

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

Marko D. Pavlović

**NASTAJANJE I RAZVOJ OŠTEĆENJA
VATROSTALNIH MATERIJALA NA BAZI
BAZALTA POD DEJSTVOM KAVITACIJE**

Doktorska disertacija

Beograd, 2019.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Marko D. Pavlović

**THE FORMATION AND DEVELOPMENT
OF DAMAGE TO BASALT- BASED
REFRACTORY MATERIALS UNDER THE
EFFECT OF CAVITATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019.

Mentor:

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

Članovi komisije:

1. Dr Nenad Radović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet
2. Dr Ljubiša Andrić, naučni savetnik ITNMS Beograd
3. Dr Radica Prokić- Cvetković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
4. Dr Srećko Manasijević, viši naučni saradnik
LOLA Institut, d.o.o., Beograd

Kandidat:

Marko D. Pavlović, master inženjer metalurgije

Datum odbrane

Doktorske disertacije:

Ova doktorska disertacija je urađena pod rukovodstvom dr Marine Dojčinović, vanrednog profesora Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Veoma se zahvaljujem na pomoći tokom koncipiranja istraživanja, izrade disertacije, tumačenja rezultata i velikoj podršci tokom izrade doktorata.

Zahvalnost dugujem dr Nenadu Radoviću, redovnom profesoru Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, na razumevanju, podršci i odlučnosti da se istraje i završi započeto.

Dr Ljubiši Andriću, naučnom savetniku Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina Beograd zahvaljujem se na svestranoj pomoći u toku studiranja, izrade diplomskog rada, master rada i tokom eksperimentalnih istraživanja u okviru ove disertacije. Zahvalnost mu izražavam i na pomoći, ohrabrenju i razumevanju tokom svih ovih godina.

Dr Radici Prokić-Cvetković, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, članu komisije zahvaljujem se na pomoći i podršci tokom rada.

Zahvalnost dugujem dr Srećku Manasijeviću, višem naučnom saradniku, LOLA Instituta, d.o.o., Beograd, članu komisije na korisnim sugestijama tokom sređivanja teksta disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem prof. dr Milutinu Đuričiću, Univerzitet Union-Beograd, Fakultet za industrijski menadžment, Kruševac na korisnim sugestijama, pomoći i ohrabrenju tokom izrade disertacije i uopšte, zahvalan sam što još uvek postoje nesebični ljudi spremni da pomognu nama mladima, ohrabre nas i upute na zanimljive i korisne procese i materijale koje vredi istraživati.

Zahvalnost dugujem profesorima Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, dr Aleksandru Marinkoviću, vanrednom profesoru, dr Đorđu Veljoviću, docentu i dr Miloradu Zriliću, vanrednom profesoru na pomoći i korisnim sugestijama pri realizaciji dela eksperimentalnih istraživanja.

Kolegama iz Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina Beograd, u kojem se realizovao veći deo eksperimentalnih istraživanja, izražavam veliku zahvalnost na svestranoj pomoći u toku rada. Zahvalnost dugujem dr Mihailu Tošiću, naučnom savetniku koji me je prvi uveo u problematiku dobijanja staklo-keramike na bazi bazalta na početku mog bavljenja bazaltom, kao materijalom tokom izrade diplomskog rada. Posebno se zahvaljujem dr Jovici Stojanoviću, višem naučnom saradniku, dr Draganu Raduloviću, višem naučnom saradniku, dr Milanu Petrovu, naučnom savetniku, dr Srđanu Matijaševiću, naučnom saradniku na pomoći oko realizacije mojih istraživanja.

Na kraju naročitu zahvalnost dugujem svojim roditeljima i prijateljima na podršci i ohrabrenju koju su mi pružali tokom izrade ove disertacije.

