

**ANALIZA MORFOLOGIJE KAVITACIONOG OŠTEĆENJA  
MARTENZITNOG NERĐAJUĆEG ČELIKA**

**ANALYSIS OF CAVITATION DAMAGE MORPHOLOGY OF  
MARTENSITIC STAINLESS STEEL**

Marina Dojčinović  
Branka Purić  
Sladana Jezdimirović  
Univerzitet u Beogradu,  
Tehnološko – metalurški fakultet,  
Karnegijeva 4,  
11000 Beograd, Srbija,  
puricbr@gmail.com

Andrej Kovačević  
Univerzitet u Beogradu,  
Hemijski fakultet,  
Studentski trg 12 – 16,  
11000 Beograd, Srbija

Marko Pavlović  
Kontrol Inspekt, D.O.O.,  
Mladena Mitrića 12,  
11030 Beograd, Srbija

**SAŽETAK**

*U radu je analizirana morfologija kavitacionog oštećenja martenzitnog nerđajućeg čelika. Za ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije, u laboratorijskim uslovima je primenjena ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom. Praćenjem promene mase uzorka u funkciji vremena dejstva kavitacije određena je kavitaciona brzina čelika, kao mera otpornosti čelika na dejstvo kavitacije. Tokom ispitivanja primenjena je skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) koja je omogućila analizu morfologije kavitacionog oštećenja ovog materijala. Dobijeni rezultati ispitivanja pokazali su visoku otpornost martenzitnog nerđajućeg čelika na dejstvo kavitacije.*

**Ključne reči:** martenzitni nerđajući čelik, kavitaciono oštećenje, skenirajuća elektronska mikroskopija

**ABSTRACT**

*The morphology of cavitation damage of martensitic stainless steel was analyzed in this paper. Ultrasonic vibration method with a stationary sample was applied for cavitation resistance testing in laboratory conditions. By monitoring the change in the mass of the sample as a function of the time of cavitation action, the cavitation rate of steel was determined as a measure of the cavitation resistance of steel. During the examination, scanning electron microscopy (SEM) was applied, which enabled the analysis of the morphology of cavitation damage of this material. The obtained test results showed high cavitation resistance of martensitic stainless steel.*

**Keywords:** martensitic stainless steel, cavitation damage, scanning electron microscopy

**1. UVOD**

Kavitacija predstavlja pojavu nastajanja, rasta i implozije mehura pare ili gasa u tečnosti koja struji. Ova pojava zavisi od niza faktora: polje pritiska, temperatura tečnosti, vrsta tečnosti, režim strujanja, sadržaj nerastvornih gasova i mehaničkih uključaka, koji predstavljaju

nukleuse kavitacije [1, 2]. To je neželjena pojava u hidrosistemima, jer je praćena: šumom, vibracijama, oštećenjem i razaranjem materijala, povećanim gubitkom energije itd. Oštećenje površine elemenata hidrauličnih mašina pod dejstvom kavitacije zavisi od vrste materijala, njegove strukture i svojstava, a naziva se kavitaciono oštećenje [3]. Na oštećenje materijala u zoni kavitacije, osim mehaničkog dejstva, utiče i prisustvo elektrohemijskih procesa, hemijske korozije, a dodatnom oštećenju materijala doprinose visoke temperature i pritisci nastali lokalno, u vrlo kratkim vremenskim intervalima [1, 4]. Na sprečavanju kavitacije u hidrodinamici se mnogo radi, kako istraživanjem fenomena kavitacije i novih materijala otpornih na dejstvo kavitacije, tako i istraživanjem savremenih metoda za određivanje nivoa oštećenja, definisanje elemenata za procenu rizika i mera za kontrolu rizika nastajanja i razvoja oštećenja usled dejstva kavitacije.

U radu je istraživani proces nastajanja i razvoja oštećenja hrom – nikel martenzitnog nerđajućeg čelika pod dejstvom kavitacije. Primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom prema standardu ASTM G32 [5]. Cilj istraživanja bio je doprinos razumevanju fenomena fizčkih mehanizama razvoja kavitacionih oštećenja na površini uzoraka, kao i određivanje kvalitativne i kvantitativne ocene efekata delovanja kavitacije na otpornost materijala u datim uslovima. Za kvalitativnu ocenu efekata delovanja kavitacije na otpornost materijala praćeni su relevantni parametri nastajanja i razvoja oštećenja površine uzoraka primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa (analiza morfologije oštećenja površine). Kvantitativna mera intenziteta razaranja materijala bazirana je na vrednostima kavitacione brzine, odnosno rezultatima merenja gubitka mase uzoraka u određenom vremenu izlaganja dejstvu kavitacije.

