

„ RUDARSTVO 2020“

11. simpozijum sa međunarodnim učešćem

“MINING 2020“

11st Symposium with international participation

ZBORNİK RADOVA

PROCEEDINGS

Hotel „ Fontana “, Vrnjačka Banja
8. - 11. septembar 2020.

ZBORNIK RADOVA / *PROCEEDINGS*
RUDARSTVO 2020 / *PROCEEDINGS*

Organizatori:

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina
Privredna komora Srbije

Izdavač / Publisher

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina

Urednik / Editor

Miroslav Ignjatović

Štampa / Printed by

Akadska izdanja doo, Beograd

Tiraž / Copies

180

Beograd, 2020

NAUČNI ODBOR

prof.dr Ljubiša Andrić, ITNMS, Beograd, dr Miroslav Ignjatović, Privredna komora Srbije;
dr Dragan Radulović, ITNMS, Beograd; prof.dr Grozdanka Bogdanović, Tehnički fakultet;
dr Branislav Marković, ITNMS, Beograd; prof.dr Milena Kostović, RGF, Beograd; prof. dr
Jovica Sokolović, Tehnički fakultet, Bor; prof.dr Predrag Jovančić, RGF, Beograd; dr Slavica
Mihajlović, ITNMS, Beograd; dr Dragana Ranđelović, ITNMS, Beograd; dr Vladimir
Jovanović, ITNMS, Beograd; dr Nevad Ikanović, JP Elektroprivreda BiH; prof.dr Omer Musić,
RGG fakultet, Tuzla; dr Zlatko Dragosavljević, rudnik GROT; dr Milenko Ljubojev, IRM Bor; dr
Zajim Hrvat, JP Elektroprivreda BiH; prof. dr Miodrag Denić, Tehnički fakultet, Bor; Prof.dr
Marina Dojčinović, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd; dr Edin Lapandić, JP
Elektroprivreda BiH; dr Miro Maksimović, RiT „Ugljevik“, Ugljevik; dr Rada Krgović, JP EPS,
Ogranak RB Kolubara; dr Aleksandra Patarić, ITNMS, Beograd; dr Branko Petrović, JP
EPS, Ogranak RB Kolubara; mr Šefik Sarajlić, RMU Đurđevik; dr Jovica Stojanović, ITNMS,
Beograd; dr Dimšo Milošević, RiT „Ugljevik“, Ugljevik; dr Milisav Tomić, JP EPS, Ogranak RB
Kolubara; dr Halid Čičkušić, ZDR „Kreka“, BiH; mr Žarko Nestorović, JPEPS, Ogranak HE
Đerdap; dr Dragan Milanović, IRM Bor; dr Duško Đukanović, JP PEU, Resavica

PROGRAMSKI ODBOR

dr Miroslav Ignjatović, Privredna komora Srbije; Aco Ilić, rudnik Rudnik; dr Dragan
Radulović, ITNMS, Beograd; Jovica Radisavljević, Zijin Bor Copper doo Bor; Saša
Ognjanović, JP PEU, Resavica; Filip Todorović, JP EPS, Ogranak TEKO Kostolac; Borivoje
Stojadinović, IRM Bor; Miloš Đokanović, Alumina Zvornik, R. Srpska; Zoran Vuković, JP EPS;
Nenad Grubin, Rio Sava Exploration; mr Jadranka Vukašinović, JP EPS, Ogranak RB Kolubara
Ivan Filipov, rudnik Kovin; Drago Vasović, rudnik Veliki Majdan

SADRŽAJ / CONTENTS:

