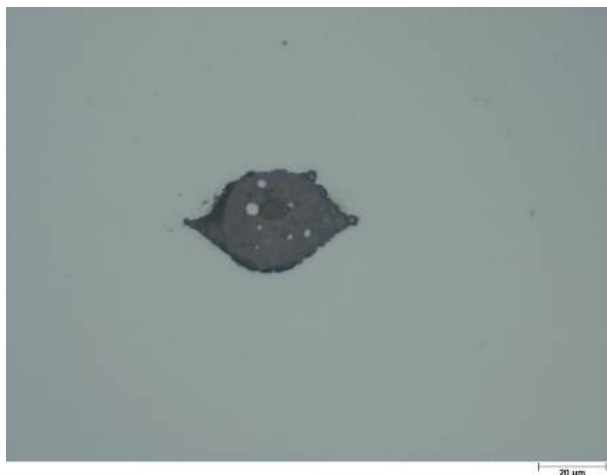
Slika 7. Spektar 1 – glinica, spektar 2 – mesta bivše lokacije odvojenih nemetalnih uključaka

Figure 7. Spectrum 1 - alumina, spectrum 2 - sites of the former location of separate non-metallic inclusions

Veliku ulogu igraju i razlike u Jungovim moduli- ma. Što je viši E-modul nemetalnog uključka, to je veće naprezanje u osnovnoj strukturi čelika. Naj- veća naprezanja nastaju u okolini tvrdih nemetalnih uključaka, koja se ne deformišu (Al_2O_3 , $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, SiO_2). Osim toga, njihove oštre ivice deluju kao koncentratori naprezanja u telu čeličnog proizvoda.

Pored „bisernih“ uključaka veličine od 70 do 120 μm u mestu loma bili su identificirane rastresiti, tamno sivi loptasti uključci prečnika od ~ 6 do ~ 45 μm , sa sužavajućim delovima, koji su imali tenden- ciju odvajanja od osnovne strukture čelika, slika 8.

SEM istraživanja distribucije elemenata u identificiranim nemetalnim uključcima ove vrste pokazala su da se radi o uključcima sa oksidnim jezgrom, koje je zatvoreno sulfidnom oblogom velike debljine i predstavlja suštinski deo uključka slike 9 i 10.



Slika 8. Nemetalan uključak sa sužavajućim delovima unutar osnovne strukture čelika

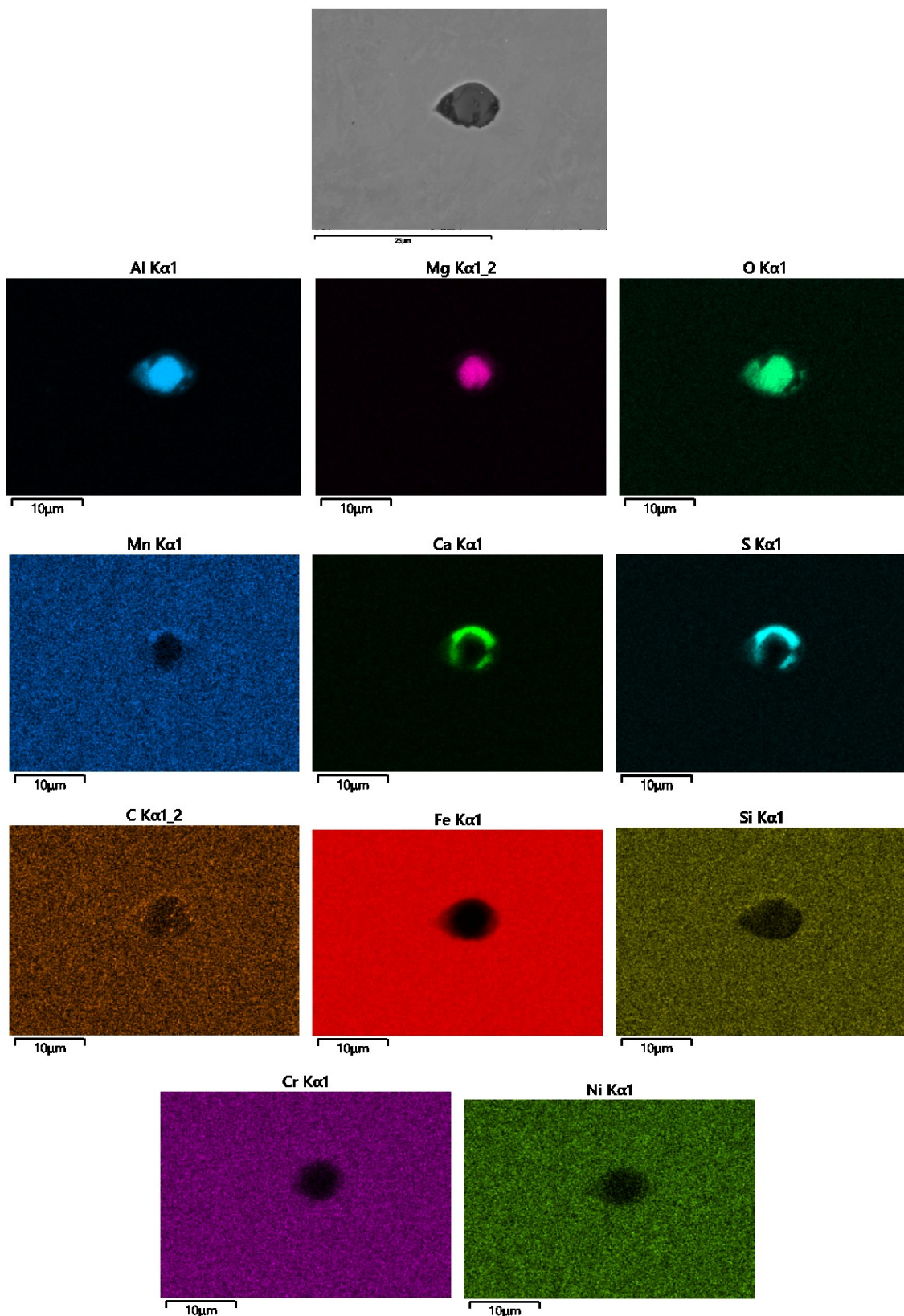
Figure 8. Non-metallic inclusion with tapering parts within the basic steel structure