Primenjena metodologija istraživanja odnosa kavitacija / oštećenje materijala, a pre svega analiza uticaja strukture i svojstava ispitivanog materijala na ponašanje materijala i osetljivost materijala na oštećenja usled dejstva kavitacije može da se primeni i u drugim istraživanjima iz predmetne oblasti.

## 2. EKSPERIMENT

Za istraživanje otpornosti na dejstvo kavitacije odabran je termički obrađen hrom – nikel martenzitni nerđajući čelik (oznaka CA6NM prema standardu ASTM A 743). U tabeli 1. i tabeli 2. su prikazani hemijski sastav i mehanička svojstva čelika.

Tabela 1. – Hemijski sastav uzoraka nerđajućeg čelika (%)

Uzorak	Hemijski sastav (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Čelik	0,05	0,60	0,65	0,02	0,01	13,0	4,1	0,48

Tabela 2. – Mehanička svojstva uzoraka nerđajućeg čelika

Uzorak	Mehanička svojstva				
	Tvrdoća HV <sub>30</sub>	Napon tečenja, R <sub>e</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Zatezna čvrstoća, R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	A <sub>5</sub> (%)	KV (J+20°C)
Čelik	214	675	765	15	45

Izbor hemijskog sastava uzoraka (tabela 1.) odabran je u cilju dobijanja željene strukture (slika 1.) i svojstava čelika (tabela 2.) za primenu u uslovima prisustva kavitacionih opterećenja. Visok sadržaj hroma obezbeđuje korozionu postojanost čelika usled formiranja zaštitnog oksidnog sloja, koji nastaje spontano kao rezultat hemijske reakcije kiseonika iz vazduha i hroma. Sloj oksida Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veoma dobro prijanja uz metalnu površinu, samoobnovljiv je i štiti metal od korozije u različitim medijima, pri tome je kompaktni, tvrdi i vrlo tanak (1 do 5 nm) [3].

Ostali legirajući elementi pospešuju dobijanje željene strukture sa dobrim mehaničkim svojstvima, kao što su: visoke vrednosti zatezne čvrstoće, napona tečenja i dinamičke čvrstoće, visoke otpornost na koroziju, kao i dobre udarna žilavosti. Dobra zavarivost ove vrste čelika postiže se niskim sadržajem ugljenika. Nizak sadržaj ugljenika u kombinaciji sa niklom obezbeđuje odličnu žilavost čelika, dok se dodatkom molibdena poboljšava njegova otpornost na koroziju. Zahvaljujući dobrim svojstvima, ovi čelici se u praksi široko primenjuju pri izradi elemenata hidroenergetske opreme, kako u gasnoj, tako i u naftnoj industriji, za izradu hirurških instrumenata, noževa i nekih reznih alata [4].



Slika 1. Mikrostruktura martenzitnog nerđajućeg čelika.

Za ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka čelika primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda sa standardnim uzorkom, u skladu sa standardom ASTM G32 [5].

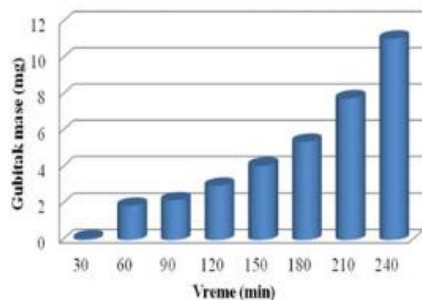
Za laboratorijska ispitivanja površina uzoraka čelika prečnika  $\phi$  16 mm pripremljena je brušenjem i poliranjem. Parametri karakteristični za ovu metodu, izabrani su u skladu sa standardom: amplituda na vrhu koncentratora 50  $\mu\text{m}$ , rastojanje između testiranog uzorka i koncentratora 0,5 mm, frekvencija vibracija 20 kHz, protok vode u kupatilu 5 – 10 ml / s i temperatura vode u kupatilu 25°C. Promene gubitka mase merene su nakon jednakih vremenskih intervala ispitivanja u trajanju od 30 min, dok je ukupno vreme ispitivanja uzoraka pod dejstvom kavitacije trajalo 240 min. Na analitičkoj vagi je meren gubitak mase i pre svakog merenja uzorak je sušen toplim vazduhom. Izračunata je kavitaciona brzina, na osnovu ukupnog gubitka mase uzorka posle ukupnog vremena ispitivanja [3, 5].

Da bi se definisala kavitaciona brzina nacrtan je dijagram *vreme ispitivanja – gubitak mase*. Na ordinatnu osu je nanošen gubitak mase nastao kavitacionim oštećenjem, dok su na apscisu naneti vremenski intervali ispitivanja. Tačke dijagrama aproksimirane su pravom linijom i to metodom najmanjih kvadrata, dok je njen nagib definisao kavitacionu brzinu [5, 6].

