

***ZNAČAJ I POTREBA METALOGRAFSKIH ISPITIVANJA KVALITETA
MATERIJALA U CILJU OSIGURANJA KVALITETA PROIZVODA***

***SIGNIFICANCE AND NECESSITY OF METALLOGRAPHIC TESTING
OF MATERIAL QUALITY IN ORDER TO ENSURE PRODUCT QUALITY***

v.prof.dr. Belma Fakić, viši naučni saradnik
Univerzitet u Zenici
Institut „Kemal Kapetanović“ u Zenici, Travnička cesta 7, 72000 Zenica

Mr.met.mat. Adisa Burić, viši istraživač saradnik
Edib Horoz, dipl.inž.mat.
Univerzitet u Zenici
Institut „Kemal Kapetanović“ u Zenici, Travnička cesta 7, 72000 Zenica

REZIME

Poznavanje određenih svojstava materijala ima veoma veliki utjecaj na dizajniranje proizvoda i njegovu primjenu. Dizajniranje materijala i proizvoda u cilju zadovoljavanja određenih specifikacija ostvaruje se kroz ispitivanje hemijskih, tehnoloških, mehaničkih i fizikalnih svojstava. Kontrola kvaliteta proizvoda u toku eksploatacije i procjena preostalog životnog vijeka je od ogromnog značaja za rad postrojenja i konstrukcija. Poznavanje veze između načina proizvodnje, hemijskog sastava, procesa mehaničke obrade, mikrostrukture i mehaničkih svojstava kod izbora materijala je bitno za zadovoljenje tehničkih specifikacija dizajna proizvoda i konstrukcione komponente. U ovom radu su navedeni samo neki primjeri metalografskih ispitivanja i njihov značaj na kvalitet proizvoda.

Ključne riječi: uzorak, mikrostruktura, metalografska ispitivanja, čelik

SUMMARY

Knowledge of certain material properties has a great influence on product design and its application. Designing materials and products in order to meet certain specifications is achieved through testing of chemical, technological, mechanical and physical properties. Product quality control during exploitation and assessment of remaining life is of great importance for the operation of plants and constructions. Knowledge of the connection between the method of production, chemical composition, mechanical processing, microstructure and mechanical properties in the selection of materials is essential for meeting the technical specifications of product design and structural components. In this paper, only some examples of metallographic tests and their importance on product quality are listed.

Key words: sample, microstructure, metallographic tests, steel

1. UVOD

Metalografija je nauka o metalima koja izučava zavisnost između strukture i svojstava metala i legura. Obuhvata tehnike rezanja, brušenja i poliranja uzoraka za ispitivanje, ispitivanja

pripremljene površine primjenom svjetlosnih i skenirajućih mikroskopa te interpretaciju uočenih stanja ispitne površine uzorka.

2. PRIPREMA UZORAKA

Važan korak u metalografskom ispitivanju je priprema uzoraka. Odgovarajućom pripremom ispitne površine se osigurava dobivanje korektnog rezultata ispitivanja. Priprema uzorka obuhvata uzorkovanje, rezanje, brušenje, poliranje i nagrivanje. Pravilan izbor uzorka iz dostavljenog ispitnog komada i odgovarajuća priprema površine uzorka osigurava statistički pouzdan opis kvaliteta materijala.

Pri izboru uzorka za ispitivanje treba se voditi računa o broju, lokaciji i orijentaciji površine za ispitivanje. Rezanje, brušenje i poliranje uzoraka su koraci pripreme ispitne površine sa ciljem dobivanja ogledalasto glatke i sjajne površine. Prilikom pripreme ne smiju se stvoriti defekti površine koji bi mogli uzrokovati pogrešno tumačenje stanja ispitne površine.

Rezanje uzoraka provodi se dijamantskom reznom pločom kojom se dobiva ispitna rezna površina bez grubih riseva. Brušenje ispitne površine provodi se na brusnom papiru na kom su nanešene čestice SiC, i to od papira veće do finije gradacije (180SiC, 240SiC, 400SiC, 600SiC do 1000SiC). Poliranje ispitne površine provodi se na odgovarajućim platnima uz nanošenje dijamantske suspenzije i lubrikanta. Dijamantska suspenzija koja se koristi je najčešće gradacije 9 i 6 mikrona za grubo poliranje, te 3 i 1 mikron za fino, završno poliranje.