Plenarna predavanja / Plenary Presentations

| | |
|---|----|
| PROBLEMATIKA UPRAVLJANJA RUDARSKIM OTPADOM U PODZEMNIM RUDNICIMA UGLJA U SRBIJI / PROBLEMS OF MANAGING OF MINING WASTE IN UNDERGROUND COAL MINES IN SERBIA Zorica Ivković, Dejan Dramlić, Radmila Kotoran, Jelena Trivan | 10 |
| STRATEŠKO ODLUČIVANJE PRI IZBORU NOVIH ROTORNIH BAGERA ZA POVRŠINSKE KOPOVE LIGNITA: PRIMER RUDARSKOG BASENA KOLUBARA / STRATEGIC DECISION IN SELECTION OF NEW BUCKET WHEEL EXCAVATORS FOR OPEN PIT MINES: EXAMPLE FOR KOLUBARA MINING BASIN Predrag Jovančić, Stevan Đenadić, Goran Todorović, Dragan Novaković, Filip Miletić | 15 |
| REZULTATI ISTRAŽIVANJA SISTEMA PROVETRAVANJA RUDNIKA SA PODZEMNOM EKSPLOATACIJOM UGLJA U REPUBLICI SRBIJI / RESULTS OF THE RESEARCH OF VENTILATION SYSTEMS FOR COOL MINE IN THE REPUBLIC OF SERBIA Duško Đukanović | 25 |
| UTICAJ KLIMATSKIH PROMENA NA PROCES BIOLOŠKE REKULTIVACIJE RUDNIČKIH JALIVIŠTA / THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE PROCESS OF BIOLOGICAL RECULTIVATION OF MINING TAILINGS Dragana Ranđelović | 32 |
| UTICAJ KRUPNOĆE MATERIJALA U ULAZNOJ RUDI I PROIZVODU MLEVENJA NA VREDNOST BOND-OVOG RADNOG INDEXA KREČNJAKA "CARMEUSE"-DOBOJ / IMPACT OF SIZE OF THE FEED ORE AND FINES PRODUCED BY GRINDING ON THE VALUE THE BOND WORK INDEX OF LIMESTONE FROM "CARMEUSE" DOBOJ Dragan S. Radulović, Vladimir Jovanović, Ljubiša Andrić, Milan Petrov, Dejan Todorović, Marina Blagojev | 44 |
| SVOJSTVA PVC-a I PLASTIČNIH MATERIJALA I ZNAČAJ NJIHOVE RECIKLAŽE / PVC AND PLASTIC MATERIALS PROPERTIES AND IMPORTANCE OF THEIR RECYCLING Slavica R. Mihajlović, Aleksandra S. Patarić, Nataša, G. Đorđević | 55 |
| ILUSTRACIJA PROCENE PREDNOSTI IMPLEMENTACIJE SISTEMA MENADŽMENTA KVALITETOM U RUDARSKIM ORGANIZACIJAMA / ILLUSTRATION OF THE ADVANTAGE OF THE QUALITY SYSTEM IMPLEMENTATION INTO MINING/METALLURGY ORGANIZATIONS Slavica Miletić, Miroslav Ignjatović | 61 |
| NOVI MULTIFUNKCIONALNI CuAlAg MATERIJALI KOJI PAMTE OBLIK SA PROMENLJIVIM SADŽAJEM ALUMINIJUMA Zdenka Stanojević Šimšić, Ana Kostov, Slavica Miletić, Emina Požega | 70 |

MOGUĆNOST RAZVOJA TEHNOLOGIJA PRERADE BAZALTA
Marko Pavlović 78

Saopštenja / Contributions

ISPITIVANJA ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA U OKOLINI PRENOSNIH TRANSFORMATORSKIH
STANICA I RAZVODNIH POSTROJENJA/
*TESTING OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS IN THE VICINITY OF TRANSMISSION SUBSTATIONS
AND SWITCHYARDS*
Maja Grbić, Aleksandar Pavlović, Miliša Jovanović, Dejan Hrvić, Sandra Petrović,
Saša Ranđelović 85

ZAŠTITA OD EKSPLOZIJE METANA ILI UGLJENE PRAŠINE U UGLJENIM RUDNICIMA JUŽNE
EVROPE NEKAD I SAD / *PREVENT OF THE SPREAD OF A METHANE GAS OR COAL DUST EXPLOSION
IN THE COAL MINES SOUTH EUROPE IN THE PAST AND TODAY*
Predrag Janošević, Mirko Ivković, Mirza Omerhodžić Klaus Schulte 99

REKULTIVACIJA DEGRADIRANOG ZEMLJIŠTA NASTALOG ODLAGANJEM PEPELA I ŠLJAKE U
„ENERGETIKA“ d.o.o. KRAGUJEVAC / *RECVLTIVATION OF DEGRADED LAND CAUSED BY DISPOSAL
OF ASH AND SLAG IN „ENERGETIKA“ d.o.o. KRAGUJEVAC*
Duško Đukanović, Branko Đukić, Nemanja Đokić 109

ZNAČAJ OTVARANJA RUDNIKA “POLJANA” ZA ODRŽAVANJE I RAZVOJ PODZEMNE EKSPLOATACIJE
UGLJA U SRBIJI / *THE IMPORTANCE OF OPENING THE "POLJANA" MINES FOR THE MAINTENANCE
AND DEVELOPMENT OF UNDERGROUND COAL EXPLOITATION IN SERBIA*
Vladimir Todorović, Zorica Ivković, Dražana Tošić 117

