

LABORATORIJSKO ISTRAŽIVANJE KAVITACIONE OTPORNOSTI MATERIJALA – MODIFICIRANA ULTRAZVUČNA METODA

LABORATORY INVESTIGATION OF CAVITATION RESISTANCE OF MATERIALS – MODIFIED ULTRASONICALLY INDUCED CAVITATION TEST METHOD

MARINA DOJČINOVIĆ¹, VITOMIR ĐORĐEVIĆ²

¹*Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd,* ²*Mašinski fakultet, Beograd*

IZVOD

Kavitaciona erozija predstavlja uvek aktuelan problem kod mašina čiji su elementi, kao što su propeleri, lopatice vodnih turbina i pumpi, pri radu izloženi dejstvu brzog toka tečnosti. Dosadašnja istraživanja pokazala su da elementi hidrauličnih mašina u zoni dejstva kavitacije mogu biti izloženi ne samo mehaničkom dejstvu već i elektrohemijskoj koroziji, kao i lokalnom povišenju temperature. Otuda materijali za izradu elemenata hidrauličnih mašina treba da imaju visoku plastičnost, tvrdoću, čvrstoću, dinamičku čvrstoću i korozionu postojanost. Ova svojstva zavise pre svega od hemijskog sastava i strukture materijala.

U radu je analiziran fenomen kavitacije sa aspekta laboratorijskih istraživanja primenom modificirane ultrazvučne metode.

Ključne reči: kavitacija, kavitaciona otpornost, brzina kavitacione erozije, modificirana ultrazvučna metoda

ABSTRACT

Cavitation erosion represents an actual problem in machines, whose components such as propellers, blades of hydraulic pumps and turbines, are exposed to high-speed flow of liquid. Research exhibited that hydraulic machinery parts during cavitation are exposed to mechanical action, electrochemical corrosion as well as local temperature increase. Therefore, high ductility, hardness, tensile strength, dynamic strength and corrosion resistance represent main properties in the choice of materials for producing hydraulic machinery parts. These properties depend on chemical composition and microstructure of materials. In this paper cavitation phenomenon was analyzed from laboratory investigation stand point by use modified ultrasonically induced cavitation test method.

Key words: cavitation, cavitation resistance, cavitation rate, modified ultrasonically induced cavitation test method

1. UVOD

Kavitacija predstavlja nestacionaran proces stvaranja, rasta i kondenzacije (implozije) mehura unutar tečnosti. Početak nastajanja kavitacije vezan je za veličinu pritiska u tečnosti. Smanjenjem pritiska na kritičnu vrednost, odnosno kada pritisak dostigne vrednost isparavanja tečnosti na određenoj temperaturi, dolazi do pojave stvaranja mehura i taj trenutak se smatra početkom nastajanja kavitacije. Smanjenje pritiska tečnosti može biti prouzrokovano prekomernim padom pritiska ili lokalnim ubrzanjem struje tečnosti. Pri lokalnom ubrzanju tečnosti, brzina strujanja raste uz istovremeni pad pritiska, čime se stvaraju uslovi za nastajanje kavitacije. Struja tečnosti nosi sa sobom nastale mehure pare. Kada dođu u polje povećanog pritiska prestaju uslovi za opstanak mehura pare i dolazi do njihove kondenzacije (implozije). Ako se kondenzacija završava blizu površine čvrstog tela ili na njoj, dolazi do pojave razaranja materijala i ta pojava dobila je naziv kavitaciona erozija.

Proces kojim se materijal odvaja od čvrste površine naziva se kavitaciona erozija a rezultujuće oštećenje je nazvano kavitaciono oštećenje. Kavitaciona oštećenja su primеćena na brodskim propelerima i hidropofilima; na branskim prelivima, ventilima, tunelima i drugim hidrauličnim strukturama, na hidrauličnim pumpama i turbinama. U hidrosistemima, velika suženja u prolazu tečnosti prouzrokuju kavitaciono oštećenje nizvodno od prolaza i u ventilima, zatvaračima, ležištima i razmenjivačima toplote.

2. OPŠTE O KAVITACIJI

Nesposobnost tečnosti da izdrže dejstvo većih zatezних napona dovodi do pojave kavitacije pri znatnom smanjenju pritiska, odnosno do narušavanja neprekidnosti sredine i obrazovanja praznih prostora (mehura) ispunjenih parama i gasovima. Kada se ovako stvoreni mehuri prenesu strujanjem tečnosti u oblast pritiska većeg od pritiska isparenja, oni nestaju - implodiraju u vrlo kratkom vremenu (mikrosekunde). Mehuri koji implodiraju unutar tečnosti ne predstavljaju opasnost jer njihovu energiju apsorbuje sama tečnost. Mehuri koji implodiraju na površini ili blizu površine čvrstog tela izazivaju razaranja površine materijala [1,2,3].

