

UNIVERZITET U BEOGRADU

Dr Marko Pavlović
Dr Marina Dojčinović

**KAVITACIONA OŠTEĆENJA VATROSTALNIH
MATERIJALA**

Monografija

Akadska misao
Beograd, 2020.

Dr Marko Pavlović, master inženjer metalurgije, Kontrol Inspekt, Beograd

Dr Marina Dojčinović, vanredni profesor,
Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu

KAVITACIONA OŠTEĆENJA VATROSTALNIH MATERIJALA

Recenzenti:

Dr Radica Prokić-Cvetković, redovni profesor,
Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Dr Ljubiša Andrić, naučni savetnik, ITNMS Beograd

Izdavač:

Akadska misao, Beograd

Tiraž: 100 primeraka

Štampa:

Akadska misao, Beograd

ISBN 978-86-7466-823-8

NAPOMENA: Fotokopiranje ili umnožavanje na bilo koji način ili ponovno objavljivanje ove knjige u celini ili u delovima - nije dozvoljeno bez saglasnosti i pismenog odobrenja izdavača.

PREDGOVOR

Monografija pod nazivom: "Kavitaciona oštećenja vatrostralnih materijala" sadrži pregled dostupne tehničke literature iz oblasti istraživanja relacije kavitacija /oštećenje vatrostralnih materijala. Sadrži, takođe, i rezultate višegodišnjih istraživanja autora iz oblasti kavitacije, određivanja kavitacionih svojstava različitih metalnih, polimernih i keramičkih materijala, proučavanja nastanka i razvoja oštećenja materijala pod dejstvom kavitacije, procenu rizika pojave oštećenja i proučavanje mera za smanjenje i eliminaciju štetnog uticaja kavitacionih opterećenja u industrijskim procesima. Deo rezultata u ovoj monografiji je proizašao iz oblasti više naučno-istraživačkih projekata koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Deo istraživanja odnosi se i na rezultate doktorske disertacije pod nazivom: "Nastajanje i razvoj oštećenja vatrostralnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije" autora Marka Pavlovića, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd.

Budući da se ovom specifičnom oblašću bavi mali broj istraživača u domaćoj literaturi ima nedovoljno publikacija iz oblasti kavitacije i ponašanja vatrostralnih materijala pod dejstvom kavitacionih opterećenja. Zato, ova monografija može da pruži korisne informacije budućim mladim istraživačima, studentima i inženjerima metalurške, mašinske i građevinske struke, a posebno istraživačima koji se bave vatrostralnim materijalima i njihovom primenom u rigoroznim uslovima eksploatacije kao što su procesi u metalurgiji i rudarstvu. Prikazan je širi literaturni pregled koji čitaoci mogu da koriste pri svojim istraživanjima u ovoj oblasti. Cilj je bio, ne samo prikaz informacija o svetskim naučnim dostignućima iz ove oblasti, već da se ukaže na raznovrsnost nemetalčnih mineralnih sirovina, kojima raspolaže naša zemlja, na mogućnosti istraživanja tehnologija i postupaka njihove prerade u vatrostralne proizvode povišene otpornosti za primenu u rigoroznim eksploatacionim uslovima. Na osnovu rezultata određivanja otpornosti na dejstvo kavitacije različitih vatrostralnih materijala (na bazi rovnog, livenog i sinterovanog bazalta, mulita, kordijerita, cirkonijum-silikata), prikazanih u monografiji, razvijena je metodologija ocene otpornosti na dejstvo kavitacije materijala zasnovane na vrednostima kavitacionih brzina i analize morfologije oštećenja površine ispitivanih materijala. Istražena metodologija

karakterizacije vatrostralnih materijala (zasnovana na primeni ultrazvučne vibracione metode, shodno standardu ASTM G32) može da se koristi u praksi za izbor materijala za izradu različitih komponenti inženjerskih konstrukcija i primenu u uslovima eksploatacije u kojima se javljaju visoke temperature, pritisci, habanje, kavitaciona oštećenja. Takođe, metodologija može da se koristi za buduća istraživanja novih vatrostralnih materijala, o čemu je dato dosta podataka.

Autori se zahvaljuju kolegama iz Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina Beograd na saradnji tokom sinteze i karakterizacije vatrostralnih uzoraka koji su korišćeni tokom istraživanja.

Autori se zahvaljuju recenzentima dr Radici Prokić-Cvetković, red. prof. Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu i dr Ljubiši Andriću, naučnom savetniku Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd, na pomoći i korisnim sugestijama koje su im pružili tokom koncipiranja, prikupljanja materijala i pisanja ove monografije.

