

Vujadin Aleksić¹, Marina Dojčinović², Ljubica Milović²,
Bojana Zečević^{3*}, Ana Maksimović³

¹Institut za ispitivanje materijala-IMS Institut, Beograd, Srbija

²Univerzitet u Beogradu, Tehnološko metalurški fakultet, Beograd, Srbija

³Inovacioni Centar, Tehnološko metalurškog fakulteta, Beograd, Srbija

Naučni rad

ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585

UDC:669.15-194.2-044.956:539.388.1

<https://doi.org/10.5937/zasmat2102095A>



Zastita Materijala 62 (2)

95 - 105 (2021)

Mehanizmi i morfologije kavitacionog oštećenja čelika Nionikral 70

IZVOD

Polomljene epruvete za ispitivanje niskocikličnim zamorom čelika Nionikral 70 (NN-70) osnovnog materijala (OM) i simulirane zone pod uticajem toplote (SZUT) poslužile su nam za izradu uzoraka za ispitivanje otpornosti na kavitaciju. Za ispitivanje u laboratorijskim uslovima primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda kavitacije (metoda stacionarnog uzorka). Uslovi i procedura ispitivanja, priprema uzoraka kao i interpretacija rezultata definisani su standardom ASTM G32. Površine uzoraka čelika NN-70 OM i SZUT bile su izložene dejstvu kavitacije i praćenju oštećenja kroz određeno vreme. Merenje gubitka mase uzoraka na analitičkoj vagi posle određenog vremena omogućilo nam je određivanje kavitacione brzine kao mere procene otpornosti materijala na dejstvo kavitacije. Za praćenje varijacija u morfologiji površine s promenom vremena ispitivanja primenjena je skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM). Na osnovu rezultata ispitivanja otpornosti na kavitaciju u radu su analizirane morfologije oštećenja površina za različita vremena izlaganja dejstvu kavitacije uzoraka OM i SZUT čelika NN-70 kao i mehanizmi koji su doveli do oštećenja površina uzoraka.

Cljučne reči: kavitacija; čelik NN-70; OM; SZUT; mehanizmi i morfologije oštećenja

1. UVOD

Kavitacija je pojava koja podrazumeva stvaranje i imploziju parnih ili paro-gasnih mehura u tečnosti koja struji. Pri imploziji kavitacionih mehura dolazi do niza neželjenih pojava: povećanja pritiska, povišenja temperature u okolini implozije kavitacionih mehura, hemijske korozije i elektro-hemijskih procesa.

Kavitacija se naziva i hladno ključanje. Za razliku od ključanja, pri zagrevanju kod koga pritisak raste u zavisnosti od dovedene toplote, kod kavitacije se ključanje odvija prema promenama pritiska u prostoru koji okružuje mehur.

Zbog promene pritiska u fluidu ili uticaju krutih granica, kavitacioni mehurići uglavnom odstupaju od kuglasto simetričnog oblika. Mehurići imploziraju formirajući mikromlaz koji oštećuju površinu na koju je usmeren, što se može videti na slici 1.

*Autor za korespondenciju: Bojana Zečević

E-mail: baleksic@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 01. 11. 2020.

Rad korigovan: 06. 01. 2021.

Rad prihvaćen: 13. 01. 2021.

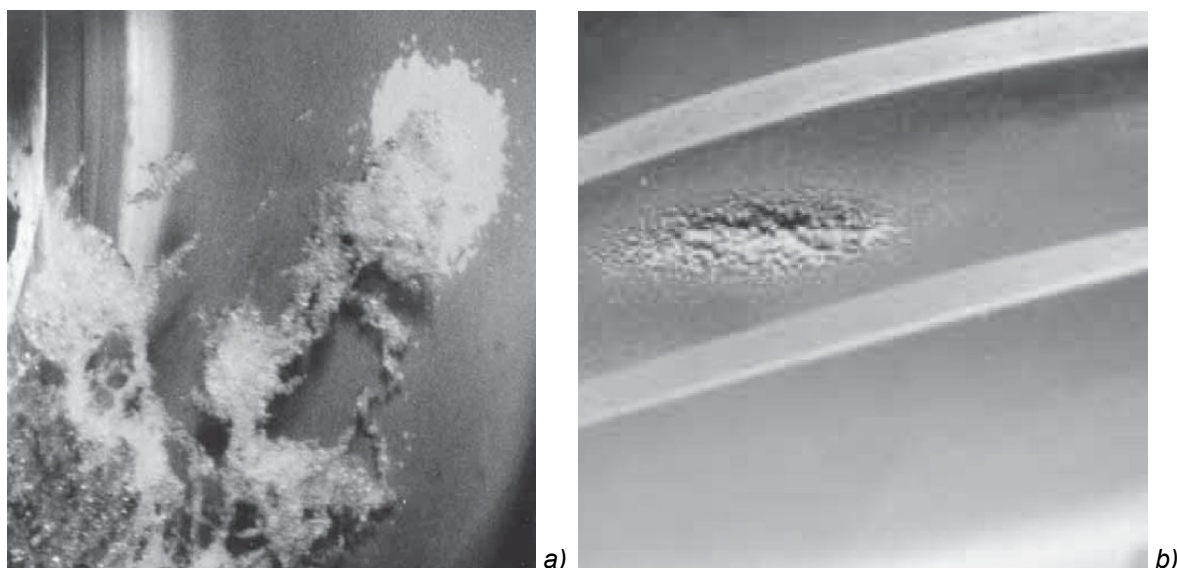
Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

Kavitacija je neželjena pojava u hidrosistemima jer je praćena šumom, vibracijama, povećanim gubitkom energije i razaranjem površina materijala koje su u kontaktu sa tečnošću.