Pad pritiska koji dovodi do pojave kavitacije može biti izazvan različitim razlozima u zavisnosti od uslova eksploatacije i konstruktivnih svojstava protočnih elemenata. Zavisno od načina pada pritiska u tečnosti ispod pritiska pare, razlikuju se:

- *strujna kavitacija*, kod koje je pritisak pao usled dostizanja određene brzine strujanja
- *talasna kavitacija*, kod koje pad pritiska izaziva oscilovanje tečnosti, što prouzrokuje naizmenično smenjivanje udarnih talasa.

Na osnovu teorijskih razmatranja naponi istezanja idealne tečnosti iznose do 325 MPa. Mnogobrojna ispitivanja vode, iz koje su odstranjene čvrste čestice i gasovi, dala su vrednosti napona istezanja 15 do 20 MPa, što je za oko 15 puta manje od teorijskih vrednosti. Ako bi obična voda imala navedena svojstva, bez obzira na razliku između teorijskih i eksperimentalnih vrednosti napona istezanja, pri znatnom padu pritiska, pa čak i do dubokih vakuma, ne bi bilo narušavanja neprekidnosti tj. pojave kavitacije. Međutim, realne tečnosti se razaraju, tj. kavitacija se pojavljuje već pri pritiscima približno jednakim pritiscima isparenja koji zavise od vrste tečnosti i temperature.

Da bi se objasnilo ovakvo ponašanje realnih tečnosti, urađena su mnogobrojna ispitivanja na osnovu kojih je prihvaćeno jedinstveno mišljenje o postojanju žarišta razaranja, koja su nazvana "jezgra kavitacije". Ova jezgra kavitacije narušavaju neprekidnost sredine, tj. kavitacija se pojavljuje pri beznačajno malim vrednostima napona istezanja. Fizički model "jezgra kavitacije" može biti predstavljen u vidu mehura u vodi, nerastvorenih gasova, čvrstih nekvašenih čestica ili kao nekvašene čestice u čijim se porama nalaze nerastvoreni gasovi. Teorijski i eksperimentalno je dokazano da čestice koje kvase potpuno ili delimično čvrste površine, nemaju uticaja na napon istezanja. Od jednog takvog jezgra nastaje kavitacioni mehur. Veličine mehura mogu biti veoma različite, od jednog dela kubnog milimetara do nekoliko desetina kubnih milimetara. Rezultati ispitivanja više autora [4], pokazuju da pritisak i temperatura koji se javljaju u fazi nestajanja kavitacionih mehura, kreću se u širokim granicama. Pritisak unutar mehura iznosi od 125 do 250 MPa a temperatura od 230 do 720°C.

Pri razmatranju pojave kavitacije ne smemo zanemariti i prirodu same tečnosti, tj. njena fizičko - hemijska svojstva, površinske napone, viskozitet i temperaturu. Ispitivanja uticaja površinskih napona i viskoziteta tečnosti na pojavu i razvoj kavitacije suviše su složena, a dobijeni rezultati su dosta protivurečni da bi se mogli doneti neki određeni zaključci. Temperatura vode pokazuje nejednoznačni uticaj na pojavu kavitacije. Sa povećanjem temperature do oko 60°C intenzitet kavitacije raste i dostiže maksimum, a zatim opada.

Površina tela koja je u dodiru sa tečnošću ima važan uticaj na početak kavitacije i njen razvoj. Od konfiguracije i stepena hrapavosti površine zavisi turbulentnost, lepljenje mehura za površinu i njihovo spiranje i nestajanje. Površine koje su u dodiru sa tečnošću treba da budu izvedene sa što manjom hrapavošću (brušene i polirane).

Kavitacija je pojava koja se odvija u dve faze:

- u prvoj fazi, usled smanjenja pritiska i nesposobnosti tečnosti da izdrži visoke napone istezanja nastaju kavitacioni mehuri; ukoliko bi se proces u trenutku prve faze zaustavio, ne bi se pojavila kavitacija, međutim, čim se stvore mehuri ispunjeni parom, proces je nemoguće zaustaviti.
- u drugoj fazi, kavitacioni mehuri nastali u prethodnoj fazi dospevaju u prostor sa višim pritiskom i implodiraju (nestaju) u jako malom intervalu vremena (μs), a pritisak u tečnosti u toku implozije jako raste (posledica je naglo povišenje pritiska u tečnosti).