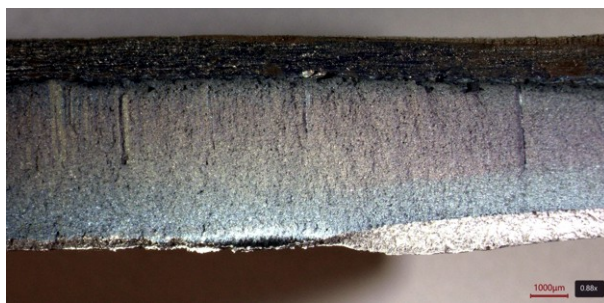
Poslije svakog koraka ispitna površina se pere pod mlazom vode, vatom i sa deterdžentom za suđe.

3. ISPITIVANJE ČISTOĆE

U poliranom, nenagriženom stanju ispituje se prisustvo poroznosti i nemetalnih uključaka. Prisustvo poroznosti i nemetalnih uključaka utječe na mehanička svojstva, jer njihovo prisustvo prekida metalnu vezu u materijalu.

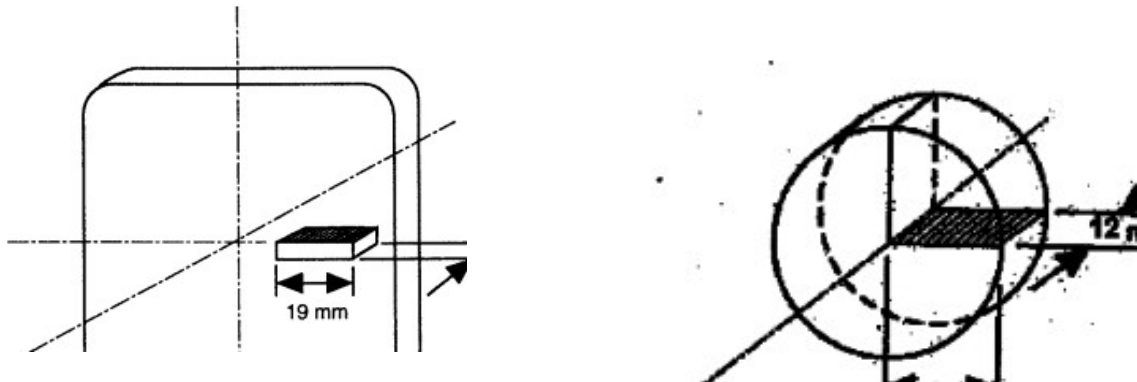
Za određivanje stepena čistoće metalnih legura, sačinjeni su različiti uporedni nizovi za poređenje uključaka troske, koji omogućavaju da se brojno odrede količina i raspodjela nemetalnih uključaka. Pri ocjeni sadržaja nemetalnih uključaka treba praviti razliku između uključaka koji se mogu plastično deformisati i krutih, zrnastih uključaka. U plastične uključke se ubrajaju sulfidi, ali i poneki silikati, dok krute uključke čine oksidi i većim delom kompleksni silikati [1].

Ocjena makro nemetalnih uključaka u čeliku provodi se pri povećanjima do 50 puta, primjenom stereo svjetlosnog mikroskopa. Izgled makro nemetalnih uključaka u čeliku dat je na slici 1. Ocjena stanja materijala vezano za prisustvo makro nemetalnih uključaka provodi se u skladu sa standardom BAS ISO 3763:1999. Makro nemetalni uključci negativno utječu na hladnu preradu metala jer mogu dovesti do pojave pukotina [2].