2. RAZARANJE MATERIJALA POD DEJSTVOM KAVITACIJE

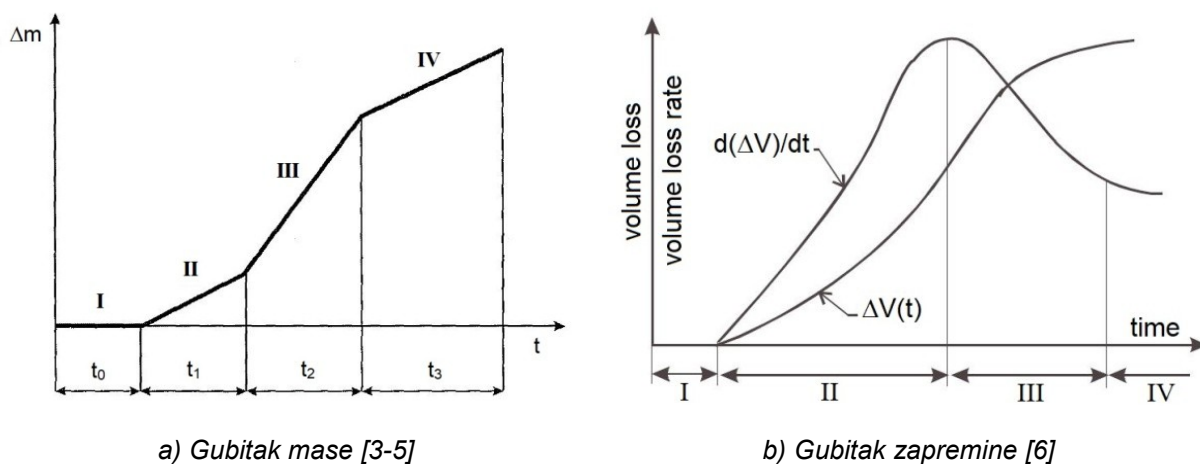
Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije je dinamički fenomen izazvan ponavljanjem dejstva kavitacionih mehura koji imploziraju i uslovljavaju nastanak mikromlazeva i udarnih talasa, što dovodi do nastanka visokih pritiska i temperatura u lokalnim mikrozapreminama. U slučaju ponovljenih impulsnih udara, dokazano je da kavitaciono razaranje ima karakter zamora. Zbog toga plastična deformacija, iniciranje prslina i njihov razvoj zavise od mehaničkih svojstava materijala (tvrdoća, modul elastičnosti, zatezna čvrstoća i dinamička čvrstoća), mikrostrukture materijala (veličina zrna, faza i broja grešaka u materijalu), a takođe i od hrapavosti površine.

Četiri karakteristična perioda razaranja materijala pod dejstvom kavitacije prikazana su na slici 2.



Slika 1. Mehurići a) tokom strujanja i b) kavitaciono oštećenje mikromlazom [1,2]

Figure 1. Bubbles a) during flow and b) cavitation damage by micromass [1,2]



a) Gubitak mase [3-5]

b) Gubitak zapremine [6]

Slika 2. Karakteristične kavitaciono erozione krive

Figure 2. Characteristic cavitation erosion curves (a) Weight loss (b) Volume loss

U laboratorijskim uslovima, razaranje materijala pod dejstvom kavitacije se procenjuje merenjem gubitaka mase [5] ili zapremine [6] u toku vremena izlaganja materijala dejstvu kavitacije. Krive, sl. 2a i b, dobijene eksperimentalnim putem, daju vezu između gubitaka mase, odnosno zapremine, i vremena dejstva kavitacije i pokazuje četiri karakteristična perioda razaranja pod dejstvom kavitacije.

Prvi period (t_0), (I), je tzv. inkubacioni period, kada praktično nema gubitka mase, odnosno zapremine, usled dejstva kavitacije. U ovom periodu materijal akumulira energiju i počinje plastična deformacija sa приметnom pojavom mikro i makro reljefa. Tokom ovog perioda mogu se pojaviti zamorni procesi i ojačavanje materijala. U

ovom periodu se samo javljaju neznatna površinska oštećenja oblika jamica nastalih gubitkom mikroskopskih čestica, sa različitim mesta na površini. Određivanje trajanja ovog perioda zavisi od tačnosti merenja uzoraka prilikom ispitivanja.

Drugi period (t_1), (II), je period početka neznatnog razaranja površinskog sloja praćenog minimalnim gubitkom mase. Kada je granica deformacionog ojačavanja dostignuta, kontinuirana plastična deformacija vodi ka odvajanju materijala i nastajanju i širenju prslina blizu površine, što rezultuje uklanjanjem materijala odnosno pojavom gubitka mase materijala. Oštećena površina postaje hrapavija sa velikim brojem malih udubljenja.

Treći period (t_2), (III), predstavlja period ubrzanog razaranja, praćenog izraženim gubitkom mase. Sitni krateri nastali u prethodnom periodu se spajaju obrazujući čitave jame na površinskom sloju izloženom dejstvu kavitacije. Kavitaciona brzina može se povećavati do maksimalne vrednosti zbog deformacionog ojačavanja površine i razvoja prslina. Step povećanja kavitacione brzine zavisiće od vrste materijala i kavitacionih uslova. Kada počne gubitak mase, karakteristike površine se menjaju, javljaju se pukotine, duboke jame i zamor postaje očigledniji. U ovom periodu gubitak dela zapremine dostiže maksimalnu vrednost.

Četvrti period (t_3), (IV), je period u kome dolazi do usporenog razaranja, ali se jame i dalje spajaju i stvaraju velike krater na površini izloženoj dejstvu kavitacije. Smanjenje kavitacione brzine tokom ovog perioda zavisi od mnogih faktora kao što su svojstva materijala, interakcija između struje tečnosti i pohabane površine preko procesa ravnjanja. Zaostali vazdušni ili gasni mehuri u dubokim kraterima mogu takođe delovati kao jastuk i apsorbovati deo energije udara. Ovo je period u kome dolazi do usporenog razaranja, ali se krateri i dalje spajaju i stvaraju velike šupljine i otvore na površini izloženoj dejstvu kavitacije. Oštećena površina koja odgovara ovom periodu

generalno je hrapavija sa proširenijim kraterima. Ovaj stadijum kavitacije pojavljuje se samo pod određenim uslovima.

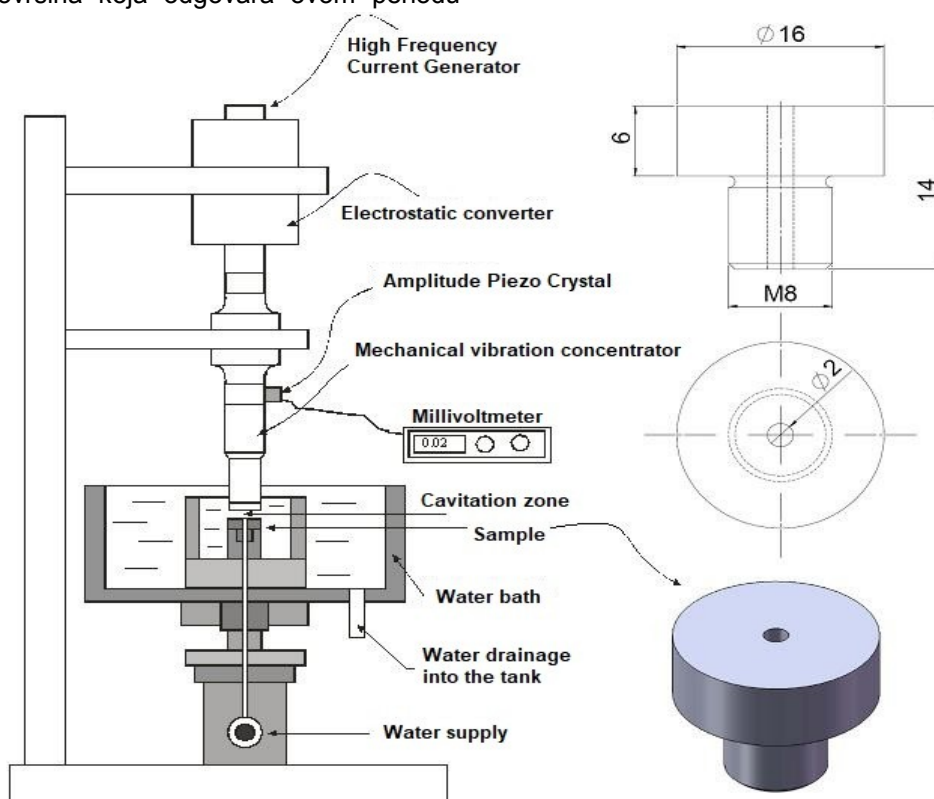
U trećem periodu, (III), uočava se slabljenje kavitacionog oštećenja. Gubitak zapremine se smanjuje. Ovo se objašnjava punjenjem jama vodom.