TEHNOLOGIJA ZAMENE LEŽAJEVA I SFERNOG LEŽAJA VEŠANJA TRAKE 2 NA ODLAGAČU A2R_sB 7200
(TAKRAF) NA POVRŠINSKOM KOPU UGLJA "DRMNO"
Velimir Spasić, Goran Anđelić, Filip Todorović 125

ANALIZA DISLOKACIJE KONTINUALNOG SISTEMA SA PK „POLJE D“ NA PK „RADLJEVO“ SEVER U
FUNKCIJI KONTINUITETA PROIZVODNJE UGLJA I JALOVINE U KOLUBARSKOM UGLJENOM BASENU
Milan Petrović: Svetolik Simić, Vladan Ivković, Radojica Radojičić, Nebojša Simić 130

KOMPLEKSNOST ZAŠTITE I PRIMJENA SAVREMENIH METODA UPRAVLJANJA I NADZORA SISTEMOM
ODBRANE POVRŠINSKOG KOPA „GACKO“ OD VODA / *COMPLEXITY OF PROTECTION AND
APLICATION OF MODERN METHODS OF MANAGEMENT AND SUPERVISION OVER WATER DEFENCE
SYSTEM OF THE OPEN-CAST- MINE “GACKO”*
Petar Marković, Dušan Govedarica, Aleksandar Ateljević, Ranko Stojanović 137

MOGUĆNOST POVEĆANJA EKSPLOATACIONOG VEKA RUDNIKA
OPPORTUNITIES TO INCREASE THE EXPLOATATION LIFE OF THE MINE
Ivan Filipov 151

| | |
|---|-----|
| <p>PROJEKTOVANE I REALNE MOGUĆNOSTI SEPARACIJE UGLJA U RA "VRŠKA ČUKA" AVRAMICA <i>PROJECTED AND REAL POSSIBILITY OF COAL SEPARATION IN ANTHRACITE COAL MINE "VRŠKA ČUKA" AVRAMICA</i> Jovica Sokolović, Slobodan Mitić, Branislav Stakić, Dejan Ćirić</p> | 161 |
| <p>PROCESNI PRISTUP DOLIVANJU GORIVA MAŠINAMA I VOZILIMA POMOĆNE MEHANIZACIJE, PRAĆENJE NJIHOVE POTROŠNJE I EVIDENCIJA UTOŠKA ENERGENATA NA POVRŠINSKOM KOPU UGLJA "DRMNO" / <i>PROCESS APPROACH TO REFUELING MACHINES AND VEHICLES OF AUXILIARY MACHINERY, MONITORING THEIR CONSUMPTION AND RECORDS OF ENERGY CONSUMPTION AT THE SURFACE COAL MINE "DRMNO"</i> Filip Todorović, Stevan Popović</p> | 162 |
| <p>MONITORING PRIRODNIH RESURSA U ZONI POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE LIGNITA DALJINSKOM DETEKCIJOM Milislav Tomić; Dejan Kurtov; Tomislav Rikanović; Miodrag Tomić; Aleksandar Radosavljević</p> | 167 |
| <p>UTICAJ RUDARSKO-GEOLOŠKIH FAKTORA NA IZBOR MODELA OTKOPAVANJA UGLJENIH SLOJEVA KOMPLEKSNOM MEHANIZACIJOM Halid Čičkušić, Omer Musić, K. Herco</p> | 174 |
| <p>EKOLOŠKI RIZICI I BENEFITI TOKOM GEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA UGLJA, KOLUBARSKI UGLJONOSNI BASEN / <i>ENVIRONMENTAL RISKS AND BENEFITS OF GEOLOGICAL EXPLORATION OF COAL, COAL BASIN KOLUBARA</i> Bogoljub Vučković</p> | 184 |
| <p>ANALIZA MOGUĆIH UTICAJA EKSPLOATACIJE UGLJA U POVRŠINSKOM KOPU POLJE "C" NA ŽIVOTNU SREDINU / <i>ENVIRONMENT FEATURES AND COAL EXPLOITATION IN OPEN PIT "C", KOLUBARA COAL BASIN, WESTERN SERBIA</i> Marina Vučković, Tijana Marinković</p> | 193 |
| <p>USMERAVANJE RUDARSKIH RADOVA U TOKU PROCESA EKSPLOATACIJE UGLJA NA PK „POLJE G“ U CILJU EFIKASNIJE HOMOGENIZACIJE I SMANJENJA EKSPLOATACIONIH GUBITAKA <i>DIRECTING MINING WORKS IN THE PROCESS OF COAL EXPLOITATION IN THE PK "G FIELD", FOR THE EFFECTIVE HOMOGENIZATION AND REDUCTION OF EXPLOITATION LOSSES</i> Slobodan Lalatović</p> | 201 |
| <p>PROMENE KOJE UTIČU NA KVALITET UGLJA TAMNAVA VEZANOG ZA POSTROJENJE ZA PRIPREMU I OBRADU UGLJA SA AUTOMATSKIM UZIMANJEM UZORAKA / <i>CHANGES AFFECTING THE QUALITY OF TAMNAVA COAL RELATED TO COAL PREPARATION AND TREATMENT PLANT WITH AUTOMATIC COAL SAMPLING</i> Rada Krgović, Jadranka Vukašinović, Vlada Pavlović</p> | 215 |
| <p>IDEJNO TEHNIČKO RJEŠENJE POVEĆANJA ISKORIŠĆENJA FRAKCIJE -0,2+0mm NA LINIJI ZA MLJEVENJE BOKSITA U ALUMINI ZVORNIK Miloš Đokanović, Rajko Aleksić</p> | 228 |