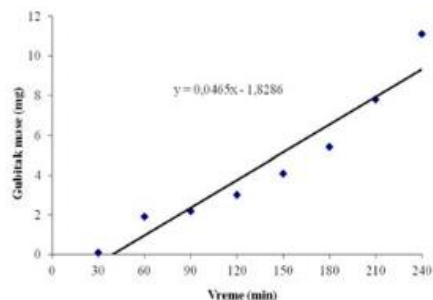
Primenom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM) praćena je morfologija nastajanja i razvoja oštećenja površina uzoraka izloženih dejstvu kavitacije sa različitim vremenom ekspozicije (min): 60, 120, 180 i 240 min. Na taj način dobijena je kvalitativna ocena efekata delovanja kavitacije na svojstva otpornosti ispitivanih uzoraka.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 2. prikazan je histogram priraštaja gubitka mase nerđajućeg čelika posle svakog vremenskog intervala ispitivanja. Takođe slika 2. pokazuje i ravnomeran priraštaj gubitka mase uzoraka čelika sa povećanjem vremena izlaganja dejstvu kavitacije.



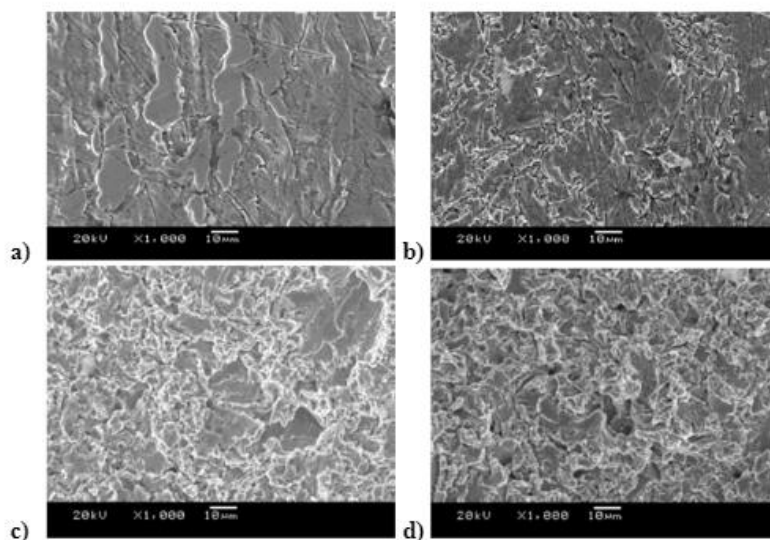
Slika 2. Histogram priraštaja gubitaka mase u intervalima ispitivanja martenzitnog nerđajućeg čelika.



Slika 3. Kavitaciona brzina martenzitnog nerđajućeg čelika.

Slika 3. prikazuje dijagram kavitacione brzine hrom – nikel martenzitnog nerđajućeg čelika. Kavitaciona brzina iznosi 0,05 mg / min. Inkubacioni period ovog čelika je približno 40 min, a predstavlja vreme ispitivanja u kome nije došlo do gubitka mase uzorka (na dijagramu to je tačka u kojoj prava linija seče apscisu i dobijena je metodom najmanjih kvadrata).

Analiza morfologije oštećenja površine uzoraka u toku ispitivanja obavljena je skenirajućom elektronskom mikroskopijom posle različitih vremena ekspozicije. Slika 4.a. pokazuje morfologiju površine uzorka posle 60 min ekspozicije. Vidi se povećana hrapavost površine, tj. dolazi do deformacionog ojačanja površine uzoraka i neznatnog uklanjanja materijala na granicama zrna, koje je počelo na graničnim površinama letvica u obliku malih udubljenja i to u skladu sa dobijenim inkubacionim periodom koji iznosi približno 40 min (slika 3.).



Slika 4. SEM mikrofotografija oštećenja površine martenzitnog nerđajućeg čelika tokom ekspozicije (min): a) 60; b) 120; c) 180; d) 240.

Martenzit je veoma krta, ali ima visoku tvrdoću i čvrstoću. Od sadržaja ugljenika zavisi tvrdoća martenzita, tako što se sa porastom sadržaja ugljenika povećava i tvrdoća, ali se smanjuje žilavost i plastičnost. Kristali martenzita, kod niskougličičnih i legiranih konstrukcionih čelika (<0,5% C) imaju oblik tankih letvica usmerenih u jednom pravcu (paketasti kristali martenzita). Nekoliko paketa martenzita se može obrazovati u svakom austenitnom zrnju. Tankim slojem zaostalog austenita su razdvojene letvice martenzita i baš zbog toga ovaj tip martenzita ima nešto manju vrednost tvrdoće.