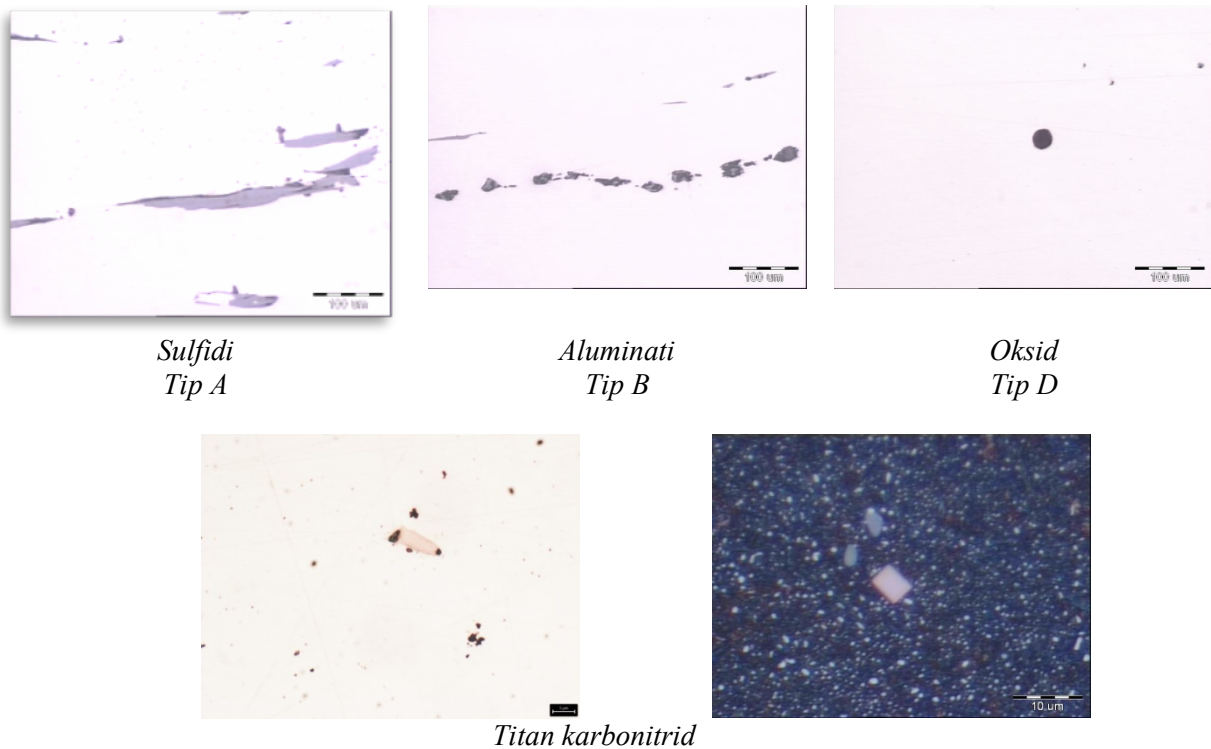
Slika 1. Plavi lom, makro nemetalni uključci [3]

Lokacija uzimanja uzoraka za ispitivanje sadržaja mikro nemetalnih uključaka zavisi od dimenzija reprezentativnog uzorka, što je dato standardom za ispitivanje BAS EN ISO 4967. Ispitna površina koja se posmatra na svjetlosnom mikroskopu je uzdužna, odnosno paralelna sa smjerom plastične prerade. Na slici 2. je dat izgled lokacije uzorka za ispitivanje sadržaja nemetalnih uključaka.



Slika 2. Uzorkovanje za ispitivanje sadržaja nemetalnih uključaka [4,5].

Ocjena sadržaja nemetalnih uključaka provodi se poređenjem sa referentnim skalama datim u međunarodnom standardu BAS ISO 4967:2014. Primjer izgleda mikro nemetalnih uključaka u čeliku dat je na slici 3.



Slika 3. Izgled nemetalnih uključaka u čeliku [3]

Sulfidni nemetalni uključci se prilikom plastične deformacije izdužuju u nizove koji prate tok deformacije [6], dok su aluminatni nemetalni uključci krti i u toku mehaničke prerade se lome.

Uključci se mogu razlikovati po nivou sive boje i obliku primjenom svjetlosnog mikroskopa, a njihov tačan hemijski sastav i kristalografija mogu se detaljnije odrediti elektronskim mikroskopom.

Nemetalni uključci su prisutni u svim vrstama čelika i srodnih legura u većoj ili manjoj mjeri i mogu biti endogeni i egzogeni. Endogeni uključci nastaju u čelicima kao rezultat metalurških reakcija koje se odvijaju unutar tečne taline, kao i između hemijskih spojeva prisutnih u čeliku dok se hladi i stvrdnjava. Ove reakcije se mogu dogoditi s legirajućim elementima, plinovima ili s nečistoćama unesenim iz recikliranog materijala.