| | |
|---|-----|
| PRIJEDLOG TEHNIČKOG RJEŠENJA PROSIJAVANJA FRAKCIJE -30+0mm IZ BOKSITA PRIJE OPERACIJE DROBLJENJA U FABRICI GLINICE ALUMINA ZVORNIK Miloš Đokanović, Radenko Smiljanić, Rajko Aleksić | 233 |
| EFEKTI PRIMENE MIKRONIZIRAJUĆEG MLEVENJA NA KVALITET VATROSTALNIH PUNIOCA NA BAZI PIROFILITA, MULITA, KORDIJERITA I CIRKONA Ljubiša Andrić, Dragan Radulović, Marko Pavlović, Marina Dojčinović, Milan Petrov, Zorica Tanasković | 238 |
| PONAŠANJE MIKROLEGIRANOG ČELIKA U USLOVIMA DEJSTVA KAVITACIJE Marina Dojčinović, Irena Grigorova, Marko Pavlović, Ljubiša Andrić, Dragan Radulović, Milan Petrov | 244 |
| STUDIJA SLUČAJA POVEĆANOG SPECIFIČNOG OTPORA NA KOPANJE JALOVINSKIH SISTEMA POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE – ANALIZA TROŠKOVA PROIZVODNJE USLED LOMA REZNIH ELEMENATA Lazić Marko, Rupar Veljko, Miletić Filip | 250 |

PONAŠANJE MIKROLEGIRANOG ČELIKA U USLOVIMA DEJSTVA KAVITACIJE

Marina Dojčinović¹, Irena Grigorova², Marko Pavlović³, Ljubiša Andrić⁴,
Dragan Radulović⁴, Milan Petrov⁴

¹Univerzitet u Beogradu, Tehnološko- metalurški fakultet, Beograd, Srbija,
rina@tmf.bg.ac.rs

²University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, Bulgaria

³Kontrol Inspekt, Beograd, Srbija

⁴Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd, Srbija

Apstrakt

Mikrolegirani čelici se primenjuju za izradu različitih elemenata opreme u metalurgiji i rudarstvu. Zbog zahteva koje oprema treba da ispuni i sigurnosti koju treba da obezbedi, vrše se različita ispitivanja ove vrste konstrukcionih materijala. U radu je ispitivano ponašanje mikrolegiranog čelika S355M u uslovima dejstva kavitacije. Za ispitivanje je primenjena ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom. Praćena je promena mase uzoraka u funkciji vremena dejstva kavitacije. Morfologija oštećenja površine analizirana je primenom skenirajuće elektronske mikroskopije. Utvrđen je mehanizam nastajanja i razvoja oštećenja površine uzoraka pod dejstvom kavitacije. Procenjena je mogućnost primene ove vrste materijala u rigoroznim uslovima eksploatacije koji su prisutni u metalurškim procesima.

Ključne reči: kavitacija, mikrolegirani čelik, kavitaciona brzina, skenirajuća elektronska mikroskopija

1. UVOD

Mikrolegirani čelici su konvencionalni ugljenični čelici sa minimalnim dodatkom legirajućih elemenata (manje od 0,5%). Mikrolegirajući elementi u čeliku doprinose povećanju granice razvlačenja, tvrdoće i čvrstoće, utiču na formiranje različite kristalne strukture i/ili grade nitride, karbide, karbonitride. Elementi koji grade karbide i nitride znatno doprinose povišenju čvrstoće čelika. Najznačajnije dejstvo mikrolegirajućih elemenata ogleda se u promeni strukture - usitnjavanju zrna i precipitaciji. Zahvaljujući tome, sniženje čvrstoće izazvano smanjenim sadržajem ugljenika se može nadomestiti, pa dolazi do porasta čvrstoće. Pri samom postupku mikrolegiranja čelika, elementi koji stvaraju stabilne karbide, nitride i karbonitride su najpoželjniji za korišćenje. Razlog za to jeste njihov uticaj na mehanizme omekšavanja i ojačavanja, pa takvi čelici već u valjanom stanju imaju veoma povoljna mehanička svojstva.

