

Merenje hrapavosti kao alternativna metoda u proceni kavitacione otpornosti čelika

Marina Dojčinović

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

Izvod

U ovom radu ispitivana je mogućnost procene kavitacione otpornosti čelika sa aspekta promene hrapavosti površine izložene dejstvu kavitacije. Za ispitivanje su odabrani čelici koji pripadaju različitim klasama. U laboratorijskim uslovima je primenjena ultrazvučna vibraciona metoda (sa stacionarnim uzorkom). Za praćenje promene morfologije površine sa promenom vremena ispitivanja primenjena je skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) i optička mikroskopija. Promena hrapavosti površina uzoraka odabranih materijala registrovana je merenjem parametra Ra koji je definisan kao prosečna hrapavost. Pokazano je da se kavitaciona otpornost može proceniti merenjem promene hrapavosti površina sa istom sigurnošću kao i konvencionalnim postupkom (merenjem gubitaka mase u toku ispitivanja).

Ključne reči: kavitacija, niskolegirani čelik, visokolegirani čelik, hrapavost, skenirajuća elektronska mikroskopija, optička mikroskopija.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

NAUČNI RAD

UDK 669.15:620.1:543.42

Hem. Ind. 67 (2) 323–330 (2013)

doi: 10.2298/HEMIND120320064D

Fenomen kavitacije obuhvata nastajanje, rast i imploziju (urušavanje) mehura u tečnosti delovanjem ultrazvuka. Tokom kavitacije pri urušavanju mehura lokalno nastaju visoke temperature i pritisci (približno 5000 °C i 1000 bar) u vrlo kratkom vremenskom intervalu ($< 1 \mu\text{s}$) [1–4].

Delovanje ultrazvuka prolaskom kroz tečnost manifestuje se u cikličnoj izmeni kompresije i ekspanzije. Kompresija nastalih mehura tokom kavitacije je brža od prenosa toplote i zato kompresija gasa generiše toplotu pri čemu dolazi do lokalno visokih porasta temperature u tečnosti. Ova mesta predstavljaju izvore ultrazvučne hemije.

Prilikom ekspanzije ultrazvuk deluje na molekule tečnosti tako što ih udaljava jedne od drugih i kada lokalno naprezanje premaši zateznu čvrstoću tečnosti dolazi do formiranja šupljine. Prilikom ekspanzije dolazi do naglog rasta nastalih šupljina koje ispunjava para ili gas pri čemu se formiraju parom ili gasom ispunjene šupljine odnosno mehuri. Stvoreni mehuri daljim delovanjem ultrazvuka apsorbuju energiju ultrazvučnog talasa i rastu. Kada mehuri dostignu kritičnu veličinu više ne mogu apsorbovati energiju ultrazvuka i urušavaju se.

Implozije mehura stvaraju udarne talase i mikromlazeve čija se energija rasipa unutar tečnosti ili je apsorbuje čvrsta površina sa kojom je tečnost u kontaktu. Energija implodiranih mehura koju je apsorbovao materijal usloviće elastičnu, plastičnu deformaciju ili razaranje koje predstavlja kavitacionu eroziju [5].

Dosadašnja istraživanja su pokazala da kavitaciona otpornost materijala koji se uobičajeno koriste u proizvodnji hidrauličnih elemenata zavisi od mehaničkih svojstava i mikrostrukture [6–8].

Jedna od laboratorijskih metoda za ispitivanje kavitacione otpornosti materijala je ultrazvučna vibraciona metoda. Uslovi i procedura ispitivanja, priprema uzoraka kao i interpretacija rezultata definisani su prema standardu ASTM G32 [9]. Primenom ultrazvučne vibracione metode u toku ispitivanja meri se gubitak mase uzorka u određenim vremenskim intervalima a kavitaciona otpornost se definiše preko inkubacionog perioda i brzine kavitacione erozije. U zavisnosti od položaja uzorka u toku ispitivanja, ovaj standard daje dve opcije: direktnu ili indirektnu kavitacionu metodu. Kod direktne kavitacione metode uzorak je preko navoja postavljan na vrhu koncentratora mehaničkih vibracija. U slučaju indirektno kavitacione metode ili metode sa stacionarnim uzorkom, uzorak je postavljen u vodenom kupatilu ispod koncentratora mehaničkih vibracija na određenoj udaljenosti [10–14]. Prednost metode sa stacionarnim uzorkom je što uzorak u toku ispitivanja nije izložen mehaničkim naprezanjima kao i u mogućnosti ispitivanja uzoraka od krutih materijala kod kojih se ne može narezivati navoj.

Cilj ovog rada je da pokaže da se merenjem promene hrapavosti površine može proceniti ponašanje čelika u kavitacionim uslovima. Zaključci o ponašanju odabranih čelika dobijeni na osnovu merenja promene hrapavosti bili su u skladu sa zaključcima dobijenim merenjem gubitaka mase i mikroskopskom analizom morfologije površina oštećenih dejstvom kavitacije.