NASTAJANJE I RAZVOJ OŠTEĆENJA VATROSTALNIH MATERIJALA NA BAZI BAZALTA POD DEJSTVOM KAVITACIJE

REZIME

Predmet ove disertacije je određivanje nastajanja i razvoja oštećenja vatrostralnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije. Kao osnovni materijal za izradu uzoraka za ispitivanje: rovni, liveni i sinterovani uzorci, korišćen je olivin–piroksenski bazalt iz ležišta Vrelo–Kopaonik. Eksperiment je vođen primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom prema standardu ASTM G32. Za procenu otpornosti na dejstvo kavitacije praćena je promena mase uzoraka u funkciji vremena delovanja kavitacije. Određene su kavitacione brzine kao osnovni pokazatelj otpornosti materijala na dejstvo kavitacije. Nivo degradacije površine uzoraka praćen je primenom analize slike. Promena morfologije površine uzoraka sa vremenom ispitivanja praćena je primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Dobijeni rezultati su pokazali da uzorci livenog i sinterovanog bazalta imaju visok stepen otpornosti na dejstvo kavitacije i da mogu da se primene u uslovima visokih kavitacionih opterećenja. Uzorci rovnog bazalta pokazuju malu otpornost na dejstvo kavitacije što ukazuje da mogu da se koriste u uslovima minornih kavitacionih opterećenja.

U disertaciji su istraživani vatrostralni premazi za primenu u livarstvu na bazi bazalta. Kao vatrostralni punioc u sastavu premaza bazalt se nije do sada koristio. S toga su uporedo vršena istraživanja premaza koji se već koriste u livarstvu na bazi mulita, kordijerita, cirkonijum–silikata i talka. Istraživanjima su definisani sastavi premaza, procesi njihove izrade i primene. Takođe, istraživani su i vatrostralni premazi na bazi bazalta za zaštitu metalnih i nemetalnih površina, delova opreme. Ovi premazi ispitivani su primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom. Rezultati su pokazali zadovoljavajući stepen otpornosti na dejstvo kavitacije ovih vatrostralnih uzoraka.

Takođe, ispitivana je mogućnost primene bazaltnog praha kao ojačivača kompozita sa polimernom osnovom. Ispitivanjem svojstava dobijenih uzoraka kompozita odabranog sastava pokazalo se da imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva (zateznu čvrstoću, čvrstoću na savijanje, tvrdoću) i svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije.

Dobijeni eksperimentalni rezultati istraživanja u okviru ove disertacije mogu da posluže za prognozu otpornosti na dejstvo kavitacije ispitivanih vatrostalnih materijala na bazi bazalta i njihovu primenu u uslovima gde je prisutno dejstvo visokih temperatura, habanja, kavitacije.

Ključne reči: kavitacija, nivo oštećenja, rovni bazalt, liveni bazalt, sinterovani bazalt, vatrostalni premazi na bazi bazalta, kompozit polimerna osnova/ bazalt, nedestruktivne metode ispitivanja

Naučna oblast: Metalurško inženjerstvo

THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF DAMAGE TO BASALT – BASED REFRACTORY MATERIALS UNDER THE EFFECT OF CAVITATION

RESUME

The subject of this dissertation is the determination of the formation and development of damage to refractory materials based on basalt under the effect of cavitation. As the basic material for the preparation of samples for testing: raw, cast and sintered samples, it was used olivine-pyroxene basalt from the Vrelo– Kopaonik deposit. The experiment was conducted using an ultrasonic vibration method with a stationary sample according to the ASTM G32 standard. For the evaluation of cavitation resistance, a change in the mass of the samples in the function of the cavitation time was measured. Cavitation speeds were determined as the basic indicator of the materials resistance to the effect of cavitation. The level of degradation of the surface of the samples was quantified using the image analysis. The change in the morphology of the sample surface with the test time was followed by the use of a scanning electron microscope. The obtained results indicate that the samples of cast and sintered basalt show a high degree of cavitation resistance and that they can be applied in conditions of high cavitation loads. The samples of the raw basalt show little resistance to the effect of cavitation, which indicates that they can be used in conditions of minor cavitation loads.

The dissertation investigated refractory coatings based on basalt for use in foundry. As a refractory filler in the coating composition, basalt has not been used up to now. Thus, research was carried out on coatings already used in foundries based on mullite, cordierite, zirconium–silicate and talc. Research has defined the composition of the coating, the processes of their manufacture and application. Also, protective refractory coatings based on basalt for protection of metal and non-metal surfaces, parts of equipment. Coating compositions and methods of their preparation and application are determined. These coatings were examined using an ultrasonic vibration method with a stationary sample. The results showed a satisfactory degree of cavitation resistance of these refractory samples.

The possibility of using basalt powder as a reinforcing composite with a polymer base was also investigated. By examining the properties of the composite samples obtained, they have been shown to have satisfactory mechanical properties (tensile strength, bending strength, hardness) and properties of resistance to the effect of cavitation.

The obtained experimental results of the research within this dissertation can serve to predict the resistance to the effect of cavitation of tested basalt refractory materials and their application in conditions where the effects of high temperature, wear, cavitation are present.