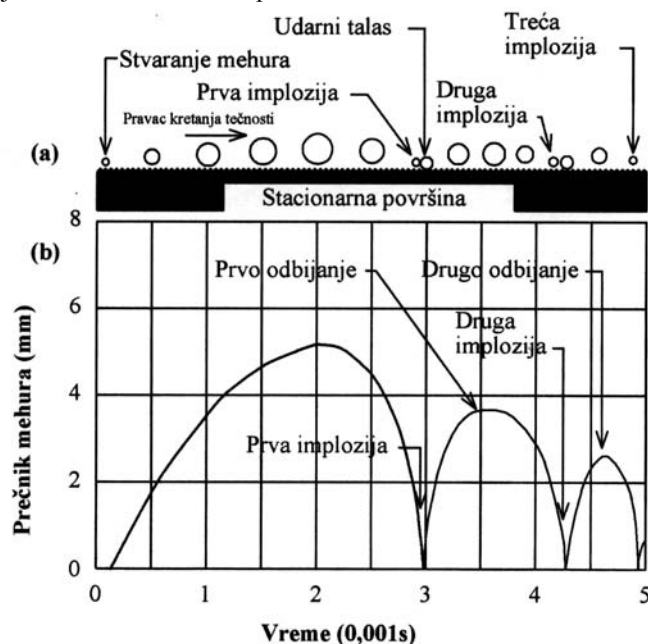
Posledica druge faze odnosno implozije mehura, ispoljava se kroz oštećenja materijala (kavitaciona erozija), tj. samo oni mehuri koji implodiraju u blizini površine ili na samoj površini mogu da izazovu razaranje materijala, dok energiju implozije mehura u masi tečnosti apsorbuje sama tečnost. Tok razvoja kavitacije može se predstaviti u tri osnovne forme:

- početnu kavitaciju karakteriše slab porast šuma i mala količina nastalih mehura koji obrazuju nestabilnu kavitacionu zonu. Uticaj implozije mehura na razaranje materijala je neznatan. Ova forma neznatno razara materijal.

- potpuno razvijenu kavitaciju karakteriše obrazovanje stabilne kavitacione zone određene veličine na površini opstrujavanog materijala. Potpuna kavitacija praćena je pojavom šuma i snažnim vibracijama. Ovaj oblik razvoja kavitacije je najopasniji jer znatno razara materijal.
- superkavitacijom se naziva stanje izazvano stvaranjem kavitacione zone koja se proteže daleko iza opstrujanih površina. Kavitacioni mehuri nastali na čvrstim površinama graničnih zidova nestaju u struji tečnosti. Ovakva kavitacija ne razara materijal. Implozija mehura odvija se u masi tečnosti i nema razaranja materijala.

3. KARAKTER KAVITACIONOG RAZARANJA

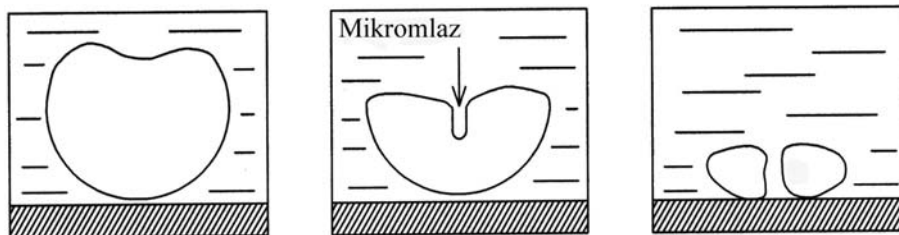
Nestacionarnost kavitacione zone i njome izazvana promena strujanja dovodi do značajnih pulsacija pritiska koji izazivaju dinamička naprezanja materijala. Rezultati mnogih istraživanja u eksploataciji ukazuju na pojavu snažnih vibracija celog agregata, što prouzrokuje zamor materijala i razaranja onih elemenata koji nisu direktno izloženi dejstvu kavitacije. Nestajanje kavitacionih mehura, kada dođu u oblast pritiska većeg od pritiska isparenja, dešava se u vrlo kratkom vremenu i praćeno je jakim pojavom šuma. Sama pojava šuma nema štetnih posledica.



Slika 1. Mehanizam rasta, implozije i odbijanja mehura: a) šematski prikaz uzastopnih stadijuma rasta, implozije i odbijanja jednog mehura; b) dijagram promene prečnika mehura u zavisnosti od vremena

Figure 1. Mechanism of cavity growth, collapse and rebound: a) Schematic representation of successive stages of growth, collapse and rebound of a single cavity, b) Graph of cavity diameter as a function of a time

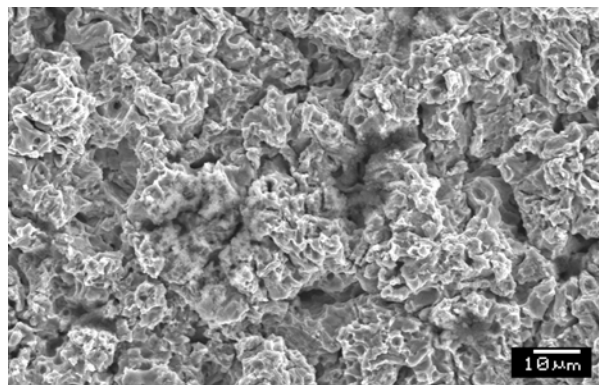
Implozije mehura na površinama elemenata dovode do oštećenja materijala. Tačan mehanizam kojim implozije mehura oslobađaju izražene lokalne sile nije potpuno razjašnjen. Ipak, najverovatnije će površine biti oštećene udarnim talasima nastalim implozijom mehura i neposrednim obnavljanjem mehura, proces poznat kao odbijanje, slika 1, ili udarom mikromlaza tečnosti tokom implozije mehura usled asimetričnosti same implozije, slika 2 [5]. I odbijanje i asimetrična implozija sa nastajanjem mikromlaza proučavani su eksperimentalno i delimično izračunati analitički [1,3,6,7].