Kontrolisanjem hemijskog sastava uz termomehaničku obradu (kombinacija procesa valjanja u određenom temperaturnom intervalu i termičke obrade) moguće je kontrolisati strukturu, morfologiju i veličinu austenitnog zrna u cilju postizanja optimalne feritne

strukture [1]. Dodatak azota je delotvoran kod čelika koji sadrže aluminijum. Vezivanje azota u fino dispergovane nitride, naročito nakon normalizacije, dovodi do usitnjenja zrna a time i do povišenja granice razvlačenja i neosetljivosti na krti lom. Dodatak niobijuma deluje kao dodatno usitnjenje zrna. Najveće usitnjenje zrna dobija se dodatkom niobijuma uz istovremeno povišen sadržaj azota. Pri dodatku vanadijuma povećava se granica razvlačenja usled izlučivanja vrlo sitnih čestica vanadijum - karbonitrida za vreme hlađenja. Istovremeno mikrolegiranje s niobijumom i titanijumom značajno povećava granicu razvlačenja u normalnom stanju. Visoka temperatura topljenja karbida, nitrida i karbonitrida sprečava porast austenitnog zrna i time dovodi do nastanka mikrostrukture sa sitnijim zrnom. Termičkom obradom, posebno u kombinaciji s toplim oblikovanjem, može se "upravljati" procesima taloženja u mikrostrukтури i poboljšanja mehaničkih svojstva čelika [1].

Za ocenu ponašanja mikrolegiranog čelika S355M u rigoroznim uslovima eksploatacije (visoke temperature, habanje, korozija) prisutnih u metalurgiji i rudarstvu primenjeno je ispitivanje pod dejstvom kavitacije u laboratorijskim uslovima. Kavitacija je pojava koja obuhvata stvaranje i imploziju mehura u fluidu koji struji. Implozija mehura dovodi do mnogobrojnih nepoželjnih pojava kao što su povećanja pritiska i temperature u oblasti implozije, hemijske korozije, elektrohemijskih procesa i oštećenja površina materijala sa kojima je fluid u kontaktu [2]. Primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom za određivanje otpornosti ispitivanog čelika na dejstvo kavitacije. Za procenu otpornosti materijala na dejstvo kavitacije praćena je promena mase uzoraka u toku vremena ispitivanja. Primenjena je skenirajuća elektronska mikroskopija za analizu morfologije oštećenja površine izložene dejstvu kavitacije.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Za istraživanje otpornosti na dejstvo kavitacije odabran je mikrolegirani čelik S355M – zavarljivi sitnozrni konstrukcioni čelik. Čelik je termomehanički obrađen. Oznaka odabranog čelika je navedena prema standardu EN 10027-1. Hemijski sastav i mehanička svojstva mikrolegiranog čelika S355M prikazani su u Tabeli 1 i Tabeli 2.

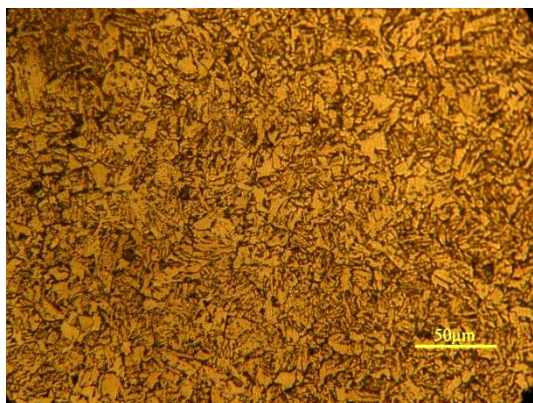
Tabela 1. – Hemijski sastav mikrolegiranog čelika S355M [%]

| Čelik | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Ti | V | Nb |
|-------|-------|------|-----|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| S355M | 0,095 | 0,29 | 1,0 | 0,015 | 0,014 | 0,30 | 0,35 | 0,10 | 0,05 | 0,06 | 0,035 |

Tabela 2. – Mehanička svojstva mikrolegiranog čelika S355M

| Čelik | Tvrdoća HV ₃₀ | Napon tečenja, R _e (N/mm ²) | Zatezna čvrstoća, R _m (N/mm ²) | A ₅ (%) | Z (%) | KV (J, +20°C) |
|-------|-----------------------------|---|---|-----------------------|----------|------------------|
| S355M | 210 | 350 | 480 | 23 | 51 | 60 |

Mikrostruktura mikrolegiranog čelika S355M je feritno-perlitna-beinitna i prikazana je na slici 1. U mikrostrukturi je veći udeo perlita i beinita (tamna polja) u odnosu na ferit (svetla polja).