Key words: cavitation, level of damage, raw basalt, cast basalt. sintered basalt, refractory coating based on basalt, composite polymer matrix/basalt, non-destructive testing

Scientific area: Metallurgical Engineering

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Teorijski deo	
2.1. Osnovni pojmovi o procesu kavitacije.....	4
2.1.1. Teorijski principi procesa kavitacije.....	6
2.1.2. Kavitacija u industrijskim uslovima i mere za smanjenje rizika od oštećenja.....	9
2.1.3. Mehanizmi stvaranja, rasta i kolapsa kavitacionog mehura.....	10
2.1.4. Fizički mehanizmi kavitacije.....	15
2.1.5. Oštećenja materijala nastala dejstvom kavitacije	18
2.2. Osnovne karakteristike vatrostralnih materijala.....	26
2.2.1 Sastav i klasifikacija vatrostralnih materijala.....	27
2.2.2 Primena vatrostralnih materijala.....	29
2.2.3 Vatrostalni materijali za primenu u uslovima dejstva kavitacije.....	30
2.2.3.1 Vatrostalni materijali na bazi mulita.....	30
2.2.3.2. Vatrostalni materijali na bazi kordijerita.....	31
2.2.3.3. Vatrostalni materijali na bazi cirkonijum-silikata.....	32
2.2.3.4. Vatrostalni materijali na bazi hromita.....	33
2.2.3.5. Vatrostalni materijali na bazi talka.....	34
2.2.3.6. Vatrostalni materijali na bazi bazalta.....	34
2.2.4. Vatrostalni premazi.....	36
2.3. Kompoziti polimerna osnova/keramički ojačivač.....	40
3. Eksperimentalni deo.....	43
3.1. Metodologija eksperimentalnog rada.....	43
3.2. Eksperimentalne metode karakterizacije materijala.....	47
3.2.1 Destruktivne metode karakterizacije.....	47
3.2.1.1 Ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije.....	47
3.2.1.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita poliestarska smola/bazalni prah.....	50
3.2.1.3. Ispitivanje kvaliteta Lost foam vatrostralnih premaza na bazi bazalta.....	50
3.2.1.4. Ispitivanje kvaliteta zaštitnih vatrostralnih premaza na bazi bazalta.....	51
3.2.2. Nedestruktivne metode karakterizacije.....	51
3.2.2.1 Rendgenska difrakciona analiza.....	51
3.2.2.2 Kvalitativna mineraloška analiza uzoraka.....	51

3.2.2.3 Skenirajuća elektronska mikroskopija.....	52
3.2.2.4 Analiza slike.....	53
3.3. Sinteza i karakterizacija vatrostralnih materijala za ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije.....	54
3.3.1 Priprema i karakterizacija uzoraka rovnog bazalta (serija RB).....	54
3.3.2 Sinteza i karakterizacija uzoraka livenog bazalta (uzorci LB).....	59
3.3.3 Sinteza i karakterizacija uzoraka sinterovanog bazalta (uzorci SB).....	61
3.3.4 Sinteza i karakterizacija vatrostralnih premaza.....	62
3.3.4.1 Priprema polaznih vatrostralnih prahova, sinteza i karakterizacija Lost foam vatrostralnih premaza (uzorci: LFPB; LFPM; LFPK; LFPCS; LFPT).....	62
3.3.4.2 Sinteza i karakterizacija zaštitnih vatrostralnih premaza (uzorci: PP; PS).....	67
3.3.5 Sinteza i karakterizacija kompozita sa polimernom osnovom i ojačivačem na bazi bazalta (uzorci: (S; K ₁ ; K ₂ ; K ₃ ; K ₄)).....	69
4. Rezultati i diskusija.....	72
4.1. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka rovnog bazalta (serija: RB).....	72
4.1.1. Promena mase uzorka B i određivanje kavitacione brzine.....	72
4.1.2 Analiza slike.....	73
4.1.3 Promena morfologije oštećenja površine uzoraka.....	77
4.2. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka livenog bazalta (serija: LB).....	80
4.2.1 Promena mase uzorka LB i određivanje kavitacione brzine.....	80
4.2.2 Analiza slike.....	81
4.2.3 Promena morfologije oštećenja površine uzoraka.....	85
4.3. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka sinterovanog bazalta (serija: SB).....	88
4.3.1. Promena mase uzorka SB i određivanje kavitacione brzine.....	88
4.3.2. Analiza slike.....	89
4.3.3 Promena morfologije oštećenja površine uzoraka.....	92
4.4. Poređenje svojstava otpornosti na oštećenja vatrostralnih uzoraka na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije (uzorci: RB; LB; SB).....	95
4.5. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka zaštitnih vatrostralnih premaza na bazi bazalta (serija: PP i PS).....	100