Slika 2. Šematski prikaz uzastopnih stadijuma asimetrične implozije mehura sa udarom mikromlaza o čvrstu površinu

Figure 2. Schematic representation of successive stages of nonsymmetrical cavity collapse with microjet impingement against a solid surface

Razorene površine delova hidrauličnih mašina koje su izložene dejstvu kavitacije, mogu u vrlo kratkom vremenskom intervalu dostići široke razmere, otežati normalnu eksploataciju i onemogućiti dalju upotrebu. U zavisnosti od intenziteta i vremena dejstva, površine razorene kavitacijom veličine su od nekoliko kvadratnih milimetara do nekoliko kvadratnih metara. Dubina kaverni nastalih dejstvom kavitacije dostiže od 1 do 100mm. Proces razaranja može trajati od nekoliko minuta do nekoliko hiljada časova rada mašine. Mikroskopska slika razorenih površina predstavlja skup dubokih kratera nastalih ispadanjem čestica materijala i prslina, slika 3.



Slika 3. Karakterističan izgled površine oštećene kavitacijom, x1000, SEM

Figure 3. SEM micrograph of a surface damaged by cavitation, showing typical dimpled rupture, magnification $\times 1000$.

Praksa je pokazala da do danas nijedan materijal tvrd ili mek, krt ili žilav, hemijski aktivan ili inertan, polimerni materijali, keramika, staklo, beton i drugi nemetalni materijali, nisu u stanju da se trajno suprotstave kavitacionom dejstvu [3].

Prva zapažanja u vezi sa kavitacijom datiraju iz XVIII veka. Ojler (Euler) je još 1754. godine predvideo smetnje u radu hidrauličnih mašina usled isparenja tečnosti prouzrokovanih niskim pritiscima. Tomson (Thomson) je 1887. godine dokazao teorijski mogućnost obrazovanja praznih prostora pri strujanju oko cilindra i povezao pojavu kavitacije sa nastajanjem vrtloga. U praksi, kavitacija se pominje 1897. godine sa povećanjem brzine strujanja usled povećanog broja obrtaja brodskih propelera, turbinskih kola i radnih kola pumpi [8]. Do tada nepoznata pojava razaranja materijala je 1918. godine teško razorila prve velike Kaplanove turbine. Upravo to iskustvo dalo je podstreka naučno - istraživačkom radu na ovoj pojavi. Mnogobrojni radovi posvećeni istraživanju procesa kavitacije i boljem poznavanju njenog mehanizma delovanja ukazuju na realnu mogućnost da se njome ovlada.

4. BRZINA KAVITACIONE EROZIJE

Sposobnost materijala da se suprotstavi razaranju usled dejstva kavitacije, naziva se otpornost materijala na dejstvo kavitacije ili kavitaciona otpornost. Kavitaciona otpornost materijala menja se u širokim granicama u zavisnosti od strukturnih, fizičkih, mehaničkih, hemijskih, električnih i termodinamičkih svojstava, kao što su: modul elastičnosti, granica tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje, kontrakcija, indeks deformacionog ojačavanja, tvrdoća, svojstvo zamora, žilavost materijala, toplotna provodljivost, temperatura topljenja, elektroprovodljivost, kristalna građa, hrapavost površine i drugo. Ne treba zaboraviti da je promenljivost navedenih svojstava u zavisnosti od temperature, kao i da se stepen njihovog uticaja na kavitaciono razaranje materijala može menjati sa promenom parametara strujanja i sastava tečnosti [3]. Poređenjem karaktera razaranja i ponašanja materijala izloženog kavitaciji, stvaraju se uslovi za eksperimentalno dobijanje kinetičke krive u koordinatnom sistemu - gubitak mase, vreme razaranja [8].

Brzina kavitacione erozije meri se kao gubitak mase ili zapremine materijala u jedinici vremena a za definisanje brzine kavitacione erozije koriste se dijagrami *vreme ispitivanja – gubitak mase*. Gubitak mase nastale kavitacionim oštećenjem nanosi se na ordinatnu 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 se može nazvati brzinom kavitacione erozije.