Beograd, januara 2020.

Autori

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. VATROSTALNI MATERIJALI– SINTEZA, STRUKTURA, SVOJSTVA.....	3
2.1. Osnovne karakteristike vatrostalnih materijala.....	3
2.2. Klasifikacija vatrostalnih materijala	6
2.3. Zahtevi kvaliteta vatrostalnih materijala.....	6
2.4. Primena vatrostalnih materijala	7
2.5. Vatrostalni premazi.....	8
2.5.1. Livački vatrostalni premazi	8
2.5.2. Zaštitni vatrostalni premazi.....	11
Literatura.....	13
3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROCESA KAVITACIJE.....	24
3.1. Kavitacija- teorijski aspekt	25
3.2. Istorijat proučavanja kavitacije	28
3.3. Tipovi kavitacije	28
3.4. Efekti delovanja kavitacije.....	29
3.5. Uslovi nastanjanja kavitacije	31
3.6. Mehanizam implozije kavitacionog mehura.....	34
3.7. Oštećenja materijala pod dejstvom kavitacije.....	43
3.7.1. Oštećenja metalnih materijala pod dejstvom kavitacije.....	43
3.7.2. Oštećenja keramičkih i polimernih materijala pod dejstvom kavitacije	46
3.7.3. Praćenje nastajanja i razvoja oštećenja materijala pod dejstvom kavitacije	49
Literatura.....	53
4. LABORATORIJSKE METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI VATROSTALNIH MATERIJALA NA DEJSTVO KAVITACIJE	63
4.1. Destruktivne metode karakterizacije.....	64
4.1.1. Ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije primenom ultrazvučne vibracione metode.....	64
4.1.2. Metoda ispitivanja kavitacionim mlazom tečnosti	67
4.1.3. Kavitacioni tuneli velike brzine	68
4.1.4. Ispitivanje kvaliteta zaštitnih vatrostalnih premaza	71
4.2. Nedestruktivne metode karakterizacije.....	71
4.2.1. Rendgenska difrakciona analiza	71
4.2.2. Kvalitativna mineraloška analiza.....	71
4.2.3. Skenirajuća elektronska mikroskopija	72
4.2.4. Analiza slike.....	73
4.2.5. Karakterizacija kavitacionih jamica.....	73

Literatura.....	75
5.KAVITACIONA OŠTEĆENJA VATROSTALNIH MATERIJALA	80
5.1. Kavitaciona oštećenja uzoraka bazalta	81
5.1.1. Struktura, svojstva i primena bazalta.....	81
5.1.2. Otpornost rovnog bazalta iz ležišta Vrelo– Kopaonik na dejstvo kavitacije.....	83
5.1.3. Otpornost livenog bazalta na dejstvo kavitacije.	92
5.1.4. Otpornost sinterovanog bazalta na dejstvo kavitacije	101
5.1.5. Poređenje svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka na bazi rovnog, livenog i sinterovanog bazalta	110
5.2. Kavitaciona oštećenja vatrostalnih materijala na bazi sinterovanog mulita.....	113
5.2.1. Struktura, svojstva i primena mulita	113
5.3. Kavitaciona oštećenja vatrostalnih materijala na bazi sinterovanog kordijerita	123
5.3.1. Struktura, svojstva i primena kordijerita.....	123
5.4. Kavitaciona oštećenja vatrostalnih materijala na bazi sinterovanog cirkonijum-silikata	132
5.4.1. Struktura, svojstva i primena cirkonijum-silikata.....	132
5.5. Poređenje svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka sinterovanog mulita, sinterovanog kordijerita i sinterovanog cirkonijum-silikata	140
Literatura.....	143
6. KAVITACIONA OŠTEĆENJA ZAŠTITNIH VATROSTALNIH PREMAZA.....	154
6.1. Poređenje svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije zaštitnih vatrostalnih premaza tipa P ₁ i P ₂	163
Literatura.....	164

1. UVOD

Vatrostalni materijali predstavljaju veliku grupu materijala raznorodnog hemijsko-mineralošskog sastava, različite strukture i svojstava. Njihova osnovna namena je da služe kao konstrukcioni materijali u industrijskim uređajima u kojima vladaju visoke temperature. Ovi materijali primenjuju se i u eksploatacionim uslovima u kojima su prisutni pritisci, protok fluida i suspenzija, korozija, habanje, dejstvo reaktivnih materijala kao što su tečni metali, šljaka, alkalije, jedinjenja hlorida, korozivni gasovi. U takvim uslovima eksploatacije nastaju oštećenja i razaranja površine materijala koja su često uzrok iznenadnog i preranog otkaza opreme.