Egzogeni uključci u čelik dopijevaju spolja iz komada vatrostalnih obloga, troske i šljake s kojima rastopljeni čelik dolazi u kontakt. Ovi uključci su nepravilnog oblika i složene strukture [6,7,8].

Nemetalni uključci mogu biti oksidi, sulfidi, silikati, aluminati, nitridi ili brojni drugi nemetalni spojevi, a svaki uključak može sadržavati više različitih faza. Uprkos tome što nemetalni uključci čine mali dio ukupne zapremine čelika, oni imaju veliki utjecaj na mehanička svojstva. Uključci mogu imati pozitivne efekte (npr. poboljšanje obradivosti u čelicima za obradu na automatima koji su legirani sumporom u cilju olakšavanja mašinske obrade i lakšeg kidanja strugotine), ali mnogo češće imaju negativne efekte.

Štetni efekti koje uzrokuje prisustvo nemetalnih uključaka uključuje pogoršavanje mehaničkih svojstava i smanjenje dinamičke žilavosti loma, smanjenu apsorpciju utrošene energije udara i smanjenu lokalnu otpornost na koroziju, što određivanje vrste, sadržaja i distribucije uključaka čini ključnim za osiguranje dobrih performansi materijala i proizvoda u eksploataciji.

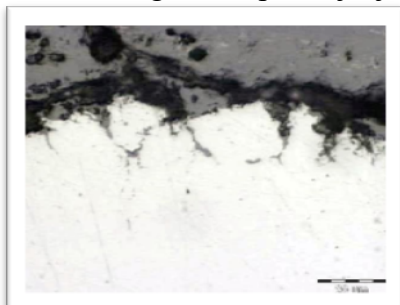
Nemetalni uključci pogoršavaju i zavarljivost, magnetnu permeabilnost, električnu provodljivost jer narušavaju kontinuitet metalne osnove i mogu biti inicijalna mjesta za nastanak pukotina.

4. ZNAČAJ STANJA MIKROSTRUKTURE LEGURA ŽELJEZA

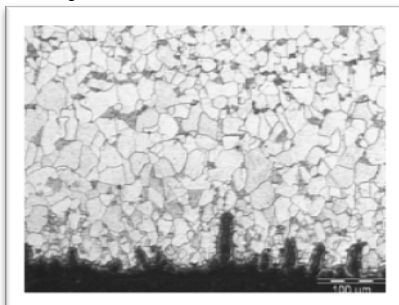
Najvažniji aspekt stanja materijala je mikrostruktura koja je posljedica hemijskog sastava, procesa proizvodnje, mehaničke prerade i termičke obrade. Stanje mikrostrukture materijala je odlučujuće za njegova upotrebna svojstva. Posmatranje mikrostrukture provodi se nakon nagrizanja ispitne površine uzorka. Za otkrivanje mikrostrukturnih konstituenata biraju se različiti reagensi što zavisi od toga koji se materijal ispituje i šta je predmet ispitivanja. Poznato je nagrizanje granica zrna, površinsko nagrizanje, termičko nagrizanje postupkom bojenja, elektrolitičko te duboko nagrizanje.

Promjene stanja materijala u eksploatacionim uslovima i utvrđivanje preostalog životnog vijeka komponente može se utvrditi kroz promjene stanja mikrostrukture.

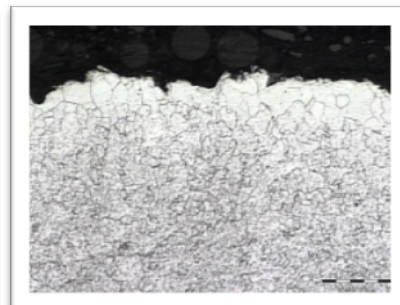
Izgled mikrostrukturnih promjena na zidovima cijevi koje su bile u dugotrajnoj eksploataciji u termoenergetskim postrojenjima dat je na slici 4.