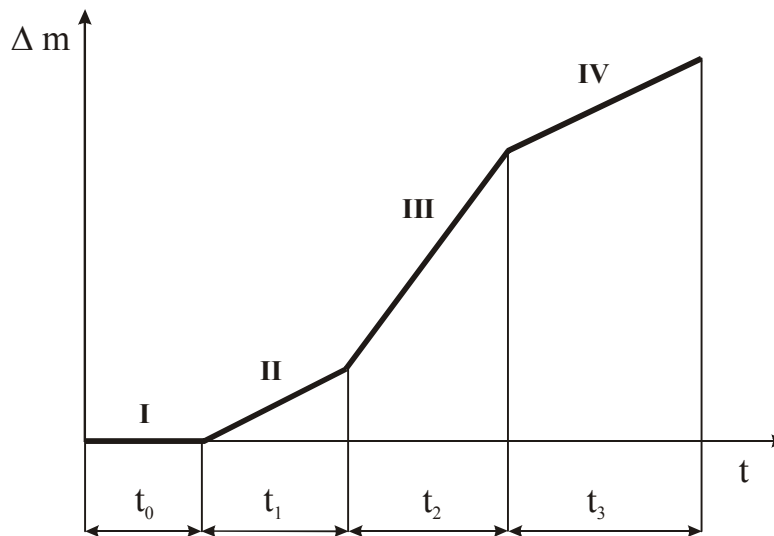
Kinetička kriva dobijena eksperimentalnim putem, prikazana slikom 4, koja daje vezu između gubitaka mase i vremena kavitacije, podeljena je na četiri perioda.

Prvi period (t_0) je tzv. inkubacioni period, kada praktično ne dolazi do gubitka mase usled kavitacije, a energija udara se u ovom periodu uglavnom troši na plastičnu deformaciju sa приметnom pojavom mikro i makro reljefa. Eroziono oštećenje većine materijala se ne uočava kao gubitak mase tokom inkubacionog perioda.

Drugi period (t_1) je period početka prvih neznatnih razaranja površinskog sloja praćenog minimalnim gubitkom mase. Površina izložena kavitaciji ima na sebi veći broj malih nepravilnih kratera.

Treći period (t_2) predstavlja period ubrzanog razaranja, praćenog izraženim gubitkom mase. Sitni krateri nastali u prethodnom periodu se spajaju obrazujući čitave jame na površinskom sloju izloženom kavitaciji.

Četvrti period (t_3) 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.



Slika 4. Karakteristična kriva kavitacionog razaranja

Figure 4. Schematic representation of typical variation of erosion rate with exposure time

Dužina perioda inkubacije i maksimalni stepen oštećenja zavise od intenziteta kavitacije, svojstava materijala, i (u najnižem stepenu) od prvobitnog stanja površine. Glatka površina često produžava period inkubacije ali ne utiče na vrednost maksimalnog stepena oštećenja. Niska hidrodinamička pojačanja, hemijske reakcije materijala i okoline mogu takođe uticati na stepen oštećenja.

Inkubacioni period se najverovatnije poklapa sa vremenom potrebnim da se deformacionim ojačavanjem razvije podpovršinski sloj. U ovom periodu se samo javljaju površinska oštećenja oblika jamica nastala gubitkom mikroskopskih čestica, sa različitim mesta na površini. Kada počne gubitak mase, karakteristike površine se menjaju, javljaju se pukotine, duboke jamice i zamor postaje očigledniji. Tačan mehanizam zavisi od svojstava materijala i hidrodinamičkog intenziteta. Smanjenje nivoa oštećenja se verovatno javlja kada površina postane toliko hrapava, da je intenzitet pojedinačnih udara smanjen prisustvom tečnosti zadržane između deformacionih grebena ili smanjen samim grebenima. Napredovanje nivoa kavitacione erozije prouzrokuje karakteristična oštećenja oblika saća.

Na osnovu navedenih činjenica može se zaključiti da je razaranje materijala sporije a time i duži vek trajanja elemenata izloženih kavitaciji ukoliko je inkubacioni period duži, tako da je za ocenu otpornosti materijala na kavitaciju moguće uslovno uzimati njegov inkubacioni period.

5. METODE ZA LABORATORIJSKO ISTRAŽIVANJE KAVITACIONE OTPORNOSTI MATERIJALA

Otpornost materijala na dejstvo kavitacije – brzina erozije, menja se u širokim granicama, a zavisi od njegovih fizičkih i mehaničkih svojstava, hemijskog sastava i strukture, kao i od hidrodinamičkih uslova strujanja i svojstava tečnosti. Ispitivanje otpornosti materijala elemenata na dejstvo kavitacije neposredno na objektima, tj. u stvarnim uslovima, pokazuje najverodostojnije rezultate. S obzirom da je za ovaj način ispitivanja kavitacione erozije potreban dug vremenski period (utvrđivanje gubitka mase može se raditi samo za vreme generalnih remonta), nepovoljna kontrola i veliki troškovi, ovaj način ispitivanja otpornosti materijala na dejstvo kavitacije u radnim uslovima nije našao praktičnu primenu. Zbog toga je razrađeno više metoda za laboratorijsko ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije kao što su [8]:

- metoda koja koristi Venturijevu cev
- metoda sa Venturijevom cevi koja je modifikovana radnom komorom
- metoda koja koristi rotirajući disk
- metoda ispitivanja udarom mlaza tečnosti
- modificirana ultrazvučna metoda.