Prepiska: Univerzitet u Beogradu, Tehnološko–metalurški fakultet, Karnegijeva 4, 11120 Beograd, Srbija.

E-pošta: rina@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 20. mart, 2012

Rad prihvaćen: 11. jun, 2012

EKSPERIMENTALNI DEO

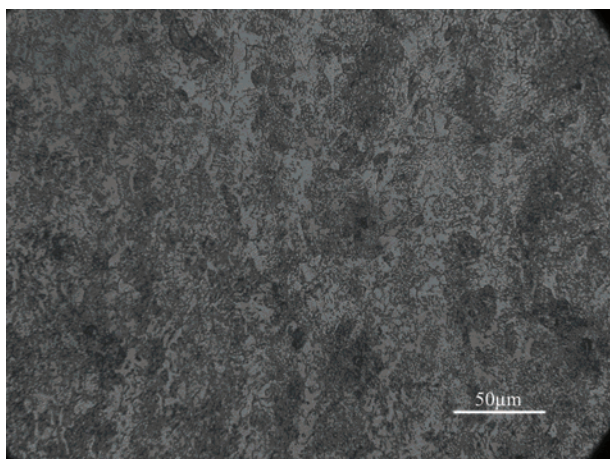
Materijali

U ovom radu za laboratorijsko ispitivanje kavitacione otpornosti korišćeni su čelici:

– 42CrMo4 (standard EN 10027-1) – niskolegirani čelik (za kaljenje i otpuštanje), feritno-perlitne strukture (slika 1) i

– X6CrNiMoTi17-12-2 (standard EN 10088-1) – visokolegirani čelik (nerđajući), austenitne strukture (slika 2).

Oba čelika imaju sitnozrnu mikrostrukturu.



Slika 1. Mikrostruktura niskolegiranog čelika 42CrMo4, feritno-perlitna.
Figure 1. The microstructure of low-alloyed steel 42CrMo4.

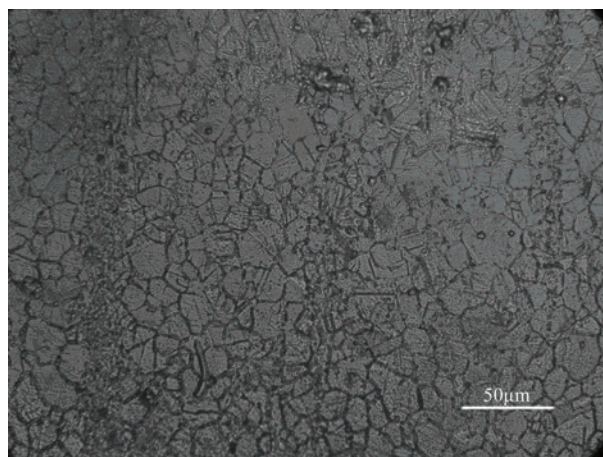
Hemijski sastav navedenih materijala prikazan je u tabeli 1. Mehanička svojstva (HV – tvrdoća po Vickers-u, R_e – napon na granici tečenja, R_m – zatezna čvrstoća, A_5 – izduženje, KV – žilavost) prikazana su u tabeli 2.

Metode

Za ispitivanje kavitacione otpornosti korišćena je ultrazvučna vibraciona metoda (sa stacionarnim uzorkom) prikazana na slici 3 [9].

Talasonod je svojim donjim krajem uronjen u vodeno kupatilo. Kod ove metode uzorak materijala koji se ispituje ima otvor prečnika 2 mm kroz koji struji voda

temperature 25 ± 1 °C a uzorak je postavljen ispod čeonne površine talasonoda na udaljenosti 0,5 mm. Frekvencija vibracija talasonoda je 20 kHz a amplituda 50 μ m. Ispod čeonne površine talasonoda i stacionarnog uzorka, obrazuje se jaka kavitaciona zona. Voda se dovodi pumpom kroz otvor na uzorku u vodeno kupatilo i hladi uzorak. Istovremeno voda svojim stalnim protokom stvara polje pritiska koje podstiče imploziju kavitacionih mehura na površini ispitivanog uzorka.



Slika 2. Mikrostruktura visokolegiranog čelika X6CrNiMoTi17-12-2, austenitna.
Figure 2. The microstructure of high-alloyed steel X6CrNiMoTi17-12-2.

Pre ispitivanja svi uzorci su polirani čime je postignuta njihova početna hrapavost $R_a = 0,05$ μ m. Promena gubitaka mase merena je analitičkom vagom tačnosti 0,1 μ g posle svakog intervala ispitivanja koji je iznosio 30 min. Pre merenja uzorci su sušeni toplim vazduhom i držani u eksikatoru kako bi se izdvojila zaostala vlaga u materijalu.