Nemetalni uključci ove vrste poznati su kao kalcijum aluminati ($m\text{CaO}\cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$), koji su nastaju u toku sekundarne obrade čelika silikokalcijumom (CaSi). Ovaj tretman je neophodan radi pretvaranja Al_2O_3 i $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ sa oštrim ivicama, u toku dezoksidacije čelika aluminijumom, u loptaste, tečne kalcijum aluminat sa relativno niskom temperaturom topljenja. Nakon obrade rastopa silikokalcijumom, udeo kalcijuma u sastavu uključka još više se povećava. Takođe, i sadržaj sumpora se izuzetno povećava. Kalcijum aluminati ne stvaraju klastere i raspoređuju se u osnovnoj strukturi čelika uglavnom homogeno. Obrada

kalcijumom poboljšava karakteristike nastalih uključaka oksida na bazi kalcijuma, kao što su sastav, veličina, fizička i hemijska svojstva, kao i efekat podmazivanja između reznog alata i čeličnog komada. Obloga od MnS kao i od $(\text{Mn}, \text{Ca})\text{S}$ poboljšava obradivost čelika [21,27,28].

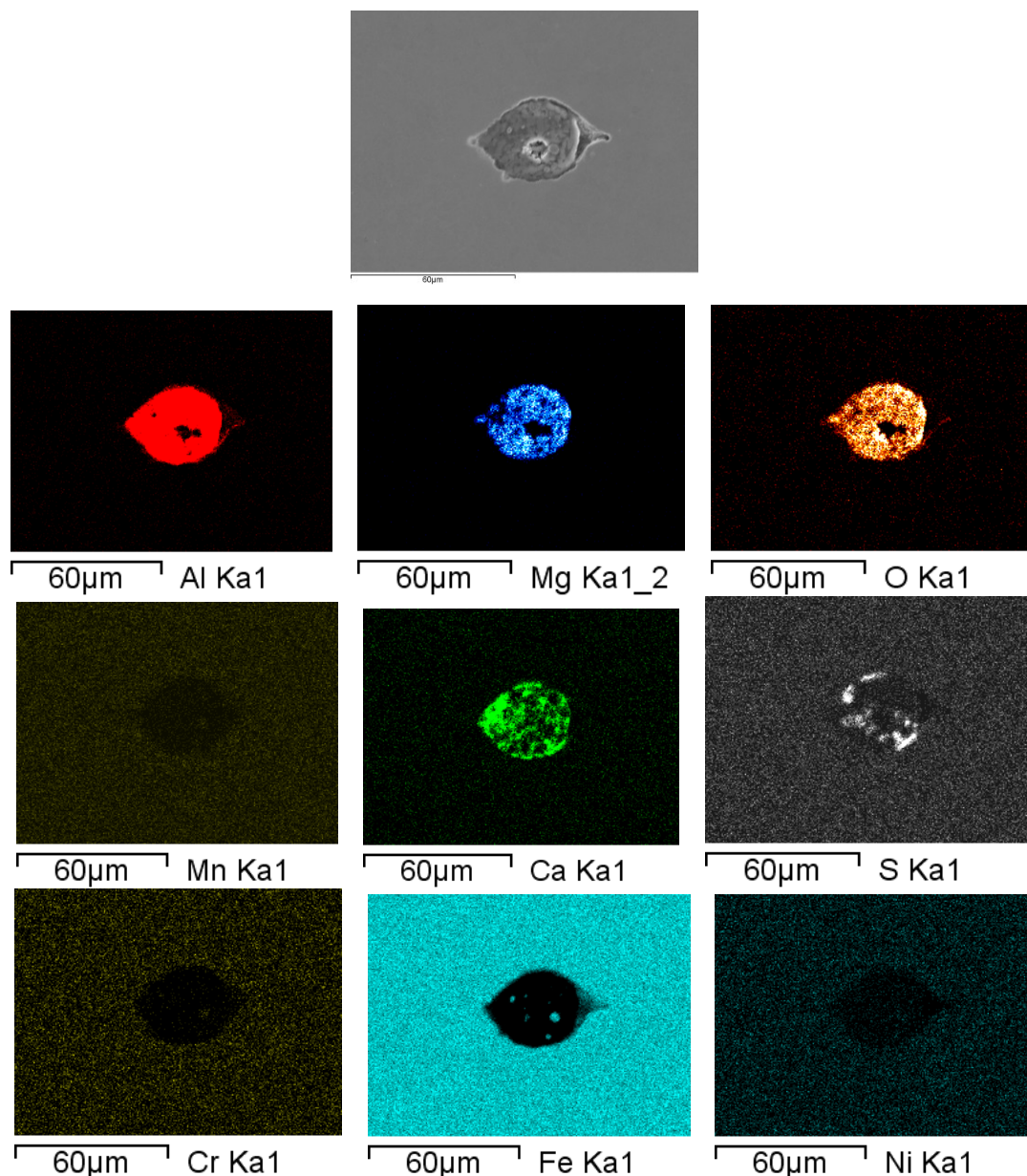