Prve četiri navedene metode primenjuju se za laboratorijsko ispitivanje strujne kavitacije a peta za laboratorijsko ispitivanje talasne kavitacije.

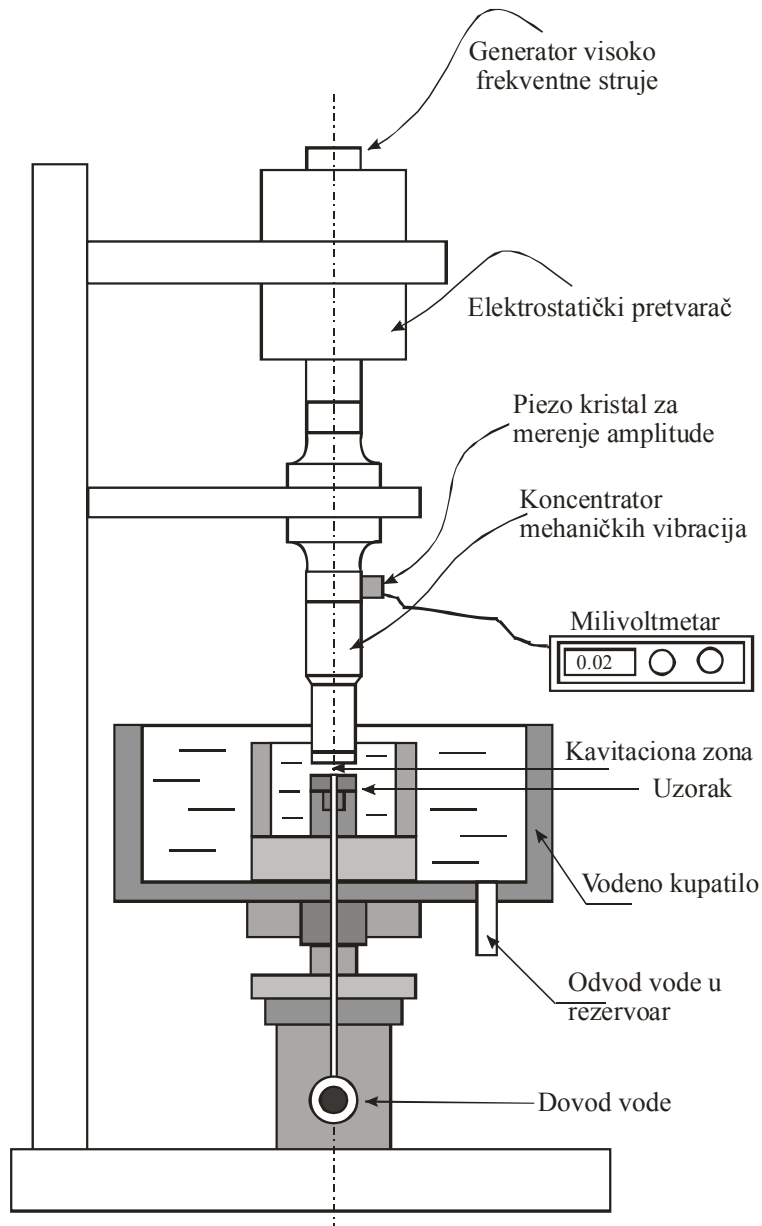
5.1. Modificirana ultrazvučna metoda

Kao rezultat saradnje Nacionalne inženjerske laboratorije Velike Britanije sa Stratklajd (Strathclyde) Univerzitetom Glazgov, za ispitivanje brzine kavitacione erozije razvijena je modificirana ultrazvučna metoda. Uređaj za ispitivanje modificiranom ultrazvučnom metodom, prikazan na slici 5 [9,11].

Uređaj obuhvata:

- Generator visokofrekventne struje
- Elektrostrikcioni pretvarač
- Koncentrator mehaničkih vibracija
- Vodeno kupatilo sa držačem probnog uzorka.

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 piezoelektričnog elementa (cirkonijum-titanat) struja visoke frekvence pretvara u mehaničke vibracije.

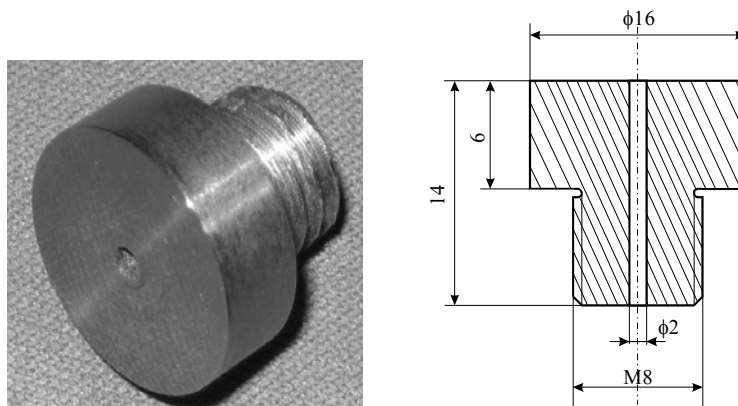


Slika 5. Šema uređaja za ispitivanje kavitacione otpornosti modificiranom ultrazvučnom metodom [9, 11]

Figure 5. Schematic set up for laboratory testing of cavitation resistance by using the modified ultrasonically induced cavitation test method.