Morfologija oštećenih površina je analizirana skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) JEOL JSM 6460LV.

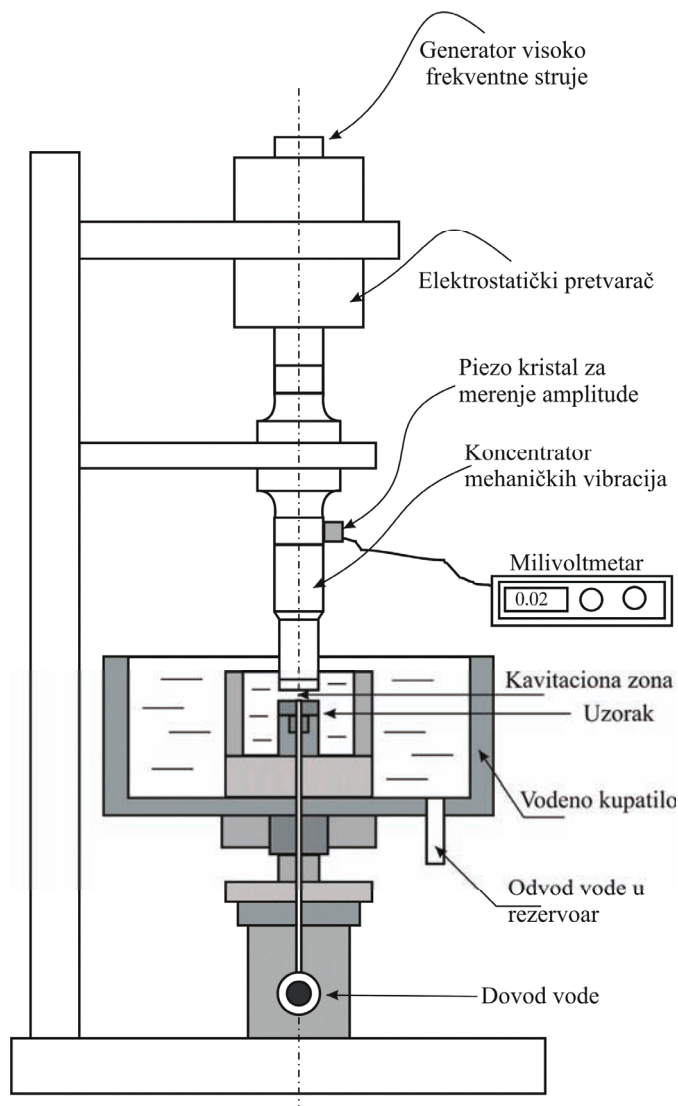
Merenje hrapavosti površina oštećenih dejstvom kavitacije, urađeno je pomoću uređaja TR200 Surface Roughness Tester. Merena je R_a – srednja vrednost

Tabela 1. Hemijski sastav (%) ispitivanih čelika
Table 1. Chemical composition (%) of tested steel

Čelik	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti
42CrMo4	0,40	0,36	0,81	0,010	0,019	1,05	0,22	–	–
X6CrNiMoTi17-12-2	0,08	1,0	2,0	0,04	0,03	17,5	2,0	12,0	Tragovi

Tabela 2. Mehanička svojstva ispitivanih čelika
Table 2. Mechanical properties of tested steel

Čelik	HV_{30}	$R_e / N\ mm^{-2}$	$R_m / N\ mm^{-2}$	$A_5 / \%$	$KV, J+20\ ^\circ C$
42CrMo4	198	760	1080	14	48
X6CrNiMoTi17-12-2	240	225	700	40	85



Slika 3. Šema uređaja za ispitivanje kavitacione otpornosti ultrazvučnom vibracionom metodom.
Figure 3. Schematic overview of cavitation test set up.

hrapavosti, odnosno aritmetička sredina apsolutnih vrednosti odstupanja y_i na profilu površine od srednje linije profila:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

Rezultati merenja hrapavosti su očitavani preko računara, pomoću softvera TR200 Time Data View.