Kalcijum aluminati imaju tvrdoću od 1000 do 2200 HV [29] i ne deformišu se u toku plastične prerade čelika, što dovodi do nastajanja neravnomernog višeosnog naponskog stanja i velikih naprezanja u njima i u osnovnoj strukturi čelika. U trofaznim uključcima, kao što kalcijum aluminati, u kojima je oksidno jezgro okruženo sulfidnom oblogom, koja ima mnogo veći koeficijent termičkog širenja od osnovnog dela oksida, moguće je kompenzovati štetna zaostala naprezanja, koja nastaju usled postojanja oksidnih delovaa uključka. Koheziona povezanost unutarašnjih međufaznih granica u nemetalnim uključcima zavisi od podudaranja kristalnih rešetki, čvrstoće i plastičnih karakteristika ovih faza, kao i uslova opterećenja itd. Naprezanja koja deluju sa strane osnovne strukture čelika troše se na deformaciju plastične faze (sulfidne obloge), koja ne čini otpor protoku osnovne strukture metala i lako se deformiše, što smanjuje naprezanja koja deluju na nedeformabilnu fazu. Plastična deformacija može dovesti do razaranja meke sulfidne obloge (170 HV [30]), što doprinosi stvaranju diskontinuiteta na granici raspodela uključak-osnovna struktura čelika [31].