Posljednji, četvrti, (IV), period karakteriše gotovo konstantan gubitak dela zapremine izazvan erozijom.

3. OTPORNOST MATERIJALA NA DEJSTVO KAVITACIJE

Sposobnost materijala da se suprotstavi razaranju usled dejstva kavitacije, naziva se otpornost materijala na dejstvo kavitacije. Za procenu otpornosti materijala na dejstvo kavitacije koriste se laboratorijska ispitivanja, pa je u tu svrhu razrađeno više metoda za laboratorijsko ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije kao što su [7]:

1. Metode strujom velike brzine (Venturijeva cev);
2. Metode udara mlaza koji koriste i stacionarne i rotirajuće uzorke izložene mlazu velike brzine;
3. Vibracione metode visoke frekvencije koje obuhvataju magnetostrikcione i ultrazvučne uređaje.



Slika 3. Šema uređaja za ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije ultrazvučnom vibracionom metodom sa stacionarnim uzorkom [3, 4, 8]

Figure 3. Scheme of a device for testing the resistance of a material to the effect of cavitation by an ultrasonic vibration method with a stationary sample [3, 4, 8]

Za definisanje brzine erozije i otpornosti OM i SZUT čelika NN-70, u ovom radu, korišćena je ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom i standard ASTM G32 [8].

Shema uređaja za ispitivanje ultrazvučnom vibracionom metodom sa stacionarnim uzorkom, prikazana je na slici 3

Generator visokofrekventne struje izlazne snage 360 W, generiše struju frekvencije 20÷50 kHz koja se održava konstantnom sve vreme ispitivanja. Strujom visoke frekvencije napaja se elektrostrikcioni pretvarač - konvektor u kome se preko piezo-električnog elementa (cirkonijum-titanat) struja visoke frekvencije pretvara u mehaničke vibracije.

Kod ove metode uzorak materijala koji se ispituje ima otvor $\phi 2$ mm kroz koji struji tečnost a uzorak je postavljen ispod čeone površine koncentratora vibracija sa zazorom. Oblik i dimenzije uzorka propisane su standardom [8], a prikazan je na slici 3.

Kod ove metode, razaranje materijala pod dejstvom kavitacije zavisi od veličine amplitude, zazora između uzorka i čeone površine koncentratora,

Tabela 1. Hemijski sastav čelika NN-70 u % mase [9]

Table 1. Chemical composition of steel NN-70 in % mass [9]

Šarža	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	As	Sn
OM	0.106	0.209	0.220	0.005	0.0172	1.2575	2.361	0.305	0.052	0.007	0.017	0.014
	<i>Cu</i>	<i>Ti</i>	<i>Nb</i>	<i>Ca</i>	<i>B</i>	<i>Pb</i>	<i>W</i>	<i>Sb</i>	<i>Ta</i>	<i>Co</i>	<i>N</i>	-
	0.246	0.002	0.007	0.0003	0	0.0009	0.0109	0.007	0.0009	0.0189	0.0096	-

Tabela 2. Mehaničke osobine ispitivanih materijala [9]

Table 2. Mechanical properties of tested materials [9]

Šarža	E, GPa	R _m , MPa	R _{p0.2} , MPa	A ₅ , %	Udarna žilavost, J/cm ²	Tvrdoća, HV30	Tvrdoća, HV10
OM	221.4	853	805	18.4	121	245-269	
SZUT	225.0	884	830	8.7	79		270-280

Posle ispitivanja uzoraka OM i SZUT, čelika NN-70, niskocikličnim zamorom, od polomljene SZUT epruvete izrađeni su nestandardni uzorci, slika 4, za ispitivanje otpornosti na kavitaciju ultrazvučnom vibracionom metodom prema standardu ASTM G 32 [8].

Površina ispitivanih uzoraka pripremljena je brušenjem i poliranjem tako da je na svim uzorcima postignut isti kvalitet hrapavosti R_a=(0,03-0,05) μ m.

Kao držač ovih uzoraka korišćen je dorađen standardni stacionarni uzorak, kao što je prikazano na slici 5. Takođe od polomljenog uzorka SZUT epruvete izrađeni su i uzorci za metalografsko ispitivanje, slika 6, čiji su rezultati poslužili kao

osnova za objašnjenje morfologija i mehanizama kavitacione erozije OM i SZUT čelika NN-70.

1. Frekvencija mehaničkih vibracija 20±0,2 kHz;
2. Amplituda mehaničkih vibracija na vrhu koncentratora 50 μ m;
3. Zazor između probnog uzorka i koncentratora 0,5 mm
4. Protok vode 5-10 ml/s;
5. Temperatura vode u kupatilu 25±1 °C.

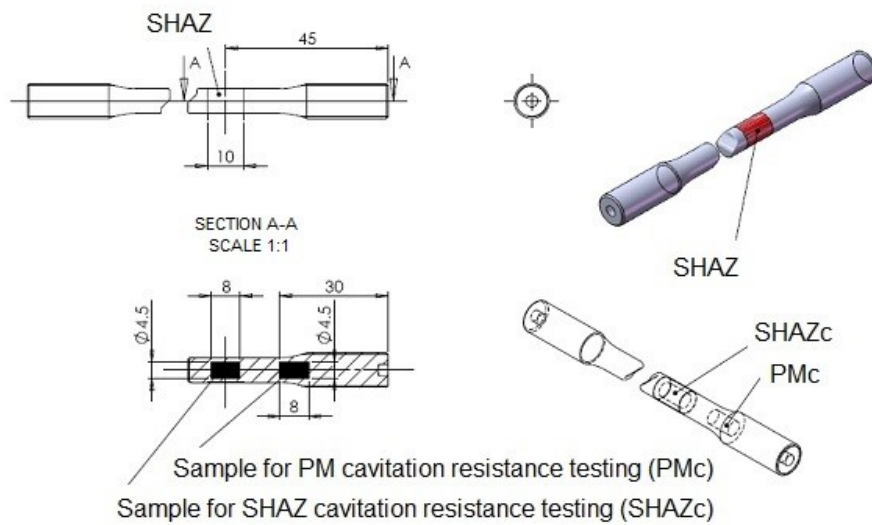
4. ISPITIVANJE OTPORNOST ČELIKA NN-70 NA DEJSTVO KAVITACIJE

Otpornost na dejstvo kavitacije ispitivano je na uzorcima OM i SZUT, čelika NN-70. Hemijski sastav čelika NN-7, tabela 1, a mehaničke osobine OM i SZUT, čelika NN-70 date su u tabeli 2.

osnova za objašnjenje morfologija i mehanizama kavitacione erozije OM i SZUT čelika NN-70.