Prodor oksida na vanjskom zidu cijevi, do nekoliko desetina mikrona



Prodor oksida na unutrašnjem zidu cijevi

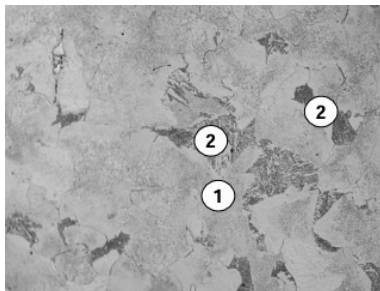


Razugljeničenje na vanjskom zidu cijevi

Slika 4. Izgled mikrostrukturnih promjena na zidovima cijevi [9]

Značajan prodor oksida na zidovima cijevi smanjuje zdravi dio stijenke cijevi i time smanjuje preostali životni vijek komponente postrojenja. Prisutno razugljeničenje na zidovima cijevi ukazuje da je komponenta bila izložena povišenim temperaturama, da ugljik u relativno kratkom vremenu pređe znatna rastojanja u čeliku i da dođe do pojave razugljeničenja. Cementit se razlaže, a ugljik iz cementita se oksidiše u CO ili CO₂ i odlazi u okolnu atmosferu [6].

Promjena stanja mikrostrukture nakon dugotrajne eksploatacije u termoenergetskim postrojenjima dat je na slici 5.



Mikrostruktura ferit, karbidi (1) i beinit (2), stanje isporuke



Promjena stanja mikrostrukture nakon više od 70 000 radnih sati

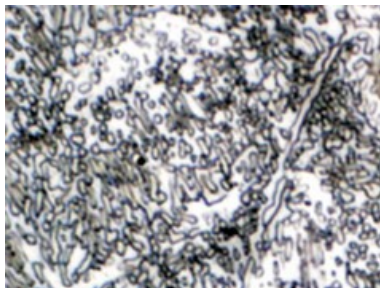


Promjena mikrostrukture nakon više od 150 000 radnih sati

Slika 5. Izgled mikrostrukturnih promjena čelika 14MoV63 [10, 11]

Promjena stanja mikrostrukture nastala kao posljedica dugotrajnog izlaganja povišenim temperaturama i pritisku, dovela je do razlaganja beinita i pojave naprednog oštećenja usljed puzanja, lanaca kavita (šupljina) i razdvajanja po granicama zrna.

Značajno svojstvo čelika za kotrljajuće ležajeve koji je u svakodnevnoj upotrebi a otkriva se metalografskim ispitivanjem je veličina i raspored karbida koji se formiraju u ovom materijalu. Na slici 6. je dat izgled veličine i rasporeda karbida u čeliku 100Cr6 koji se najčešće koristi za kotrljajuće ležajeve. Ocjena stanja materijala za kotrljajuće ležajeve se provodi u skladu sa standardom BAS ISO 5949.



Veličina karbida, skala 2, nagriženo 2% HNO₃



Skala 5, nagriženo 10% HNO₃



Skala 6, nagriženo 10% HNO₃

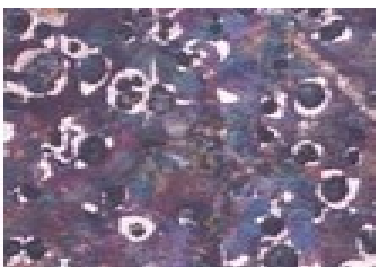
Slika 6. Izgled veličine i rasporeda karbida za čelik 100Cr6 [12]

Pored čelika, značajno ispitivanje u metalografskom laboratoriju provodi se i na odlivcima u cilju otkrivanja stanja mikrostrukture liva, veličine, oblika i rasporeda grafita u sivom i nodularnom livu, prema standardu BAS EN ISO 945-1. Na slici 7. je dat izgled veličine, oblika i rasporeda grafita u nodularnom livu koji se koristi za izradu kočionih pločica u liftovima. Kočione pločice u sistemu kakav je lift, imaju veoma bitnu ulogu, a samim tim i materijal od koga su pločice izrađene [13].