U metalurškim procesima najčešće se primenjuju vatrostalne sirovine na bazi: cirkonijum–silikata, hromita, mulita, kordijerita, korunda, talka, pirofilita, šamotno–kvarcne i druge mešavine. Ove sirovine koriste se za izradu delova opreme za topljenje i livenje, delova peći za termičku obradu, za izradu obloga mlinova, obloga flotacionih ćelija, fazonskih odlivaka. Takođe, koriste se kao punioci za vatrostalne premaze i punioci za sintezu novih materijala i proizvoda. Posebno su značajna istraživanja primene novih vatrostalnih materijala na bazi nemetaličnih mineralnih sirovina, kao što su bazalti, dijabazi, vulkanski tufovi, perlit i druge sirovine, s obzirom na njihov kvalitet i nalaženje u prirodi u komercijalnim količinama.

Za dobijanje unapred zadate strukture i svojstava vatrostalnih materijala potrebna su istraživanja postupaka pripreme polaznih vatrostalnih sirovina procesima drobljenja, mlevenja i mehaničke aktivacije, postupaka sinteze presovanjem i sinterovanjem, zatim, topljenjem, livenjem i termičkim tretmanom, sol-gel metodama, kao i drugim procesima.

Za ocenu mogućnosti primene materijala u složenim uslovima eksploatacije u metalurgiji, neophodno je razviti metode njihove karakterizacije koje će omogućiti da se, u relativno kratkom vremenu, odrede svojstva i predvidi njihovo ponašanje i vek trajanja u rigoroznim uslovima eksploatacije. Kao brza i ekonomična metoda karakterizacije pokazala se ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom prema standardu ASTM G32. Ovom

metodom određuje se otpornost materijala na dejstvo kavitacije¹. Merenjem ukupnog gubitka mase uzoraka u vremenu delovanja kavitacije određuje se kavitaciona brzina ispitivanih uzoraka. Na osnovu vrednosti kavitacione brzine i analize morfologije oštećenja površine uzoraka određuje se otpornost na dejstvo kavitacije i procena mogućnosti njihove primene u uslovima u kojima se očekuje prisustvo kavitacionih opterećenja.

Ova metodologija određivanja otpornosti uzoraka na dejstvo kavitacije može da se koristi u praksi za izbor vatrostalnih materijala za izradu različitih komponenti inženjerskih konstrukcija, procenu rizika i mera za kontrolu nastajanja i razvoja oštećenja u ekstremnim uslovima eksploatacije u kojima se javljaju visoke temperature, pritisci, habanje, kavitaciona oštećenja. Prema dobijenim rezultatima istraživanja, a i prema podacima iz dostupne literature, pokazano je da se pod dejstvom kavitacije javljaju oštećenja površine i gubitak mase vatrostalnih uzoraka, bez plastične deformacije.

Takođe, za ispitivanje kvaliteta vatrostalnih premaza², koji mogu da se primene za premazivanje i zaštitu delova opreme u metalurgiji, primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom, može da se oceni ponašanje premaza pod dejstvom kavitacije, nastajanje i razvoj oštećenja na površini premaza tokom vremena ekspozicije i sigurnost zaštite tretiranih površina. Detaljnom analizom morfologije oštećenja površine premaza, posebno praćenjem promena površine premaza u ranom periodu dejstva kavitacije, može da se prognozira dalji tok oštećenja slojeva premaza i da se proceni mogućnost primene premaza za date uslove eksploatacije.

¹ Kavitacija predstavlja pojavu nastajanja, rasta i implozije (kolapsa) parnih ili paro-gasnih mehura u tečnosti koja struji. Pri tome, u vrlo kratkim vremenskim intervalima, manje od 1 μ s, lokalno u tečnosti nastaju visoke temperature i pritisci. Energija udarnih talasa i mikro-mlazeva, koji nastaju implzijom mehura, rasipa se unutar tečnosti. Čvrsta površina uzoraka, koja je u kontaktu sa tečnošću, apsorbuje deo energije i pri tome nastaje elastična, plastična deformacija ili razaranje materijala pod dejstvom kavitacije.

² Vatrostalni premazi koji se koriste za zaštitu metalnih i nemetalnih površina su različitog sastava. U istraživanjima je primenjen novi vatrostalni premaz na bazi bazalta, sa vezivom na bazi epoksi-smole, organskim aditivima i organskim rastvaračem.