Slika 1. Mikrostruktura čelika S355M, feritno-perlitna-beinitna

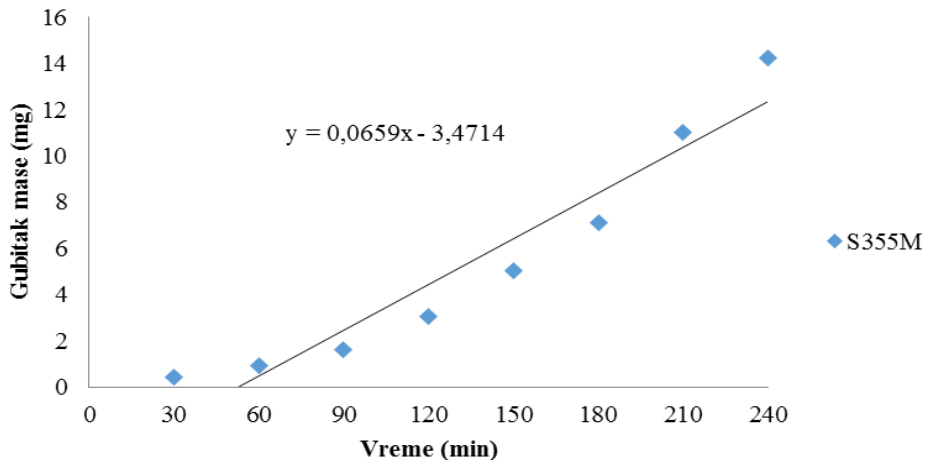
Za ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije mikrolegiranog čelika S355M primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom. Parametri ispitivanja i priprema uzoraka je urađena u skladu sa standardom ASTM G32 [3]. Ispitivanje odabranog čelika na dejstvo kavitacije je trajalo 240 minuta a promene gubitaka mase merene su nakon jednakih vremenskih intervala ispitivanja u trajanju od 30 minuta. Za merenje gubitaka mase korišćena je analitička vaga, čija je tačnost 0,0001 gram. Pre svakog merenja uzorak je sušen toplim vazduhom i držan u eksikatoru (sa CaCl_2) kako bi se odstranila zaostala vlaga.

Za definisanje kavitacione brzine nacrtan je dijagram vreme ispitivanja – gubitak mase. Gubitak mase nastale kavitacionim oštećenjem nanet je na ordinatnu osu, a vremenski intervali ispitivanja naneti su na apscisu. Metodom najmanjih kvadrata tačke dijagrama aproksimirane su pravom linijom i njen nagib definisao je kavitacionu brzinu.

Morfologija oštećenja površina izloženih dejstvu kavitacije sa različitim vremenom ekspozicije praćena je primenom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Analizirane su površine uzorka posle 60, 120, 180 i 240 minuta. Na osnovu mikrofotografija dobijenih na SEM-u analiziran je mehanizam oštećenja odabranog mikrolegiranog čelika S355M pod dejstvom kavitacije.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