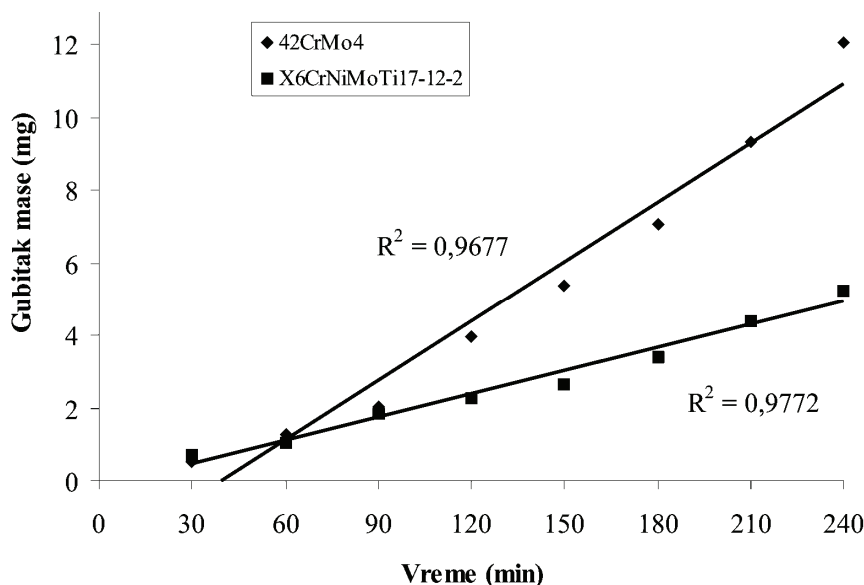
Nakon ispitivanja urađeni su poprečni presezi uzoraka i primenjena je optička mikroskopija kako bi se dobile potpunije informacije o promeni hrapavosti i slike uporedile sa linijama profila dobijenim merenjem hrapavosti.

REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati merenja gubitaka mase pod dejstvom kavitacije u toku vremena ispitivanja prikazani su na slici 4.

Gubitak mase nastale kavitacionim oštećenjem nanosi se na ordinatu a vremenski intervali dati su na apscisi. Metodom najmanjih kvadrata tačke dijagrama aproksimirane su pravcem čiji tangens nagiba pokazuje gubitak mase materijala u periodu vremena delovanja kavitacije, što definiše brzinu kavitacione erozije. Presečna tačka tog pravca i abscise označava inkubacioni period odnosno vremenski period u kome ne dolazi do gubitka mase odnosno erozije materijala pod dejstvom kavitacije već do njegovog deformisanja (deformacionog ojačavanja).

Rezultati laboratorijskih ispitivanja brzine kavitacione erozije pokazali su da niskolegirani čelik 42CrMo4 ima brzinu kavitacione erozije 0,05 mg/min, a visokolegirani čelik X6CrNiMoTi17-12-2 brzinu kavitacione erozije 0,022 mg/min (slika 4). Regresiona analiza pokazala je veliki stepen korelacije kod oba čelika, sa koefici-



Slika 4. Gubitak mase u toku kavitacionog ispitivanja.
Figure 4. Mass loss during cavitation resistance testing.

jentom korelacije $R^2 = 0,9677$ za čelik 42CrMo4 odnosno $R^2 = 0,9772$ za X6CrNiMoTi17-12-2.

Čelik 42CrMo4 je legiran hromom i molibdenom. Termička obrada (kaljenje i otpuštanje) uticala je na povećanje vrednosti njegovih mehaničkih svojstava. Legirani čelik 42CrMo4 ima feritno-perlitnu sitnozrnu strukturu ali i veliki udeo perlita koji je prema referentnoj literaturi otporniji od ferita na kavitacionu eroziju [15].

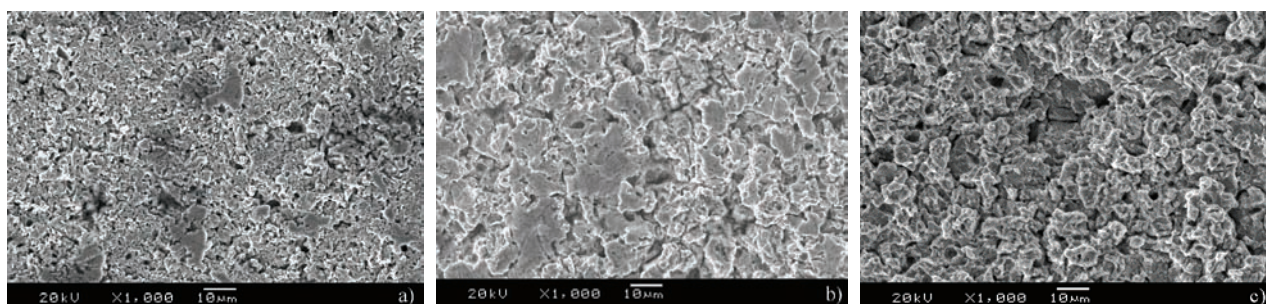
Visokolegirani čelik X6CrNiMoTi17-12-2 austenitne strukture, u toku ispitivanja pokazao je znatno manju brzinu kavitacione erozije 0,022 mg/min (slika 4). Ovaj čelik austenitne strukture je legiran visokim sadržajem hroma, nikla i molibdena. U poređenju sa niskolegiranim čelikom, ima manje vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće ali veće vrednosti tvrdoće, izduženja ($A_5 = 40\%$) i žilavosti ($KV 85 J$) koje su uslovile njegovu bolju kavitacionu otpornost.