Amplituda ovih vibracija se pomoću koncentratora, kruto vezanog za pretvarač, povećava u odnosu 1:8. Koncentrator prečnika $\phi 16\text{mm}$, svojim donjim krajem uronjen je u vodeno kupatilo. Kod ove metode uzorak materijala koji se ispituje ima otvor $\phi 2\text{mm}$ kroz koji struji tečnost a uzorak je postavljen ispod čeone površine koncentratora vibracija sa zazorom. Ispod čeone površine koncentratora i stacionarnog probnog uzorka, obrazuje se jaka kavitaciona zona. Voda se dovodi pumpom kroz otvor na uzorku u vodeno kupatilo i tako hladi uzorak i održava njegovu temperaturu konstantnom a ujedno svojim stalnim protokom stvara polje pritiska koje podstiče imploziju kavitacionih mehura na površini ispitivanog uzorka. Na ovaj način probni uzorak nije izložen mehaničkim naprezanjima u toku ispitivanja.

Na slici 6 data je slika i šematski prikaz uzoraka koji se ispituju modificiranom ultrazvučnom metodom.



Slika 6. Uzorak za ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije modificiranom ultrazvučnom metodom [11]

Figure 6. Specimen for testing of cavitation resistance by using the modified ultrasonic method

Kod ove metode, kavitaciono razaranje materijala zavisi od veličine amplitude, zazora između uzorka i čeone površine koncentratora, protoka vode kroz otvor na uzorku i temperature vode u vodenom kupatilu. Da bi se utvrdile standardne vrednosti gore navedenih parametara ispitivanja, urađena su ispitivanja brzine erozije u zavisnosti od gore navedenih parametara.

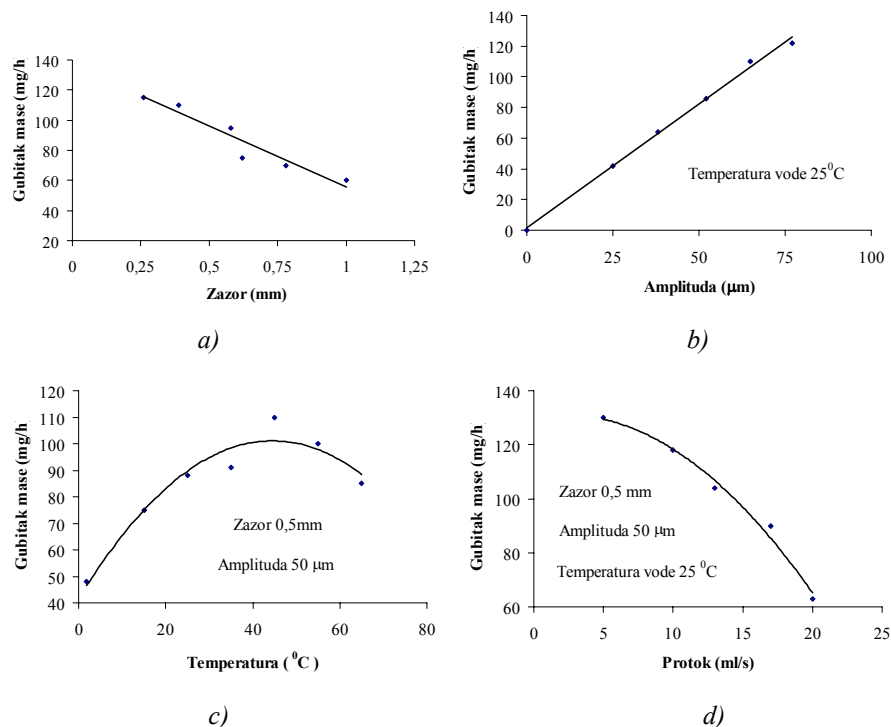
Na slici 7 su dati dijagrami koji pokazuju kako se gubitak mase materijala menja u zavisnosti od zazora, amplitude, temperature i protoka vode i na osnovu njih su odabrane vrednosti ovih parametara koje su u toku ispitivanja održavane konstantnim [10].

Na slici 7a, vidimo da se sa povećavanjem zazora između koncentratora i površine probnog uzorka, brzina erozije smanjuje sa povećavanjem veličine zazora. Ispitivanje je urađeno u opsegu od 0,25-1mm, sa veličinom amplitude vibracije od 50 μm pri temperaturi vode od 25°C i protokom vode od 16-17 ml/s.