Razlike naprezanja tečenja vode do vertikalnih opterećenja i pritiska koji se javlja kao posledica toga opterećenja između nemetalnog uključka i osnovne strukture čelika uz stvaranje naprezanja na zatezanje u horizontalnom pravcu [32]. Nastala naprezanja omogućavaju plastičnu deformaciju osnovne strukture čelika okolo kalcijum aluminata i narušavanje njihove međusobne povezanosti [33]. Zbog visokog stepena deformacije tokom vrućeg oblikovanja, osnovna struktura čelika se odvaja od uključka i teče iznad i ispod nedeformabilnog uključka u pravcu paralelnom deformaciji i naprezanju, što dovodi do nastajanja konusnih mikrošupljina u zoni ekvatora nemetalnog uključka, koja je poznata pod naslovom „diamond-shaped cavity“ [34]. Nastala mikrošupljina dovodi do daljeg povećanja naprezanja, a njezine oštre ivice iniciraju nastajanje pukotina usled zamora.



Slika 9. Distribucija elemenata u kalcijum aluminatu precnikom $\sim 6 \mu\text{m}$: unutar – mešoviti oksida (Al, Mg, Ca) (O), sa spoljne strane – sulfidna obloga (Mn, Ca) (S). SEM/EDX-Mapping

Figure 9. Distribution of elements in calcium aluminate with a diameter of $\sim 6 \mu\text{m}$: inside - mixed oxides (Al, Mg, Ca) (O), on the outside - sulfide coating (Mn, Ca) (S). SEM / EDX-Mapping



Slika 10. Distribucija elemenata u kalcijum aluminatu prelnika $\sim 45 \mu\text{m}$: unutar – mešoviti oksida (Al, Mg, Ca) (O), sa spoljne strane – sulfidna obloga (Mn, Ca) (S). SEM/EDX-Mapping

Figure 10. Distribution of elements in calcium aluminate of $\sim 45 \mu\text{m}$ diameter: inside - mixed oxides (Al, Mg, Ca) (O), on the outside - sulfide coating (Mn, Ca) (S). SEM / EDX-Mapping

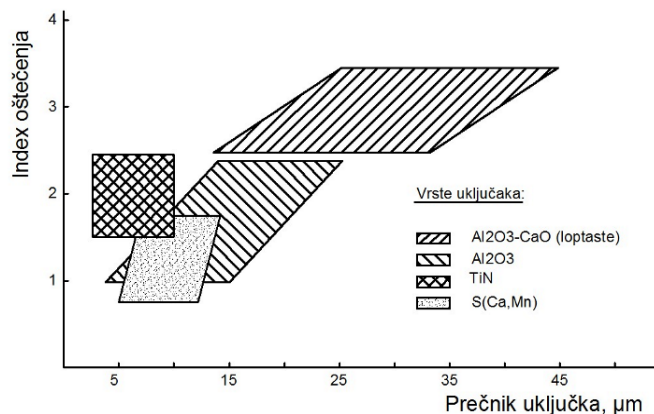
U čeliku, nemjenjenom za plastičnu preradu, ova vrsta uključaka je najopasnija, slika 11 [35], i ona je odgovorna za nastajanje i širenje pukotine, koja dovodi do loma proizvoda.

U dodiru sa agresivnim medijama kalcijum aluminati mogu delovati kao izvor lokalne korozije, kao rezultat rastvaranja sulfidnih komponenata nemetalnih uključaka [36].

Uticaj nemetalnih uključaka na lom (razaranje) mehanički opterećenih čeličnih proizvoda zavisi od:

- veličine i oblika uključaka

- koherentnosti uključaka i osnovne strukture čelika (potpuna, delimično koherentna, nekoherentna)
- koeficijenta termičkog širenja, elastičnih i plastičnih osobina uključaka i osnovne strukture čelika
- udela, broja, zapremine i rasporeda uključaka
- rastojanja između uključaka
- udaljenosti uključaka od granice zrna
- udaljenosti uključaka od površine proizvoda.



Slika 11. Relativni štetni uticaji različitih vrsta nemetalnih uključaka [35]

Figure 11. Relative harmful effects of different types of non-metallic inclusions [35]

Iako se u čeličnom proizvodu nalazi više različitih strukturnih grešaka, koja bi mogle delovati kao potencijalni inicijatori nastajanja pukotina i daljeg razaranja [37], praksa je pokazala, da obično samo jedan od njih predstavlja uzrok razaranja proizvoda. Međutim to ne isključuje mogućnosti nastajanja višeg broja (mikro)pukotina u toku prethodnih opterećenja, koja bi mogla u toku zajedničkog rasta i zajedničkog delovanja sa drugim vrstama strukturnih grešaka metala kao što mikro-pukotine, mehurić itd. dovesti do razaranja čeličnog proizvoda.