Da bi se objasnili mehanizmi kavitacione erozije, posle ispitivanja uzoraka OM i SZUT čelika NN-70 na dejstvo kavitacije, kao i morfologije površina izloženih kavitacionoj eroziji površine izložene kavitaciji su posmatrane sken elektronskim mikroskopom (SEM), kao što je to urađeno i u radovima [3, 4, 9-14].

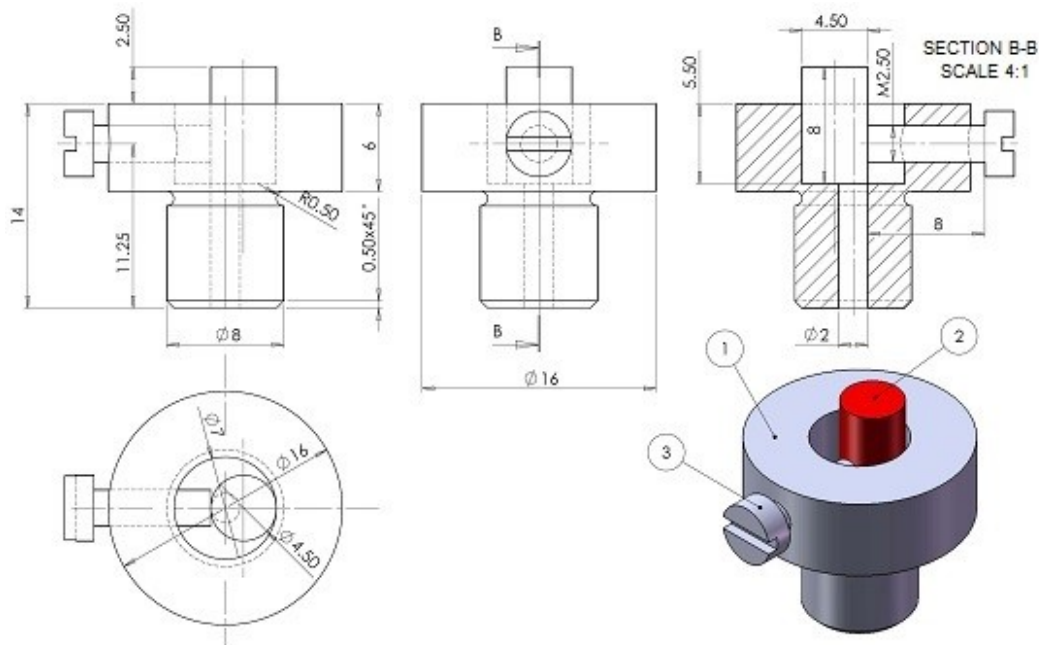
Kao držač ovih uzoraka korišćen je dorađen standardni stacionarni uzorak, kao što je prikazano na slici 5. Takođe od polomljenog uzorka SZUT epruvete izrađeni su i uzorci za metalografsko ispitivanje, slika 6, čiji su rezultati poslužili kao osnova za objašnjenje morfologija i mehanizama kavitacione erozije OM i SZUT čelika NN-70.



Slika 4. Uzorci za ispitivanje otpornosti na kavitaciju napravljeni od LCF SZUT epruvete 01 [9]

Figure 4. Cavitation resistance test specimens made from LCF SZUT sample 01 [9]

Da bi se objasnili mehanizmi kavitacione erozije, posle ispitivanja uzoraka OM i SZUT čelika NN-70 na dejstvo kavitacije, kao i morfologije površina izloženih kavitacionoj eroziji površine izložene kavitaciji su posmatrane sken elektronskim mikroskopom (SEM), kao što je to urađeno i u radovima [3,4, 9-14].

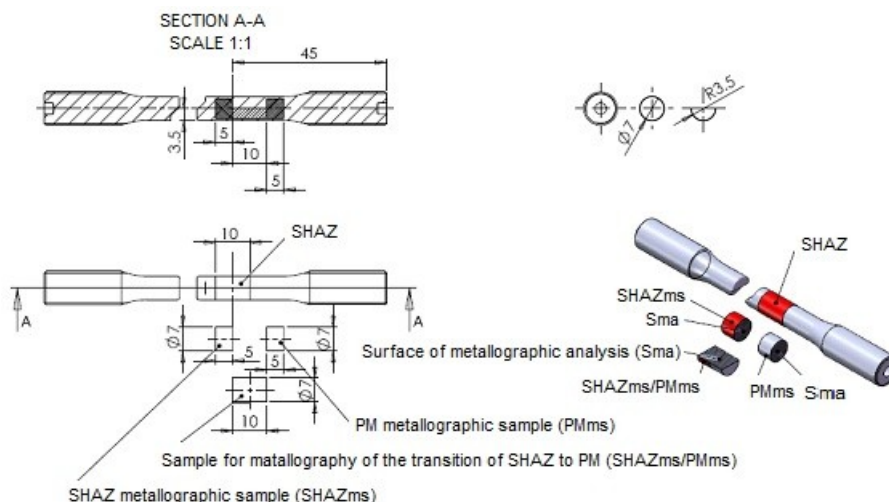


poz. 1 – držač uzorka, poz. 2 – uzorak za ispitivanje, poz. 3 – zavrtnaj za fiksiranje

1 - sample holder, 2 - test specimen, 3 - fixing screw

Slika 5. Uzorak za ispitivanje otpornosti na kavitaciju u držaču uzorka [9]

Figure 5. Cavitation resistance test sample in sample holder [9]