Uticaj amplitude vibracija na brzinu erozije, rađen je sa zazorom od 0,5mm i temperaturom vode od 25°C pri protoku vode od 16-17 ml/s, prikazan je na slici 7b. Može se konstatovati da sa povećanjem amplitude raste brzina erozije.

Uticaj temperature na brzinu erozije, urađen je pri atmosferskom pritisku sa zazorom od 0,5 mm i amplitudi od 50 μ m. Ispitivanje je rađeno pri promeni temperature od 2-65 $^{\circ}$ C. Brzina erozije varira sa promenom temperature kako je to pokazano na slici 7c, iz koga se može videti da je maksimalna erozija pri temperaturi od 50 $^{\circ}$ C.

Uticaj protoka tečnosti na brzinu erozije pokazan je na dijagramu na slici 7d, a ispitivanje je urađeno sa amplitudom od 50 μ m i temperaturom vode od 25 $^{\circ}$ C. Ispitivanje je rađeno u opsegu protoka od 5-20 ml/s. Rezultat ovog ispitivanja pokazuje da brzina erozije opada sa povećanjem protoka vode.



Slika 7. Dijagrami uticaja parametara ispitivanja modificiranom ultrazvučnom metodom na gubitak mase materijala: a) uticaj zazora; b) uticaj amplitude; c) uticaj temperature; d) uticaj protoka

Figure 7. The effects of testing parameters on erosion rate: a) effect of separation, b) effect of amplitude, c) effect of temperature, d) effect of water flow

Na osnovu ovih ispitivanja uticaja pojedinih parametara na brzinu erozije, usvojene su standardne vrednosti navedenih parametara, sa ciljem da bi se rezultati istraživanja mogli upoređivati:

- amplituda vibracija 50 μ m
- zazor 0,5mm
- temperatura vode 25 \pm 1 $^{\circ}$ C
- protok od 5-10 ml/s

ZAKLJUČAK

Izučavanje fenomena kavitacije ima veliki značaj jer uslovi za njenu pojavu postoje uvek kada u hidrauličnim sistemima nastane prekomerni pad pritiska ili lokalno ubrzanje struje tečnosti. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se oštećenja uslovljena dejstvom kavitacije pojavljuju kod svih materijala. Primena laboratorijskih metoda za ispitivanje kavitacione otpornosti materijala daje verodostojne rezultate o ponašanju materijala na dejstvo kavitacije. Cilj ovog rada je bio da detaljnije predstavi modificiranu ultrazvučnu metodu. Na osnovu podataka iznetih u okviru ovog rada dati su predlozi za uslove ispitivanja koji se odnose na metalne materijale. Prednost ove metode ispitivanja je da se osim metalnih materijala, na istom uređaju uz manje modifikacije, mogu ispitivati i nemetalni i kompozitni materijali. Prednosti košenja rezultata ovog ispitivanja u određivanju veka trajanja materijala u specifičnim oštrim uslovima rada pretstavlja nesumnjivu prednost modificirane ultrazvučne metode. Navedeno ukazuje na to da će u budućnosti modificirana ultrazvučna metoda ispitivanja materijala koji rade u uslovima prekomernog pada pritiska ili velikih brzina strujanja tečnosti, biti neophodno ispitivanje koje daje pravu sliku o svojstvima tih materijala.

Acknowledgement

This project was funded by the Ministry of Science of the Republic of Serbia through the Projects No. TR 6717, TR 6712 B, 142063 and 142016.

LITERATURA

- [1] Hammit, F.G., Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, McGraw-Hill, 1980.
- [2] Heymann, F.J., High-Speed Impact Between a Liquid Drop and a Solid Surface, *J. Appl. Phys.*, Vol.40, 1969, p.5113-5122.
- [3] Knapp, R.T., Daily, J.W., Hammit, F.G., Cavitation, McGraw-Hill, 1970.
- [4] Bogačev, I.N., Kavitationnoe razrušenje i kavitationnoe stoykie splavy, *Metalurgia*, 1971.
- [5] Failure Analysis on CD-ROM (from ASM Handbook Vol.11), ASM Internacional, 1996.
- [6] Vyas, B., Preece, C.M., *J. Appl. Phys.*, 1976, Vol.47, pp.5133-38
- [7] Rao, B.C.S., Buckley, D.H., *Mater. Sci. Eng.*, 67 (1984) 55-67.
- [8] Đorđević, V., Pregled metoda za laboratorijska ispitivanja kavitacione erozije, *Tehnika, Mašinstvo*, Godina XXII, 1973.
- [9] Modified ASTM G 32 Ultrasonically Induced Cavitation Test Method, ASTM G 32-92 (1992).
- [10] Brunton, W.C., Hobbs, J.M., Laird, A., Investigation of a Cavitating Film Erosion Test, NEL Report No 431, 1969.
- [11] M. Dojcinović, T. Volkov-Husovic, Cavitation damage of the medium carbon steel: Implementation of image analysis, *Materials Letters*, 62 (2008) 953-956.