5. ZAKLJUČAK

U radu je pomoću detaljne metalografske analize vrste, rasporeda i veličine uključaka i njihovog uticaja na mehaničke karakteristike materijala, analiziran lom mehanički opterećenih čeličnih proizvoda.

Pored toga, objašnjen je i mehanizam loma, koji uključuje u sebe i različite mikrostrukturne detalje koji se odnose na svojstva prisutnih uključaka u materijalu i na njihov uticaj na mehaničke osobine toga materijala, posebno njegovu zateznu čvrstoću.

6. LITERATURA

- [1] M.C.Flemings (1974) Solidification Processing. McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- [2] H.Ono, K.Nakajima, R.Maruo, S.Agawa, T.Usui (2009) Formation Conditions of Mg_2TiO_4 and $MgAl_2O_4$ in Ti-Mg-Al Complex Deoxidation of Molten Iron. ISIJ International, 49 (7), 957-964.
- [3] V.A.Mchedlishvili (1974) Thermodynamic and Kinetic of Steel Deoxidation. Metallurgy, Moscow.
- [4] V.I.Yavoysky, S.A.Bliznyukov, A.F.Vishkarev, L.S.Gorohov, S.F.Hohlov, A.V. Yavoysky (1979) Inclusions and Gases in Steels. Metallurgy, Moscow.
- [5] S.Abraham, R.Bodnar, J.Raines (2014) Inclusion Engineering and the Metallurgy of Calcium Treatment. Iron and Steel Technology, 11 (7), 57-69.
- [6] H.Yin, H.Shibata, T.Emi, M.Suzuki (1997) "In-Situ" Observation of Collision, Agglomeration and Cluster Formation of Alumina Inclusions Particles on Steel Melts. ISIJ International, 37 (10), 936-945.
- [7] W.Tiekink (2014) Initial Alumina Formation: Some Additional Thoughts Based on Laboratory and Steel Plant Findings. Iron and Steel Technology, 11(8), 294-297.
- [8] L.Zhang, B.G.Thomas (2006) State of the Art in the Control of Inclusions during Steel Ingot Casting. Metallurgical and Materials Transactions B, 37(5), 733-761.
- [9] H.Yin, H.Shibata, T.Emi, M.Suzuki (1997) Characteristics of Agglomeration of Various Inclusion Particles on Molten Steel Surface. ISIJ International, 37(10), 946-955.
- [10] Y.Ohkomori, I.Kitagawa, R.Shinozuka, T.Toriyama, K.Matsuda, Y.Murakami (1990) Effects of Nonmetallic Inclusions and Small Surface Pits on the Fatigue Strength of a High Strength Steel at Two Hardness Levels. Mechanical Working and Steel Processing, proceedings, p. 41-49.
- [11] H.J.Böhmer (1994) Decisive for Rolling Fatigue: Structural Weaknesses. Materialprüfung, 36 (1-2), 16-20.
- [12] K.Burkart (2009) Roll-Over Service Life of the Bearing Steel 100Cr6 as a Function of Non-Ideal Microstructures with Particular Emphasis on Carbide Line, Dr.-Ing. thesis, University of Bremen, Bremen, Germany.
- [13] I.P.Volchok (1993) Resistance to the Destruction of Steel and Cast Iron. Metallurgy, Moscow.
- [14] M.Vormwald (2003) Fatigue Cracks: Initiate at Microstructural Defects. MP Materials Testing, 45(3), 92-99.
- [15] V.I.Yavoysky, J.I.Rubenchik, A.P.Okenko (1980) Nonmetallic Inclusions and Steel Properties. Metallurgy, Moscow.
- [16] D.Broek (1974) Elementary Engineering Fracture Mechanics. Noordhoff International Publishing, Leyden, The Netherlands.
- [17] D.Brooksbank, K.W.Andrews (1972) Stress Fields around Inclusions and their Relation to mechanical Properties. Journal of the Iron and Steel Institute, 210 (4), 246-255.