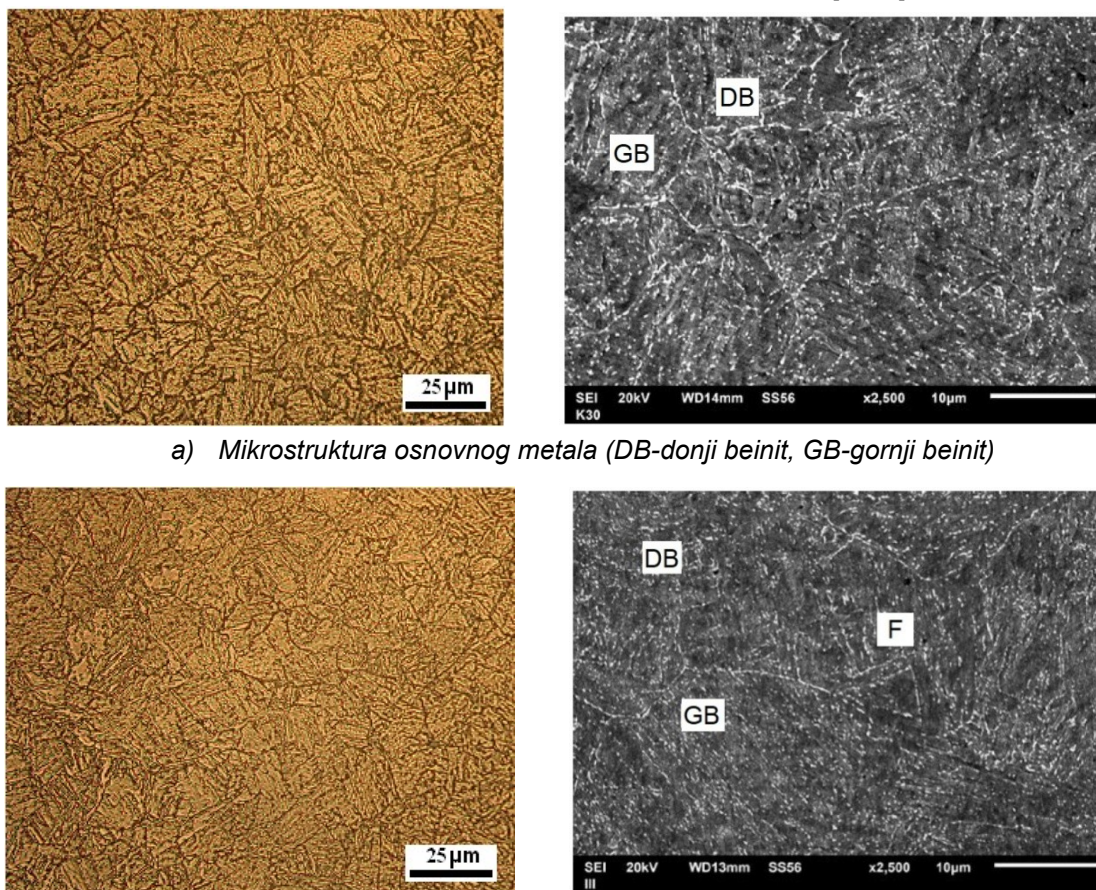


Slika 6. Uzorci za metalografsko ispitivanje napravljeni od LCF SZUT epruvete 07 [9]

Figure 6. Metallographic testing specimens made from LCF SZUT sample 07 [9]

5. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

Mikro struktura OM i SZUT čelika NN-70 sadrži martenzit i beinit, slika 7 [9, 14].



a) Mikrostruktura osnovnog metala (DB-donji beinit, GB-gornji beinit)

b) Mikrostruktura SZUT (DB-donji beinit, GB-gornji beinit)

Slika 7. a) OM (martenzit i beinit sa karbidima), b) SZUT (martenzit, beinit i ferit sa karbidima)

Figure 7. a) PM (martensite and bainite with carbides), b) SHAZ (martensite, bainite and ferrite with carbides)

Analizirajući mikrostrukture prelomnih površina vidimo da u SZUT dominira gornji beinit, a znatno ga manje ima u OM. Zbog toga SZUT ima smanjenu žilavost u odnosu na OM. Vrlo je mala razlika u veličini zrna i u ukupnoj strukturi OM i SZUT.

Pored gore navedenih mikro sastojaka, mikrostruktura SZUT uključuje i malu količinu ferita sa karbidima (slika 7b). Utvrđeno je da je za materijal karakterističan visok stepen poroznosti.

Vrednost izmerene tvrdoće OM bila je 269 HV1. Vrednost izmerene tvrdoće SZUT-a bila je 276 HV1.

Posle izlaganja svakog uzorka dejstvu kavitacije u trajanju od 30 min, meren je gubitak mase. Masa je merena na analitičkoj vagi, čija je tačnost merenja 0,0001 g. Nakon svakog intervala ispitivanja uzorak je sušen toplim vazduhom i držan u eksikatoru 24 sata kako bi se odstranila zaostala vlaga.

Za definisanje kavitacione brzine, kojom se procenjuje otpornost materijala na dejstvo kavitacije, urađeni su dijagrami vreme ispitivanja-gubitak mase. Gubitak mase nastale kavitacionim oštećenjem nanosi se na ordinatu, a na apscisu se upisuju vremenski intervali ispitivanja. Metodom najmanjih kvadrata tačke dijagrama aproksimirane su pravcem čiji tangens ugla nagiba predstavlja gubitak mase u periodu vremena delovanja kavitacije i predstavlja kavitacionu brzinu, slika 8. Sken elektronska mikroskopija (SEM) oštećenja površine uzorka OM izloženog dejstvu kavitacije u trajanju od 30, 60, 90, 120, 180 i 240 minuta i sken elektronska mikroskopija (SEM) oštećenja površine uzoraka SZUT izloženih dejstvu kavitacije u trajanju od 30, 60, 90, 120, 180 i 240 minuta prikazana je takođe na slici 8.

Fotografijama sken elektronske mikroskopije analizirana je morfologija površina, slika 8., uzorka OM i SZUT čelika NN-70 oštećenih izlaganju dejstvu kavitacije, a na osnovu nje utvrđeni su i mehanizmi nastanka oštećenja, slika 9.