Mikroskopska analiza na SEM-u (slike 5a i 6a) pokazala je da se usled dejstva kavitacije deformiše površinski sloj oba čelika. Nabori na površinama uzoraka ukazuju da je došlo do plastične deformacije u površinskom sloju usled kretanja dislokacija (inkubacioni period) [16].

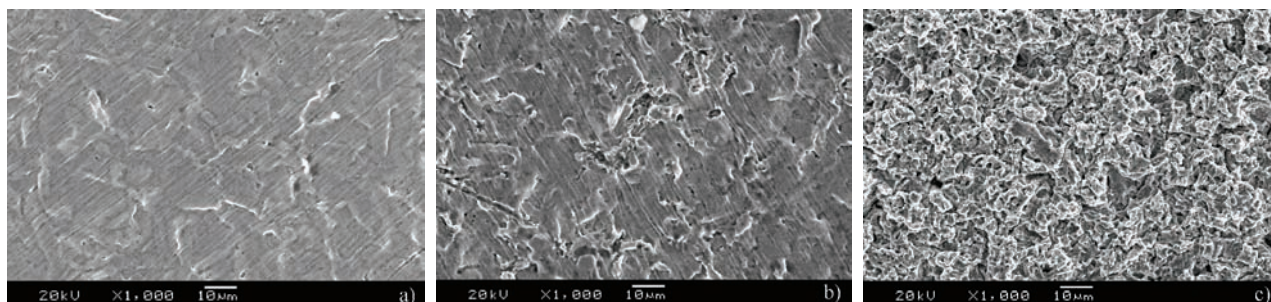
Međutim, uključci po granicama zrna blokiraju njihovo dalje kretanje tako da dalje dejstvo kavitacije uslovljava slabljenje čvrstoće veze između metalnih zrna i pojavljuju se prve jamice po granicama zrna. Ove jamice u površinskom sloju uslovljavaju fokusiranje energije udarnih talasa nastalih implozijom kavitacionih mehura, čime se intenzivira efekat kavitacionog dejstva. Kod oba čelika, već u ovom stadijumu je iniciran gubitak mase, lokalizovan na pojedinim mestima površine.

Povećanje vremena izlaganja dejstvu kavitacije rezultiralo je spajanjem jamica, nastajanjem i širenjem prslina usled slabljenja čvrstoće veze između metalnih zrna i širenjem prslina, kao što je prikazano na slikama 5b i 6b. Gubitak mase je intenziviran odvajanjem zrna sa površinskog sloja. Sledeći stadijum oba čelika, karakteriše uniformna raspodela oštećenja po celoj površini koja ima karakter zamora materijala (slike 5c i 6c).

Slike 5 i 6 pokazuju da je morfologija oštećenja oba čelika slična ali su kod visokolegiraniog čelika sve navedene pojave slabijeg intenziteta u poređenju sa niskolegiranim čelikom jer visokolegirani čelik ima veću tvrdoću ali i bolju duktilnost.



Slika 5. SEM fotografije niskolegiraniog čelika 42CrMo4, vreme kavitacionog ispitivanja: a) 60, b) 120 i c) 240 min.
Figure 5. SEM Micrographs of 42CrMo4 low-alloyed steel, cavitation testing time: a) 60, b) 120 and c) 240 min.



Slika 6. SEM fotografije visokolegiranog čelika X6CrNiMoTi17-12-2, vreme kavitacionog ispitivanja: a) 60, b) 120 i c) 240 min.
Figure 6. SEM Micrographs of high-alloyed steel X6CrNiMoTi17-12-2, cavitation testing time: a) 60, b) 120 and c) 240 min.

Merenje hrapavosti površine niskolegiranog čelika 42CrMo4 posle prvog intervala dejstava kavitacije u trajanju od 60 min pokazalo je srednju vrednost hrapavosti $Ra = 0,50 \mu\text{m}$. Ovako mala hrapavost je posledica većeg inkubacionog perioda (30 min), što znači da je u tom periodu došlo do veoma malih oštećenja površine pod dejstvom kavitacije. Sa povećanjem dužine trajanja ispitivanja, stepen oštećenja površine se povećava tako da posle 240 min iznosi $Ra = 1,55 \mu\text{m}$ (slika 7).