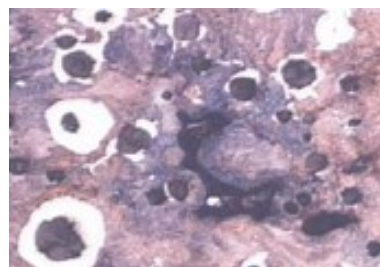
Razlika u procentualnom udjelu ferita i perlita u prikazanim uzorcima, kao i različit procenat nodulacije i pojava mikropora u odlivcima, ukazuju na različit kvalitet pločica i potrebu za svakodnevnom kontrolom kvaliteta materijala.



*Nodularni grafit,
10%V+90%VI, veličine 6,
učešće ferita u strukturi 40%*



*Nodularni grafit,
5%IV+10%V+85%VI, veličine
7, učešće ferita u strukturi 15%*



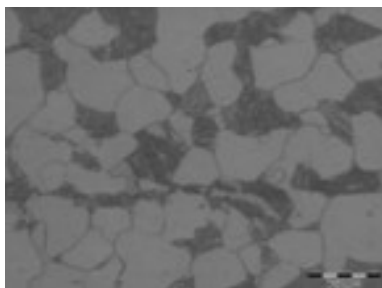
*Nodularni grafit, prisustvo
mikropora u odlivku*

Slika 7. Izgled veličine, oblika i rasporeda grafita za nodularni liv EN-GJS-600-3 (GGG-60) [13,14]

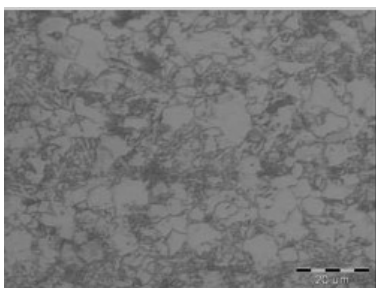
Ispitivanje zavarenih spojeva u cilju kvalifikacija postupaka zavarivanja prema BAS EN ISO 15614 i kvalifikacija radnih proba prema EN ISO 15613 provodi se metalografskim ispitivanjima makrostrukture i mikrostrukture zona zavarenog spoja. Na slici 8. je dat izgled makrostrukture jednog višeslojno zavarenog spoja čelika. Zone mikrostrukture zavarenog spoja izrađenog od materijala 13CrMo45 date su slici 9.



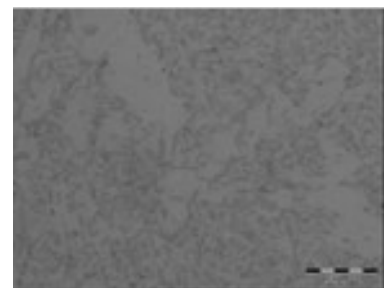
Slika 8. Makrostruktura zavarenog spoja S355J2G3[9]



Osnovni materijal, ferit i perlit



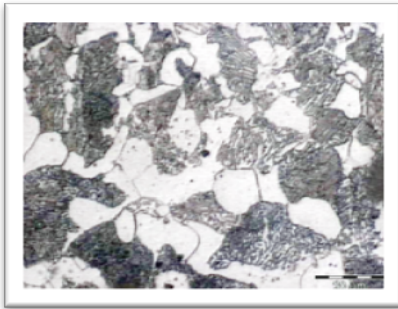
*Zona pod utjecajem toplote,
rekristalizirana ferit, perlit i
beinit*



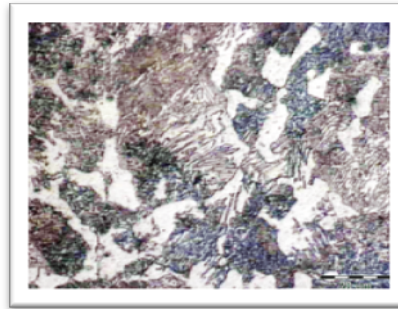
*Metal šava, Livena struktura,
ferit po granicama primarnih
austenitnih zrna+ bainit*

Slika 9. Mikrostruktura zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5, po zonama [15]