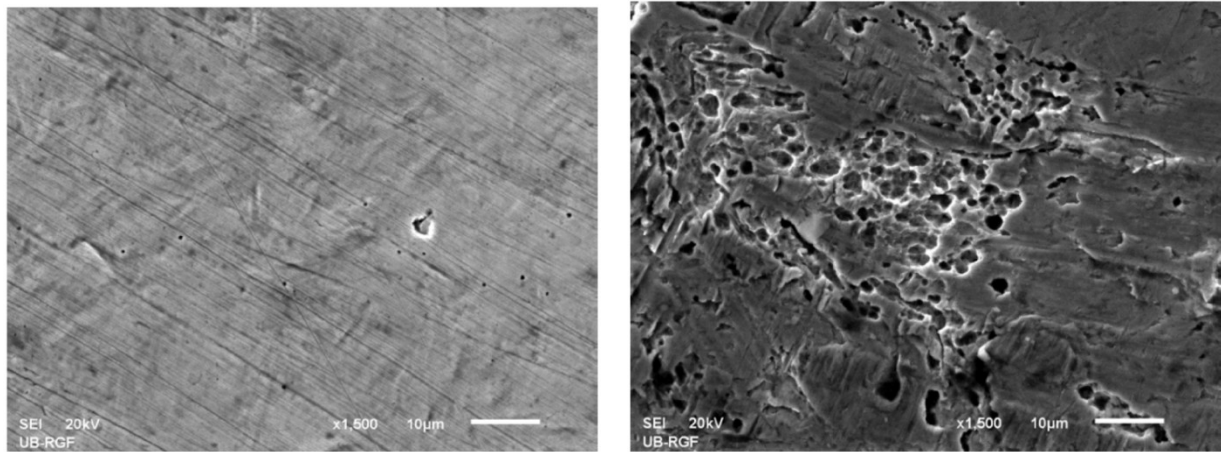
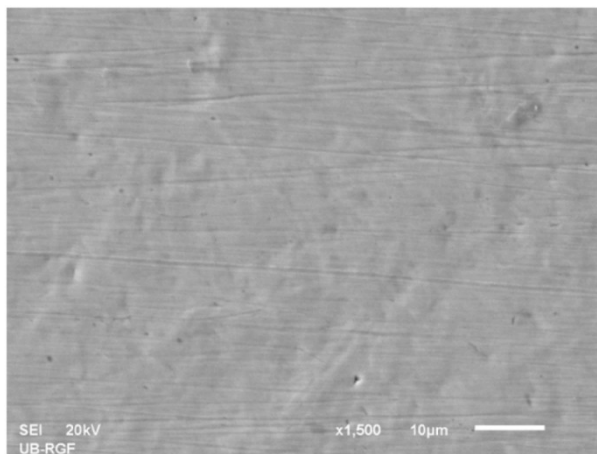
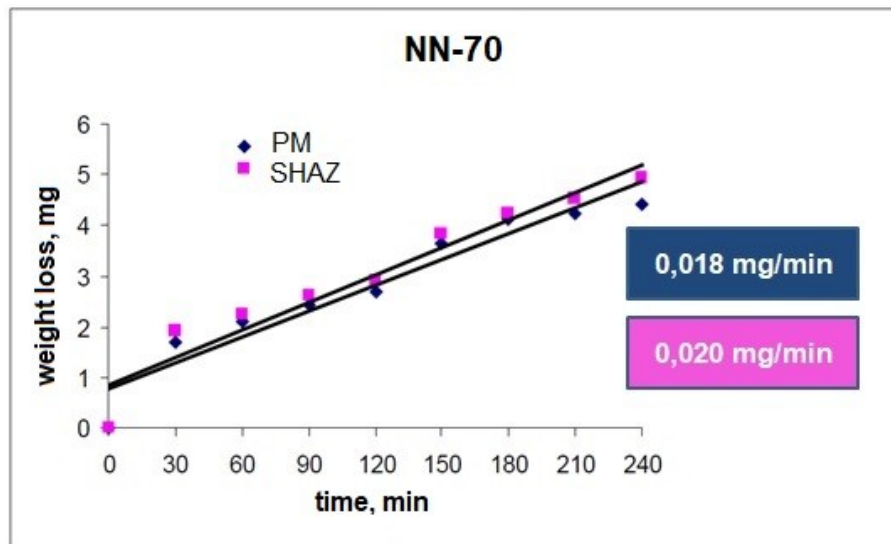
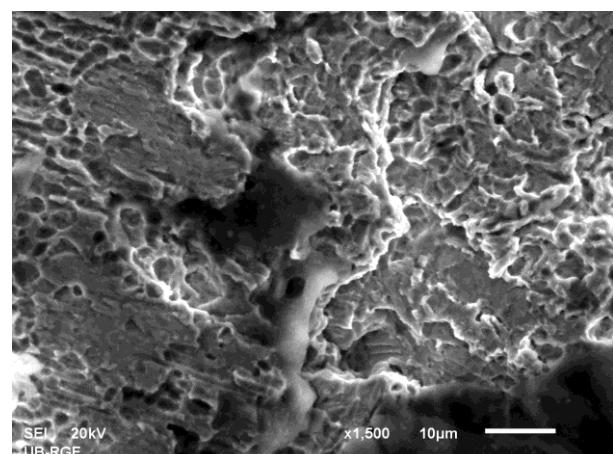
Kavitaciona brzina uzorka OM iznosi 0,018 mg/min, dok kavitaciona brzina uzorka SZUT iznosi 0,020 mg/min, a to je izračunato iz dijagrama prikazanog na ovom slajdu.

Posle 240 min izlaganja površine uzorka OM i SZUT dejstvu kavitacije uočene su brojne jamice koje su najverovatnije posledica poroznosti polaznog OM.

Izvorna površina je više puta bila izložena razaranju kavitacionim mehurićima što je izazvalo plastičnu deformaciju površine materijala udarnim talasima i mikro mlazovima generisanih razarajućih mehurića, shematski prikaz na slika 9a. Višestruko ponavljanje delovanja razarajućih mehurića na deformisanu površinu, izaziva postepeno širenje površine i akumuliranje plastične deformacije na granicama kristalnog zrna kao što je shematski prikazano na slika 9b, što odgovara SEM fotografiji nakon 45 minuta delovanja kavitacije, slika 9b'. Na granicama kristalnog zrna pojavljuju se istisnuti delovi plastično deformisanog materijala površine. Ovi delovi proizvode dodatno opterećenje u odnosu na susedna zrna s manjom plastičnom deformacijom i uzrokuju visoku koncentraciju napona, što rezultira prslinom kao na slici 9c". Slika 9d" pokazuje da se erozija lako dogodila na mestu stvaranje prsline. Slika 9c" i d" odgovaraju SEM fotografijama nakon 3 - 4 h, slika 9c' i d'. Razvoj erozije nakon 5 sati shematski je prikazan na slici 9e, gde vidimo da je kavitaciona erozija zahvatila široki prostor unutar zrna.