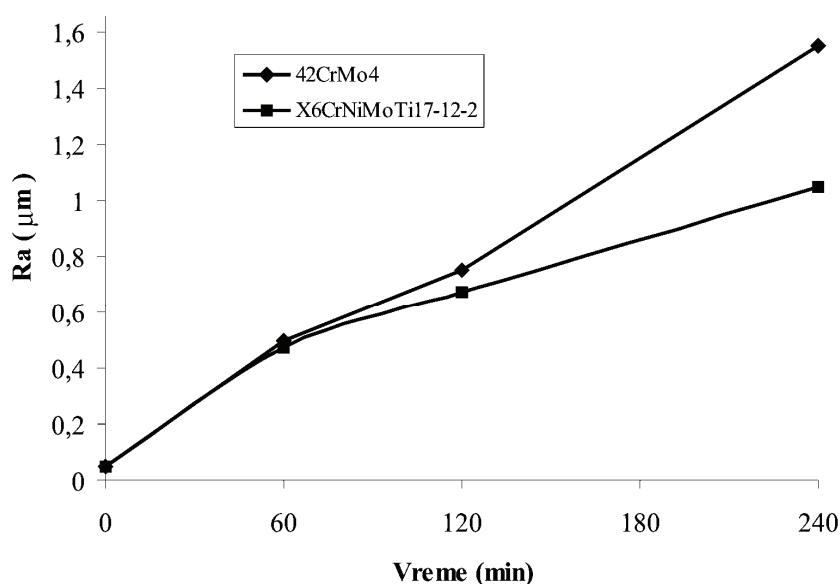
Visokolegirani čelik X6CrNiMoTi17-12-2, u prvih 60 min ima hrapavost $Ra = 0,475 \mu\text{m}$. Sa povećanjem vremena izlaganja dejstvu kavitacije od 120 do 240 min, hrapavost veoma malo raste i povećala se od $Ra = 0,67 \mu\text{m}$ do $Ra = 1,05 \mu\text{m}$ (slika 7). Ovako mala promena hrapavosti posledica je malih gubitaka mase jer ovaj čelik ima izraženu sposobnost plastičnog deformisanja.

Više informacija o promeni hrapavosti dobijeno je primenom optičke mikroskopije poprečnih preseka uzoraka nakon ispitivanja od 240 min (slika 8). Oštećene površine karakteriše nastajanje prslina kao i jamica. Na slici 8a vide se prsline orjentisane normalno na površinu i paralelno u odnosu na površinu što dovodi do

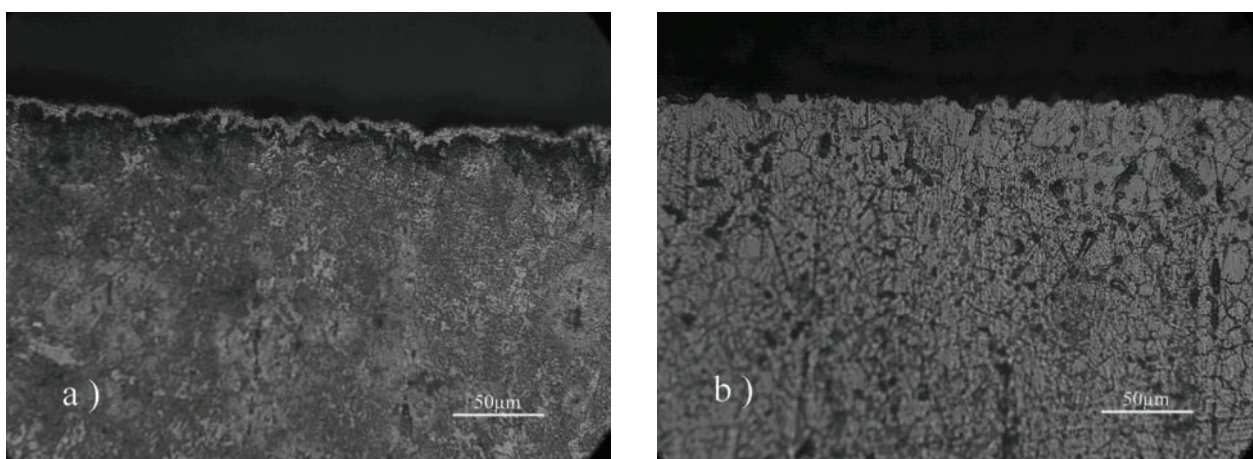
formiranja dubokih kratera. Ova zapažanja objašnjavaju veće povećanje hrapavosti i kasnijim stadijumima ispitivanja kod niskolegiranog čelika 42CrMo4 (slika 7).

Slika 8b pokazuje postojanje prslina u pravcu normalnom na površinu uzorka ali su one nakon poslednjeg intervala ispitivanja znatno manje nego kod uzoraka niskolegiranog čelika. Odsustvo prslina paralelnih sa površinom uzorka pokazuje da i u toku daljeg dejstva kavitacije kod ispitivanog čelika austenitne strukture ne bi došlo da naglih gubitaka mase.

Izgled linija profila oštećenih površina uzoraka posle kavitacionog ispitivanja od 240 min prikazan je na slici 9. Na apscisi je data dužina merenja hrapavosti (putanje igle) a na ordinati promena parametra hrapavosti Ra . Hrapavost je merena na dužini od 4 mm (radijalan pravac od oboda otvora na uzorku do spoljašnjeg oboda uzorka). Osim prosečne hrapavosti Ra , postoji mogućnost očitavanja i drugih parametara linije profila kao što su: Rq – kvadratni koren aritmetičke sume kvadrata odstupanja na profilu od srednje linije profila; Rz – razlika između najviše i najniže tačke na profilu [17].