- [18] K.W.Andrews, D.Brooksbank (1972) Stress associated with inclusions in steel: a photoelastic analogue and the effects of inclusions in proximity, Journal of the Iron and Steel Institute, 210 (6), 765-776.
- [19] G.I.Belchenko, S.I.Gubenko (1980) Non-metallic inclusions and steel quality. Tehnika, Kiev.
- [20] Y.A.Shulte (1970) Electrometallurgy of steel casting. Metallurgy, Moscow.
- [21] N.Ånmark, A.Karasev, P.G.Jönsson (2015) The Effect of Different Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Steels. Materials, 8, 751-783.
- [22] G.Arth (2013) Development of steel-ceramic bonds with reduced density. Dr. mont. thesis, Montanuniversität Leoben, Leoben, Austria.
- [23] X-J.Chen, V.V.Struzhkin, Z.Wu, M.Somayazulu, J. Qian, S.Kung, A.N. Christensen, Y.Zhao, R.E. Cohen, H-k.Mao, R.J.Hemley (2005) Hard Superconducting Nitrides. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 102(9), 3198-3201.
- [24] Y.V.Grdina, G.M.Tov, G.M.Minkina (1969) Internal Stresses in the Steel Around Nonmetallic Inclusions. Izvestiya Vuz'ov. Chernaya Metallurgiya, 2, 102-105.
- [25] A.B.Kuslicki (1976) Nonmetallic Inclusions and Fatigue of Steel. Tehnika, Kiev.
- [26] J.Lietzau (2010) Analysis of Non-Metallic-Inclusions in Steel by SEM/EDS Experience with the Technique as Applied to the Plain Carbon Steel Cf53 (1.1213). Practical Metallography, 47(12), 700-718.
- [27] H.K.Tönshoff, W.Kaestner, R.Schnadt (1989) Metallurgical effects of calcium treatment of molten steel machinability. Stahl und Eisen, 109(13), 651-660.
- [28] A.Kirsch-Racine, A.Bomont-Arzur, M.Confente (2007) Calcium treatment of medium carbon steel grades for machinability enhancement: from theory to industrial practice. Revue de Métallurgie, 104(12), 591-597.
- [29] W.Bleck (2001) Steel materials science for study and practice, Publishing company Mainz.
- [30] P.I.Litvinova, V.P.Pirozhkova, A.K.Petrov (1972) Petrography of Non-metallic Inclusion. Metallurgy, Moscow.
- [31] P.Juvonen (2004) Effects of non-metallic inclusions on a fatigue properties of calcium treated steels. Dr. sc. techn. thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- [32] C.Luo (2001) Modeling the Behavior of Inclusions in Plastic Deformation of Steels. Dr. thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [33] D.Schwerdt (2011) Resistance to Vibration and Damage of the Aluminium Alloys EN AW-6056 and EN AW-6082 as well as of the Tempering Steel 42CrNiMo4 at Very High Number of Cycles, Dr.-Ing. thesis, Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Germany.
- [34] P.H.Frith (1955) Fatigue Tests on Rolled Alloy Steels Made in Electric and Open-Hearth Furnaces. Journal of the Iron and Steel Institute, 180(1), 26-33.
- [35] J.Monnot, B.Heritier, J.Y.Cogne (1988) Relationship of Melting Practice, Inclusion Type, and Size with Fatigue Resistance of Bearing Steels. In: Effect of Steel Manufacturing Process on the Quality of Bearing Steels. Ed. J.J.C. Hoo: ASTM STP 987, USA, p.149-165.
- [36] A.Y.Kazankov, A.I.Zeitsev, I.G.Rodionova, S.V.Stukalin, D.N.Chigasov (2013) Investigation of the transformation of nonmetallic inclusions in the process of ladle processing of low-alloy pipe steel. In: Scientific and technical progress in ferrous metallurgy. Cherepovets. Russia, p.138-144.
- [37] O.Myronova (2020) Influence of Various Structural Micro-Defects on the Fracture of Cyclically Stressed Components Revisited. Materials Testing, 62(4), 429-433.

ABSTRACT

INFLUENCE OF NON-METALLIC INCLUSIONS ON THE DESTRUCTION OF MECHANICALLY LOADED STEEL PRODUCTS

The paper describes in detail the reasons for the cracking of steel products, despite the fact that all the conditions of mechanical loading were met - the working stresses were much less than the maximum tensile stress of the applied type of steel. Deep metallographic analysis, as well as stress analysis show that the main cause is the formation of non-metallic inclusions in the material of the product, which essentially change its mechanical characteristic.

Keywords: non-metallic inclusions, steel rollers, mechanical fracture, thermal expansion coefficient, metallographic tests

Scientific paper

Paper received: 11. 02. 2021.

Paper accepted: 17. 03. 2021.

Paper is available on the website: www.idk.org.rs/journal