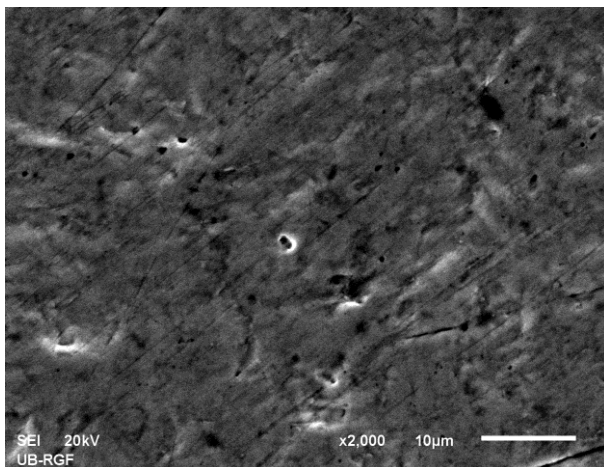
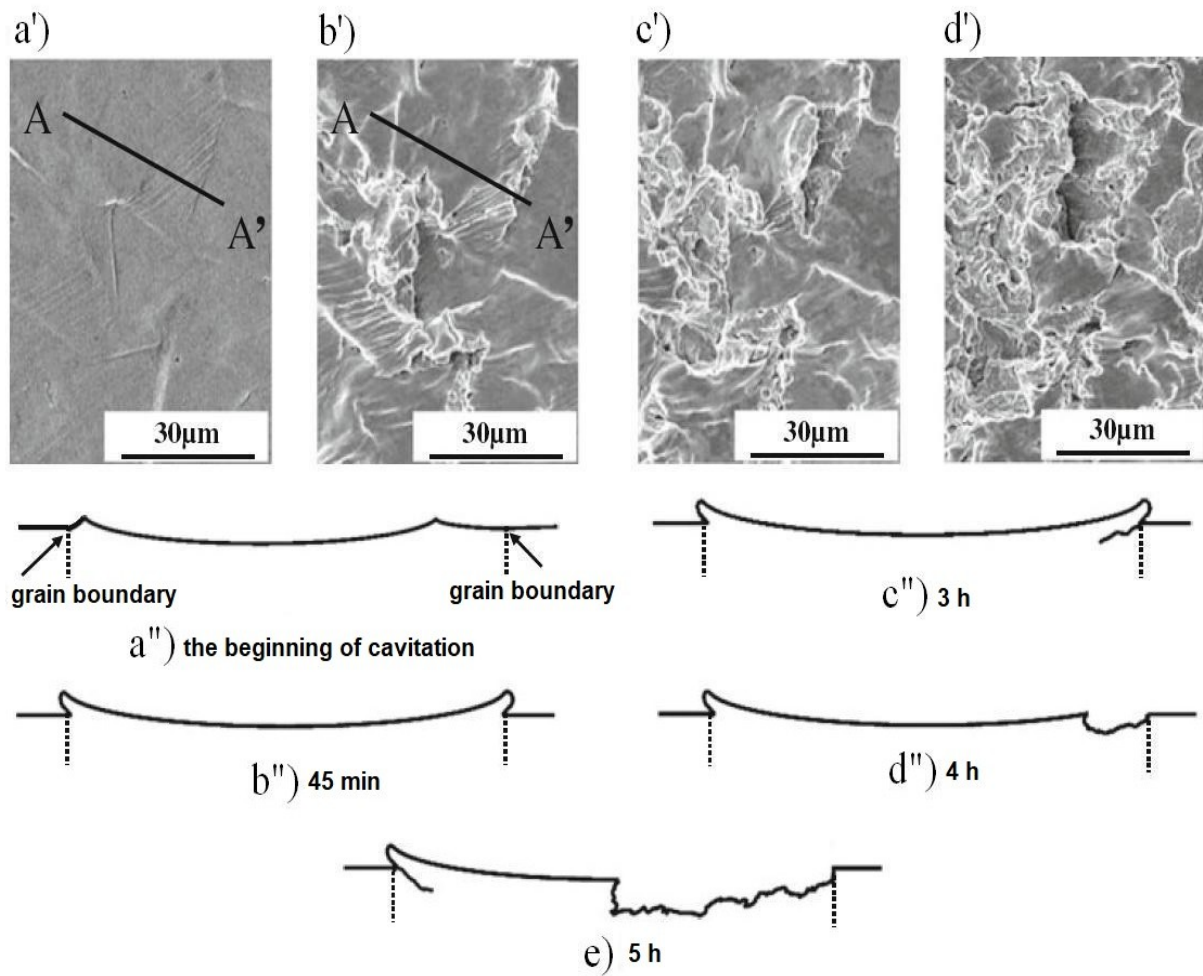
Kada su u pitanju tvrdi konstituenti, kao što su karbidi, model mehanizma razaranja kavitacionom erozijom prikazan je na slici 10, a baziran na SEM opažanju [16]. Slika 10a prikazuje neoštećenu površinu neke eutektičke strukture koja se sastoji od metalne matrice i karbida. Slika 10b ilustruje da je metalna matrica mekša od karbida, što uzrokuje pojavu plastičnih deformacije u matrici. U ovom slučaju, karbidi igraju ulogu granice zrna iz modela mehanizma sa slike 9.

Plastične deformacije se javljaju u matrici, i istisnuti deo materijala se pojavljuje u blizini karbida. Istisnuti deo blizu karbida ima visoku koncentraciju napona koja lako inicira prslinu. Slika 10c pokazuje da se erozija odvija na mestu sučeljavanja matrice i karbida. Erozija podkopava karbid, a zatim ga izbacuje iz matrice, kao što je prikazano na slici 10d.

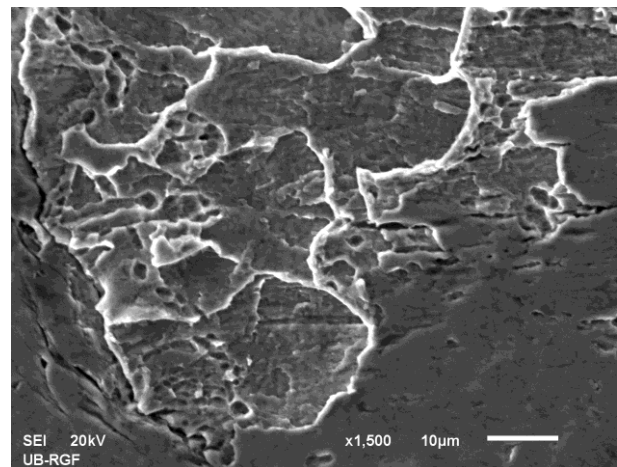
**OM-30 min****OM-240 min****SZUT-30 min****SZUT-240 min**

Slika 8. Dijagram promene kavitacione brzine i SEM oštećenih površina ispitivanih uzoraka **OM** i **SZUT** čelika NN-70

Figure 8. Diagram of change in cavitation velocity and SEM of damaged surfaces of tested samples **PM** and **SHAZ** of steel NN-70

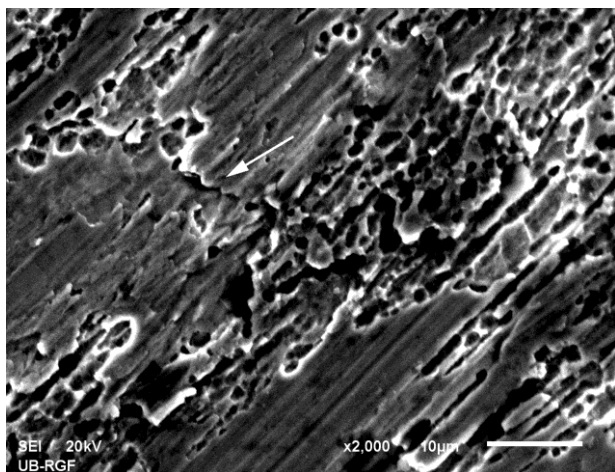
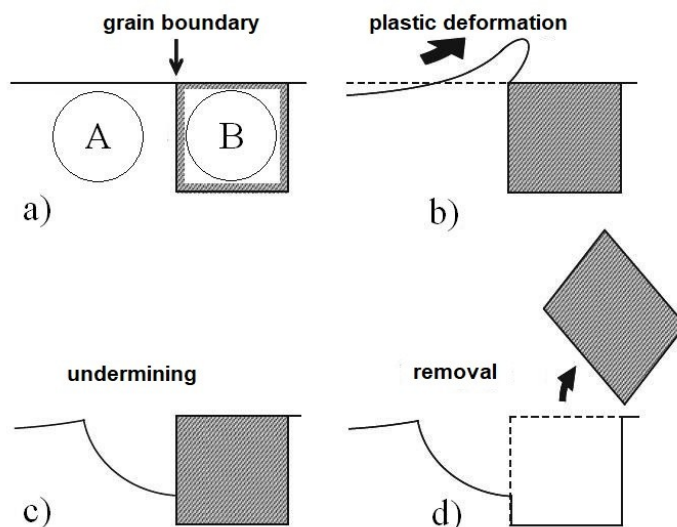
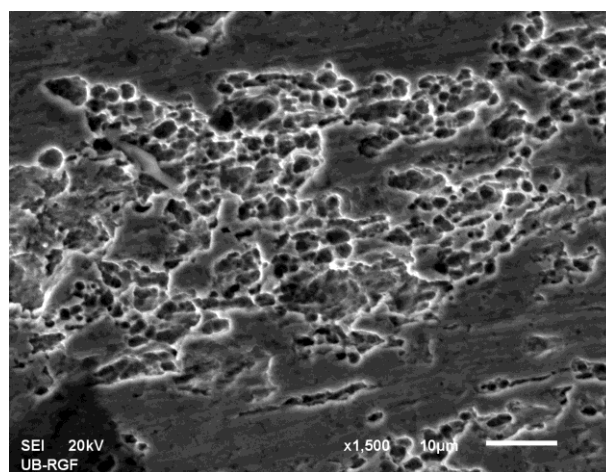