Na slici 4.b. prikazana je morfologija oštećenja površine martenzitnog nerđajućeg čelika posle 120 min ekspozicije. Deformaciono ojačavanje se nastavlja u ovom stadijumu, na to ukazuju izraženiji nabori površine u odnosu na prethodni period dejstva kavitacije. Ovde takođe počinje i oštećenje površine po ivicama letvica martenzita i spajanja postojećih jamica u prslinae.

Produženo vreme ispitivanja uslovljava povećan stepen oštećenja površine, odnosno povećanje gubitka mase uzorka, pod dejstvom kavitacije, koja predstavlja dinamičko opterećenje. Pri tome dolazi do slabljenja čvrstoće veze u strukturi zbog različitih svojstava martenzita i zaostalog austenita. Stvaraju se dublje jamice u površinskom sloju, gubitkom čestica materijala sa površine. U toku daljeg dejstva kavitacije još više se fokusira energija udarnih talasa na površinu jamica i samim tim povećava se gubitak mase, tj. kavitaciona brzina.

Posle 180 min ekspozicije dolazi do spajanja jamica nastalih u prethodnom periodu ispitivanja i javlja se veći gubitak mase, slika 4.c. Na ovoj slici se vidi da postoji veći broj lokacija na površini sa gubitkom mase materijala, ali i mesta sa izraženom plastičnom deformacijom.

U toku daljeg ispitivanja udarni talasi i mikromlazevi nastali implzijom kavitacionih mehura, uslovljavaju pojavu kratera oko kojih je izražena deformacija materijala. Posle 240 min, tj. na kraju ispitivanja, uočavaju se krateri i žlebovi sa izraženom plastičnom deformacijom na oštećenoj površini martenzitnog nerđajućeg čelika (slika 4.d.). Morfologija oštećenja površine ispitivanih uzoraka čelika ukazuje na pojavu zamora materijala.

#### **4. ZAKLJUČAK**

Ispitivanjem hrom – nikl martenzitnog nerđajućeg čelika primenom ultrazvučne vibracione metode sa standardnim uzorkom određena je otpornost uzoraka na dejstvo kavitacije primenom (određena je kavitaciona brzina, gubitak materijala i inkubacioni period), kao i morfologija oštećenja površine uzoraka primenom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Dobijeni rezultati ukazuju na visoku otpornost na dejstvo kavitacije ispitivanih uzoraka čelika, kao i na mogućnost njihove primene u hidrodinamičkim uslovima, gde se ova pojava i očekuje.

Visoka svojstva otpornost uzoraka na dejstvo kavitacije ocenjena su na osnovu vrednosti kavitacione brzine 0,05 mg / min i inkubacionim periodom od približno 40 min. Pokazano je da u početnom stadijumu ispitivanja dolazi do povećanja hrapavosti površine usled deformacionog ojačanja površine i neznatnog uklanjanja materijala koje počinje na graničnim površinama letvica martenzita u obliku malih udubljenja. Sa daljim dejstvom kavitacije nastavlja se deformaciono ojačavanje, javlja se manje oštećenje površine po ivicama letvica martenzita usled spajanja postojećih jamica u prslinae. Zbog različitih svojstava martenzita i zaostalog austenita prisutnih u strukturi ispitivanih uzoraka čelika dolazi do slabljenja čvrstoće veze u strukturi koja uslovljava odvajanje čestica materijala i stvaranja dubljih jamica u površinskom sloju. Pri dužim vremenima ekspozicije morfologiju oštećenja površine karakterišu krateri i žlebovi sa izraženom plastičnom deformacijom na oštećenoj površini martenzitnog nerđajućeg čelika.

#### **Zahvalnica**

*Ovo istraživanje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-9/2021-14/200135).*

## 5. LITERATURA

- [1] J. P. Franc, J. M. Michel (Eds): Fundamentals of cavitation, Series Fluid Mechanics and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, vol.76, XXII 2004, 306 p.
- [2] Ž. Vuković, I. Halkijević, Kavitacija u centrifugama, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Građevinar 63 8201191, 11 – 17, UDK 628.29.001.7:62.67
- [3] M. Dojčinović, Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije, Morfologija, Tehnološko – metalurški fakultet, Beograd, ISBN: 978-86-7401-305-2, str. 99, 2013.
- [4] Stachowiak G. W. , Batchelor A. W. : "Engineering tribology" , publisher = Butterworth – Heinemann, 2001.
- [5] ASTM G 32 - 10, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, n.d. 2010.
- [6] M. Dojčinović, Merenje hrapavosti kao alternativna metoda u proceni kavitacione otpornosti čelika, Hem. Ind. 67, 2, 323 - 330, 2013.