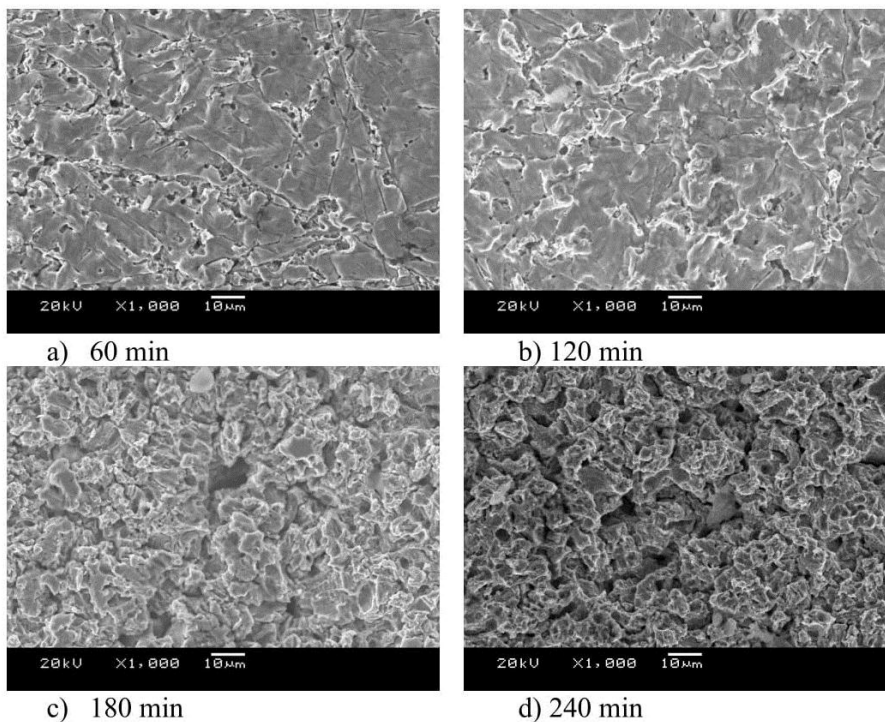
Na slici 2. prikazan je dijagram kavitacione brzine mikrolegiranog čelika S355M feritno-perlitne-beinitne strukture. Uočava se inkubacioni period (oko 45 minuta) što je u skladu sa malim gubitkom mase u prvih 60 minuta ispitivanja. Na osnovu ukupnog gubitka mase uzorka posle ukupnog vremena ispitivanja izračunata je kavitaciona brzina. Kavitaciona brzina iznosi 0,06 mg/min.



Slika 2. Kavitaciona brzina mikrolegiranog čelika S355M

Slika 2. pokazuje ravnomeran priraštaj gubitaka mase sa povećanjem vremena izlaganja dejstvu kavitacije mikrolegiranog čelika S355M u prvih 120 min ispitivanja. Posle ovog vremena, intenzivnije je povećanje gubitaka mase sve do kraja ispitivanja 240min. Ovakvo ponašanje je posledica mikrostrukture mikrolegiranog čelika S355M (feritno-perlitna-beinitna). *Ferit* je čvrst rastvor železa sa umetnutim atomima ugljenika u rešetki α -Fe. Ima strukturu koja se sastoji od jednoobraznih poliedarskih zrna, relativno je mek i plastičan. Posедуje svojstva otpornosti na koroziju. *Perlit* je eutektička smeša ferita i cementita Fe_3C , koje predstavlja hemijsko jedinjenje železa i ugljenika. Struktura perlita se sastoji od naizmenično stvorenih cementitnih i feritnih lamela koje nastaju pri transformaciji austenita. Mehanička svojstva perlita su između svojstava mekog i plastičnog ferita i krtoг cementita. Struktura i mehanička svojstva perlita zavise od temperature transformacije austenita (temperaturni interval pri hlađenju ispod $723^{\circ}C$ do $500^{\circ}C$). Ukoliko su temperature niže formira se fino-zrni perlit visoke tvrdoće i čvrstoće. Ukoliko su temperature transformacije više (neposredno ispod $723^{\circ}C$) formira se grublje zrno perlita i niža mehanička svojstva. *Beinit* se kao i perlit sastoji iz ferita i cementita. Razlika je što se ferit i cementit u perlitnoj koloniji obrazuju naizmenično. Kod beinita u kristalu ferita koji je presićen ugljenikom se obrazuje Fe_3C . U odnosu na interval temperatura u kome se obrazuju razlikuju se gornji (od $500-350^{\circ}C$) i donji beinit (od $350-230^{\circ}C$). U gornjem beinitu karbid je tipa Fe_3C smešten između feritnih pločica, najčešće su grublje čestice cementita i utiču na smanjenje plastičnosti čelika, a tvrdoća i čvrstoća se neznatno menjaju. U donjem beinitu, karbidi mogu biti ϵ - karbidi ili Fe_3C i obično su izdvojeni unutar ferita, što obezbeđuje veću čvrstoću i tvrdoću čelika uz dobru žilavost i plastičnost [4].

Na slici 3. prikazana je površina uzorka mikrolegiranog čelika S355M izloženog dejstvu kavitacije, analizirana skening-elektronskim mikroskopom (SEM) posle različitog vremena izlaganja dejstvu kavitacije.



Slika 3. SEM mikrofotografije oštećenja površine mikrolegiranog čelika S355M posle različitih vremenskih intervala dejstva kavitacije: a) 60min; b)120min; c)180min; d)240min.