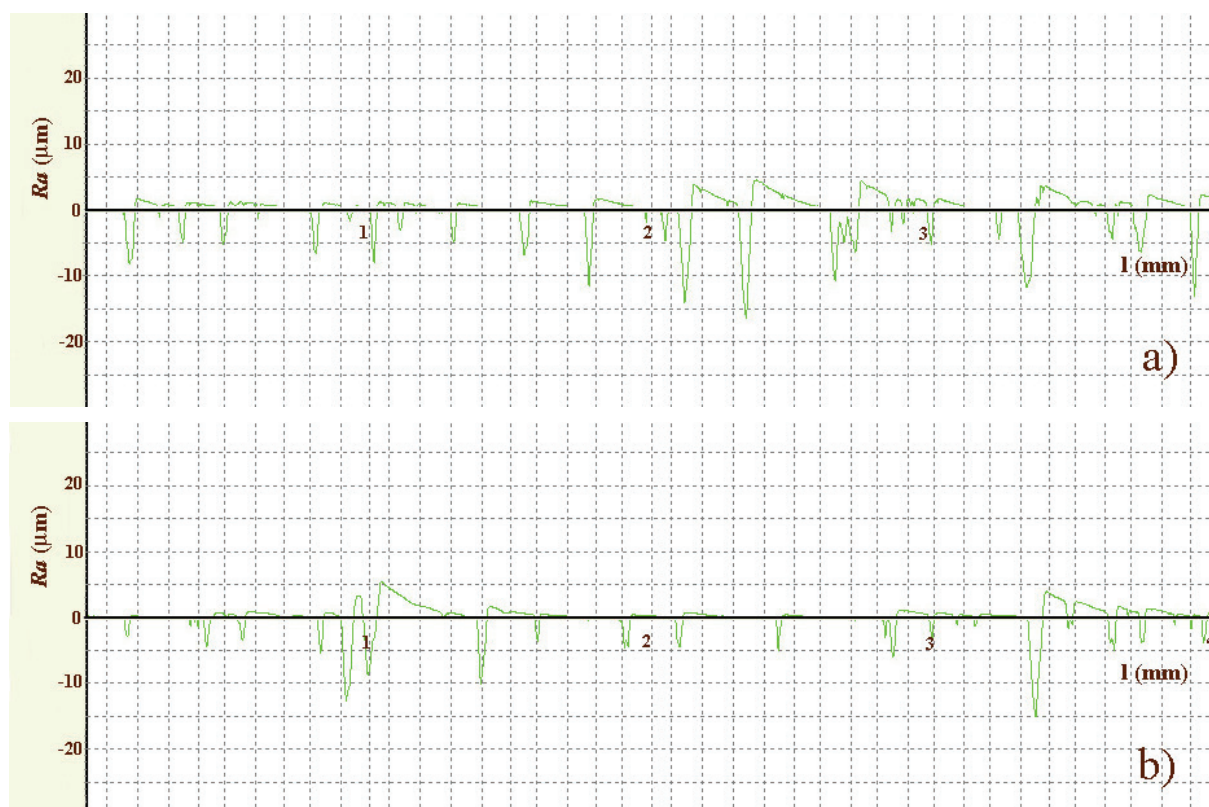


Slika 7. Srednje vrednosti hrapavosti, Ra , u toku ispitivanja.
Figure 7. The mean roughness, Ra , during testing time.



Slika 8. Poprečni presek uzoraka posle 240 min kavitacionog ispitivanja koje karakteriše R_a srednja vrednost hrapavosti, a) $R_a = 1,55 \mu\text{m}$ (niskolegirani čelik), b) $R_a = 1,05 \mu\text{m}$ (visokolegirani čelik).

Figure 8. The cross section of samples after 240 min of cavitation tests characterized by the mean roughness, R_a , a) $R_a = 1.55 \mu\text{m}$ (low-alloyed steel), b) $R_a = 1.05 \mu\text{m}$ (high-alloyed steel).



Slika 9. Linije profila površina a) niskolegiraniog čelika i b) visokolegiraniog čelika.
Figure 9. The profile lines for a) low-alloyed steel and b) high-alloyed steel.

Snimljene linije profila površina nakon ukupnog vremena ispitivanja potvrđuju zapažanja na mikrofotografijama poprečnih preseka uzoraka (slika 8).

ZAKLJUČAK

Na osnovu analize dobijenih rezultata ispitivanja, mogu se izvesti sledeći zaključci.