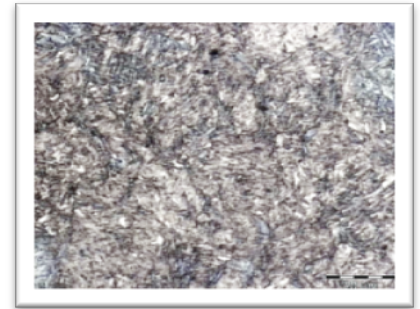
Promjene nastale u mikrostrukturi postupcima termičke obrade čelika su vidljive na metalografskim uzorcima posmatranim pod svjetlosnim mikroskopom. Princip termičke obrade čelika zasniva se na faznoj transformaciji čelika tokom procesa grijanja i hlađenja, a metalografske tehnike ispitivanja su važna eksperimentalna metoda za istraživanje fazne transformacije. Mikrostruktura termički tretiranog ugljeničnog čelika za poboljšanje C60 zagrijanog na 850°C/30 minuta i hlađenog sa tri različite brzine hlađenja dat je na slici 10.



*Hlađeno sa peći, ferit i perlit,
179HV10*



*Hlađeno na zraku, perlit,
203HV10*



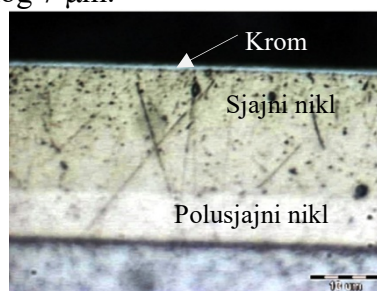
*Hlađeno u ulju, martenzit,
52HRC*

Slika 10. Mikrostruktura termički tretiranog ugljeničnog čelika za poboljšanje C60 [9]

Različitim brzinama hlađenja u materijalu istog hemijskog sastava moguće je postići različite mikrostrukture što utiče na različite vrijednosti tvrdoće, od 179 Vikersa do preko 500 Vikersa, čime se određuju mogućnosti primjene određenog materijala.

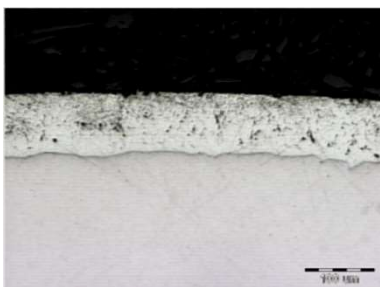
5. ZNAČAJ ODREĐIVANJE KVALITETA I DEBLJINE ZAŠTITNIH SLOJEVA

Veoma važno svojstvo materijala koji se koristi u auto-moto industriji je zaštita površine od korozije. Danas se koriste dvije vrste kromiranja pomoću šesterovalentnog i trovalentnog kroma na nehrđajućem čeliku. Trovalentni krom ima 300 puta manja štetna dejstva pri procesu proizvodnje od šesterovalentnog koji se do sada koristio kao nanos na plastici u unutrašnjosti vozila i nekim elementima koji dolaze u dodir sa ljudskim rukama. Izgled mikrosnimaka debljine nanosa slojeva dat je na slici 11. Debljina nanosa kroma je manja od 10 µm, dok je debljina nanosa sjajnog nikla 17 µm a polusjajnog 7 µm.

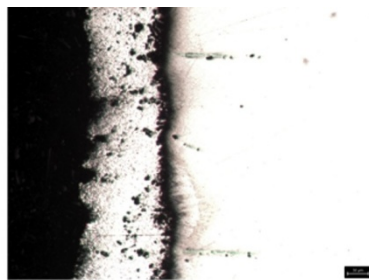


Slika 11. Debljina nanosa slojeva kroma i nikla [16]

Veliki broj komponenti u izgradnji autocesta zahtijeva ugradnju pocinčanih elemenata (ankeri, vijci, cijevi za saobraćajne znakove) koji zahtijevaju nanošenje određene količine cinka u cilju zaštite od atmosferske korozije. Primjer dobro nanešenog sloja cinka koji je dobro prionuo uz metalnu osnovu dat je na slici 12., a na slici 13. dat je prikaz loše nanešenog sloja cinka sa zazorom između metalne osnove i sloja.