Na slici 3a. vide se površinski nabori, karakteristični za plastičnu deformaciju površinskog sloja. Gubitak mase u ovom periodu je zanemarljiv zbog dugog inkubacionog perioda. Oštećenje počinje na granicama zrna zbog različitih svojstava mikrokonstituenata (femit, perlit, beinit). Uklanjanje mikroskopskih čestice sa površine na pojedinim lokacijama karakteristično je za period od 60 minuta dejstva kavitacije (jamice na slici 3a). Morfologija oštećenja površine mikrolegiranog čelika S355M posle 120 min dejstva kavitacije prikazana je na slici 3b. U ovom stadijumu se nastavlja deformacija zrna, na šta ukazuju izraženiji nabori površine u odnosu na prethodni period dejstva kavitacije. Razaranje počinje na granicama zrna, spajanjem postojećih jamica i nastajanjem prslina. Gubitak mase je lokalizovan na pojedinim mestima oštećene površine gde je došlo do odvajanja metalnih zrna sa površinskog sloja. U ovom periodu (120 min) došlo je oštećenja ferita zbog njegovih svojstava (niska tvrdoća).

Pod dejstvom kavitacije, koja predstavlja dinamičko opterećenje, produženo vreme dejstva kavitacije uslovljava slabljenje čvrstoće veze između metalnih zrna. Odvajanjem čestica materijala stvaraju se dublje jamice u površinskom sloju koje tokom dalje ekspozicije još više fokusiraju energiju udarnih talasa i povećavaju gubitak mase tj. kavitacionu brzinu. Slika 3c pokazuje da je posle 180 minuta dejstva kavitacije došlo do spajanja jamica nastalih

u prethodnom periodu i većeg gubitka mase. Postoji veći broj lokacija na površini sa izraženim gubitkom mase materijala što ukazuje da je u ovom periodu došlo do oštećenja perilita i beinita. Na pojedinim mestima površine vidi se i postojanje mikrotunela koji su nastali dejstvom mikromlazeva nastalih implozijom kavitacionih mehura. Sledeći stadijum ispitivanja mikrolegiranog čelika S355M feritno-perlitne-beinitne strukture karakteriše uniformna raspodela brojnih kratera po celoj površini, čija morfologija odgovara duktilnom razaranju (slika 3d.).

ZAKLJUČAK

Ispitivanje mikrolegiranog čelika S355M, primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom za određivanje otpornosti na dejstvo kavitacije u laboratorijskim uslovima, pokazalo je da ovaj čelik ima zadovoljavajući inkubacioni period i kavitacionu brzinu 0,06 mg/min. Analiza promene morfologije površine pokazala je da kavitaciono oštećenje počinje na granicama zrna zbog različitih svojstava mikrokonstituenata (ferit, perlit, beinit). Sa povećanjem vremena ispitivanja, posle inkubacionog perioda, gubitak mase nastaje kao posledica oštećenja ferita, a kasnije gubitak mase raste kao posledica oštećenja svih mikrokonstituenata mikrolegiranog čelika S355M. Posle ukupnog vremena ispitivanja javlja se uniformna raspodela oštećenja, sa postojanjem kratera po celoj površini uzorka, čija morfologija odgovara duktilnom razaranju strukture.

Zahvalnica

Rezultati ovih istraživanja finansirani su od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

1. S. Kožuh, Specijalni čelici, Univerzitet u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
2. M. Dojčinović, Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije, Monografija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2013, ISBN: 978-86-7401-305-2.
3. Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test, G32-92. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02. Philadelphia: ASTM; 1992.
4. H. Šuman, Metalografija, Prevod sa nemačkog jezika, 9. izdanje, TMF Beograd, 1989.

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд

622(082)

502/504(082)

СИМПОЗИЈУМ са међународним учешћем "Рударство" (11 ; 2020 ; Врњачка Бања)

Zbornik radova = Proceedings / 11. simpozijum sa međunarodnim učešćem "Rudarstvo 2020", Vrnjačka Banja 8. - 11. septembar 2020. = 11st [i.

e.11th] Symposium with International Participation "Mining 2020" ; [urednik, editor Miroslav Ignjatović] ; [organizatori Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina [i] Privredna komora Srbije]. - Beograd : Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, 2020 (Beograd : Akademska izdanja). - 243 str. : ilustr. ; 25 cm

Tiraž 180. - Bibliografija uz većinu radova. - Abstracts.

ISBN 978-86-82867-28-9

1. Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина (Београд) 2. Привредна комора Србије (Београд)

а) Рударство - Зборници б) Животна средина - Заштита - Зборници

COBISS.SR-ID 19693065