OM-180 min



SZUT-90 min

Slika 9. Mehanizam razaranja površine kavitacijom [15,16]
Figure 9. Mechanism of surface destruction by cavitation [15,16]

**OM-180 min****SZUT-90 min**

A – metalna matrica, B – tvrdi konstituenti ili uključci (šljaka, gasmi mehurovi, nečistoće)

Slika 10. Model mehanizma kavitacionog razaranja metala [15,16]

Figure 10. Model of the mechanism of cavitation destruction of metals [15,16]

Ovim mehanizmom može se objasniti kavitaciona erozija metala u kojoj su prisutni i drugi tvrdi konstituenti, uključci (šljaka, gasne pore, nečistoće), poroznost itd.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata vezanih za eksperimentalna razmatranja ponašanja niskolegiranog čelika povišene čvrstoće, u ovom slučaju OM i SZUT čelika NN-70, u uslovima uticaja kavitacionog razaranja bazirajući se na analizi morfologija i mehanizama oštećenja, kao i diskusiji rezultata eksperimentalnih ispitivanja mogu se izvesti sledeći opšti zaključci:

- Morfologiju površine OM karakteriše izrazito otvrdnjavanje materijala, ali morfologija oštećenja u narednim fazama ukazuje na poroznost OM i ne može se povezati sa mikrostrukturom OM u kojoj je zastupljen beinit;;
- Tokom ispitivanja uzoraka SZUT, mogu se primetiti dve vrste morfologije: morfologija karakteristična za martenzit i morfologija oštećenja nastala kao rezultat poroznosti materijala;;
- U slučaju SZUT pretpostavlja se da prisustvo beinita dovodi do smanjenja negativnog efekta ferita koji ima malu otpornost na efekte kavitacije.

Zahvalnica

Ovo istraživanje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-68/2020-14/200012).

7. LITERATURA

- [1] C.E.Brennen (2014) Cavitation and Bubble Dynamics, Cambridge University Press, California Institute of Technology, United States of America.
- [2] H.Soyama, H.Kato, R.Oba (1992) Cavitation observations of severely erosive vortex cavitation arising in a centrifugal pump. Proc. Third I.Mech.E. Int. Conf. on Cavitation, p.103–110.
- [3] M.Dojčinović (2013) Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije, Monografija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd.
- [4] M.Dojčinović (2007) Uticaj strukture na mehanizam razaranja čelika pod dejstvom kavitacije, doktorska disertacija Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- [5] T.Okada, Y.Iwai (1990) Cavitation erosion, JSME Int. J., 33, 128-135.
- [6] M.Szkodo (2005) Mathematical description and evaluation of cavitation erosion resistance of materials, 13th International Scientific Conference on Achievements in Mechanical and Materials Engineering, Gliwice-Wisla, Poland, p.647-650.
- [7] V.Đorđević (1973) Pregled metoda za laboratorijska ispitivanja kavitacione erozije, Tehnika, Mašinstvo, Godina XXII.
- [8] ASTM G 32 - 03, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [9] V.Aleksić (2019) Low cycle fatigue of high strength low alloy steels, D.Sc. thesis (in Serbian), University of Belgrade.
- [10] M.Dojčinović, T.Volkov-Husović (2008) Cavitation damage of the medium carbon steel: Implementation of image analysis, Materials Letters (MATER LETT), 62, 953-956.
- [11] M.Dojčinović, S.Marković (2006) The morphology of cavitation damage of heat-treated medium carbon steel, Journal of the Serbian Chemical Society (J SERB CHEM SOC.), 71 (8-9), 977-984.
- [12] M.Dojčinović (2011) Comparative cavitation erosion test on steels produced by ESR and AOD refining, Materials Science, Poland (MATER SCI-POLAND), 29 (3), 216-222.
- [13] M.Dojčinović (2013) Roughness measurement as an alternative method in evaluation of cavitation resistance of steels, HEM.IHD., 67(2), 323-330.
- [14] V. Aleksić, M.Dojčinović, Lj.Milović, I.Samardžić (2016) Cavitation damages morphology of high-strength low-alloy steel, Journal for Theory and Practice in Metallurgy-Metalurgija, 55(3), 423-425.
- [15] K.H.Kim, G.Chahine, J.Franc, A.Karimi (2014) Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction, Springer Science+Business Media Dordrecht, p.269-273.
- [16] S.Hattori, N.Mikami (2009) Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays, Wear, 267, 1954–1960

ABSTRACT

MECHANISMS AND MORPHOLOGIES OF CAVITATION DAMAGE OF NN 70 STEEL

Broken test tubes for low-cycle fatigue testing of Nionikral 70 (NN-70) parent material (PM) steel and simulated heat-affected zones (SHAZ) were used to produce samples for cavitation resistance testing. Ultrasonic vibrational cavitation method (stationary sample method) was applied for testing in laboratory conditions. The test conditions and procedure, sample preparation and interpretation of results are defined by ASTM G32. The surfaces of the NN-70 PM and SHAZ steel samples were exposed to cavitation and damage monitoring over time. Measuring the weight loss of samples on the analytical balance after a certain time allowed us to determine the cavitation velocity as a measure of the material's resistance to the effect of cavitation. Scanning electron microscopy (SEM) was applied to monitor variations in surface morphology with changing test time. On the basis of the results of the cavitation resistance test, the morphologies of the surface damage for different exposure times of the cavitation of PM and SHAZ steel NN-70 samples were analyzed, as well as the mechanisms that led to the damage of the sample surfaces.

Keywords: cavitation; steel NN-70; PM; SHAZ; mechanisms and morphologies of damage

Scientific paper

Paper received: 01. 11. 2020.

Paper corrected: 06. 01. 2021.

Paper accepted: 13. 01. 2021.

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