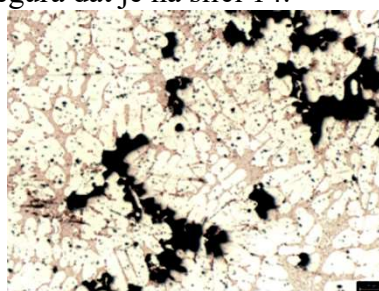
Slika 12. Dobro prionuo sloj cinka [17]



Slika 13. Loše prionuo sloj cinka [18]

6. MJERENJE POROZNOSTI U ODLIVCIMA

Prilikom izrade odlivaka, dolazi do pojave poroznosti u materijalu zbog čega slabe mehanička svojstva. Količina i oblik poroznosti u materijalu definiše se standardom proizvoda. Primjer poroznosti u odlivcima aluminijevih legura dat je na slici 14.



Slika 14. Poroznost, po granicama zrna, dendritima

7. ZAKLJUČAK

Potreba i značaj za primjenom metalografskih ispitivanja koja se svakodnevno provode u cilju otkrivanja stanja materijala, analizi oštećenja komponenti primjenom svjetlosnog mikroskopa predstavljena je u ovom radu. Metalografska ispitivanja se provode na poluproizvodima i gotovim proizvodima tokom procesa proizvodnje kako bi se osiguralo da mikrostruktura proizvoda ispunjava zahtjeve prerade.

Značaj metalografskih ispitivanja u svakodnevnom radu metalnih komponenti je neprocjenjiv, a sve u cilju obezbijeđenja osnove za pouzdanost i dugotrajni vijek trajanja komponenti u radu, te identifikacije uzroka loma i pojedinih kvarova, kao i identifikacija grešaka procesa i materijala.

8. REFERENCE

1. Desimir Marković: FIZIČKA METALURGIJA 1 , UNIVERZITET U BEOGRADU TEHNIČKI FAKULTET U BORU, Bor 2013.
2. Mirko Gojić: Metalurgija čelika, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak 2003.
3. Institut Kemal Kapetanović, Izvještaj o ispitivanju
4. Standard ASTM E 45-18a (R 2023): Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel
5. Belma Fakić, Branka Muminović, Adisa Burić: UZORKOVANJE KAO FAKTOR OBEZBJEĐENJA VALIDNOSTI REZULTATA ISPITIVANJA, 14. Naučno
6. Herman Šuman: Metalografija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1981.
7. Andrew Roiko: Interaction of non-metallic inclusions, microstructure, and fatigue loading with small crack growth in high-strength steels, <https://aaltodoc.aalto.fi/items/ed429332-c049-4844-9445-9908e3cab157> (dostupno 11.09.2025.)

8. Detection, Quantification and Advanced Characterization of Non-metallic Inclusions in Steels ZEISS ZEN core Non-metallic Inclusions, <https://Non-metallic-Inclusions-Steels.pdf&ved> (dostupno 10.09.2025.)
9. <https://ikk.unze.ba/metalografski-laboratorij/> (dostupno 12.09.2025.)
10. Standard VGB Powertech, VGB-S-517- 00-2014. - Guidelines for rating the microstructural composition and creep rupture damage of creep-resistance steel for high pressure pipelines and boiler components and their weld connections, VGB PowerTech e.V.
11. Institut Kemal Kapetanović, Izvještaj o ispitivanju
12. Standard BAS ISO 5949: Alatni čelici i čelici za ležaje - Mikroskopska metoda određivanja rasporeda karbida korišćenjem referentnih mikrofotografija
13. Belma Fakić, Emina Kratina, Adisa Burić: UZAJAMNA ZAVISNOST HEMIJSKOG SASTAVA, MIKROSTRUKTURE I OSOBINA KOD NODULARNOG LIVA, *IX* naučno stručni simpozijum sa međunarodnim učešćem „METALNI I NEMETALNI MATERIJALI: proizvodnja-osobine-primjena“, Zenica, 23. -24.04.2012.
14. Standard BAS EN ISO 945-1: Mikrostruktura lijevanog željeza - Dio 1: Klasifikacija grafita vizualnom analizom
15. Belma Fakić: UTICAJ POSTUPAKA ZAVARIVANJA NA FIZIKO-METALURŠKE KARAKTERISTIKE ČELIKA: S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 U ZONI UTICAJA TOPLOTE, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale, magistarski rad, 2010.
16. Institut Kemal Kapetanović, Izvještaj o ispitivanju