Visokolegirani čelik X6CrNiMoTi17-12-2 pokazao je manju brzinu kavitacione erozije (veću kavitacionu otpornost) kao i manju srednju hrapavost R_a u odnosu na niskolegirani čelik 42CrMo4.

Oba čelika su na kraju ispitivanja pokazala razaranje karakteristično za zamor materijala.

Iako su analizirana dva čelika koja pripadaju različitim klasama koji su različitog hemijskog sastava, mikrostrukture i mehaničkih svojstava u oba slučaja merenje hrapavosti je potvrdilo zaključak o njihovoj kavitacionoj otpornosti dobijen merenjem gubitaka mase.

Snimljene linije profila oštećenih površina pokazale su da je njima moguće proceniti ponašanje materijala i prikazati reljef površine oštećene dejstvom kavitacije mnogo brže nego izradom poprečnih preseka uzoraka i opažanja profila oštećene površine na taj način.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekta TR 35002.

LITERATURA

- [1] S.K. Suslick, Sonoluminescence and Sonochemistry, in: R.A. Meyers, (Ed.), Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3rd ed., Academic Press, San Diego, CA, 2001.
- [2] S.K. Suslick, Sonochemistry, in: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [3] S. Suslick, A. Crum, Handbook of Acoustics, Wiley, New York, 1994.
- [4] C.E. Brennen, Cavitation and Bubble Dynamics, University Press, Oxford, 1995.
- [5] S.M. Ahmed, K. Hokkirigawa, R. Oba, Fatigue failure of SUS 304 caused by vibratory cavitation erosion, Wear **177** (1994) 129–137.
- [6] F.G. Hammit, Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [7] A.Karimi, J.L. Martin, Cavitation erosion of materials, Int. Met. Rev. **31** (1986) 1–26.
- [8] F.J. Heyman, Characterization and Determination of Erosion Resistance, ASTM STP474, 1970, pp. 212–222.
- [9] ASTM Standard G32-92, Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02, ASTM, Philadelphia, 1992.
- [10] M. Dojčinović, Uticaj strukture na mehanizam razaranja čelika pod dejstvom kavitacije, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2007.
- [11] M. Dojčinović, Comparative cavitation erosion test on steels produced by ESR and AOD refining, Mater. Sci.-Poland **29** (2011) 216–222.
- [12] M. Dojčinović, S. Marković, The morphology of cavitation damage of heat-treated medium carbon steel, J. Serb. Chem. Soc. **71** (2006) 977–984.
- [13] M. Dojčinović, T. Volkov-Husović, Cavitation damage of the medium carbon steel: Implementation of image analysis, Mat. Lett. **62** (2008) 963–958.
- [14] M. Dojčinović, V. Đorđević, Laboratorijsko istraživanje kavitacione otpornosti materijala – modificirana ultrazvučna metoda, Metalurgija – MJoM. **3** (2008) 217–228.
- [15] S. Hattori, R. Ishikura, Revision of cavitation erosion data base and analyses of stainless steel data, Wear **268** (2010) 109–116.
- [16] A.Krela, The influence of TiN coatings properties on cavitation erosion resistance, Surf. Coat. Tech. **204** (2009) 263–270.
- [17] M. Bučko, S.I. Stevanović, M.V. Tomić, M.G. Pavlović, J.B. Bajat, Specifičnosti elektrohemijaskog taloženja i morfologija Zn–Mn prevlaka dobijenih iz pirofosfatnog elektrolita, Hem. Ind. **65** (2011) 295–303.

SUMMARY**ROUGHNESS MEASUREMENT AS AN ALTERNATIVE METHOD IN EVALUATION OF CAVITATION RESISTANCE OF STEEL**

Marina Dojčinović

University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

The purpose of this study was to investigate possible application of roughness measurement in the evaluation of resistance of steel under conditions of cavitation effect, where these materials are commonly used. Different classes of steel were selected for testing. Cavitation testing was performed by using the ultrasonic vibratory cavitation test set up (stationary specimen method). Mass loss and surface degradation of investigated samples were monitored during the exposure to cavitation erosion. Mass loss was measured by an analytical balance. The morphology of the damaged surfaces with the change of the test period was analyzed using scanning electron microscopy (SEM). The surface roughness tester was used to monitor changes of surface roughness during the test and for obtaining the line profile of surface samples after cavitation tests. Cross-sections of samples were made after testing and optical microscopy was used to obtain complete information about the roughness change and compare the images with the lines of the profile obtained by the measurement of roughness. It can be concluded that the behaviour of steel under conditions of cavitation can be estimated by measuring the change in surface roughness. Conclusions adopted based on roughness changes are consistent with those based on measurements of mass loss and morphology of surface damage during cavitation testing time.

Keywords: Cavitation • Low-alloyed steel
• High-alloyed steel • Roughness • Scanning electron microscopy • Optical microscopy