4.6. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka kompozita poliestarska smola / bazalt (PES/B).....	108
4.6.1. Poređenje svojstava otpornosti na oštećenja pod dejstvom kavitacije kompozita poliestarska smola/prah bazalta.....	114
5. Zaključak.....	121
Literatura.....	125

Spisak slika

Slika 2.1. Šematski prikaz faznog dijagrama za vodu [2]

(T_r - temperatura trojne tačke; T_c - temperatura kritične tačke)

Slika 2.2. p-V dijagram–Endrjusove izoterme [3].

Slika 2.3. Nastajanje oštećenja metalnih materijala dejstvom kavitacije (prema Dular i saradnici, 2006.) [71].

Slika 2.4. Promena oblika mehura u posmatranom vremenu: a. rast mehura; b. implozija mehura. Strelica pokazuje povećanje vremena. (3D metoda graničnih elemenata simulacije početnog jezgra od 50 μ m na distanci 1.5mm, prolazi razliku pritiska 10 MPa u periodu 2.415 ms, prema C.T.Hisao i saradnici, 2014.) [2, 98].

Slika 2.5. Istraživanje mehanizama kavitacije na hidrofoliji: a. stvaranje oblaka mehura; b. stvaranje vrtloga [3, 76].

Slika 2.6. Primeri oštećenja površine brodskih delova dejstvom kavitacije: a. krma; b. propeler [76, 85].

Slika 2.7. Razbijanje vrha kavitacionih vrtloga [78].

Slika 2.8. Mehanizmi kavitacije: a. sferni kavitacioni oblak; b. "potkovica" kavitacioni oblak; c. "tornado" kavitacioni oblak; d. odvajanje kavitacionog oblaka; e. zatvaranje prikačene praznine (prikaz pojedinih snimaka iz rada Dular i saradnici, 2015.) [104].

Slika 2.9. Tipovi oštećenja pod dejstvom kavitacije na uzorku duktilnog metalnog materijala: a. duboka oštećenja; b. površinska oštećenja [25].

Slika 2.10. Karakteristične krive gubitka mase pod dejstvom kavitacije: a. Fe-Al intermetalne legure; b. keramički uzorci [18].

Slika 2.11. Karakteristična kriva razaranja materijala pod dejstvom kavitacije [3].

Slika 2.12. Ilustracija metode određivanja dimenzija jamice pomoću kontaktnog merača: a. površinska topologija uzorka se postiže merenjem profila dubine duž različitih linija; b. otkrivanje granice jamica na dubini 0,5 μ m; c. izračunavanje prečnika i dubine jamice [2].

Slika 3.1. Šema aparature za ultrazvučnu vibracionu metodu sa stacionatnim uzorkom [243].

Slika 3.2. Mikrofotografije strukture olivin-piroksenskog bazalta: a) izduženi fenokristali plagioklasa; b) kristal olivina i izduženi fenikristal rombičnog piroksena. Snimljene na polarizacionom mikroskopu. Propuštena svetlost, IIN [248].

Slika 3.3. XRD difraktogram uzorka RB [248].

Slika 3.4. SEM mikrofotografija uzorka RB [248].

Slika 3.5. Prisutni sitni mehuri u strukturi rovnog bazalta [248].

Slika 3.6. SEM mikrofotografije uzorka RB sa različitim uvećanjima: vide se jasne granice faza [248].

Slika 3.7. Histogram raspodele veličine zrna punioca manje granulacije za sintezu uzoraka sinterovanog bazalta i vatrostralnih premaza na bazi bazalta.

Slika 3.8. Histogram raspodele faktora oblika zrna punioca manje granulacije za sintezu uzoraka sinterovanog bazalta i vatrostralnih premaza na bazi bazalta.

Slika 3.9. Histogram raspodele veličine zrna punioca na bazi bazalta veće granulacije za sintezu uzoraka kompozita NPS/bazalt.

Slika 3.10. Histogram raspodele faktora oblika zrna punioca na bazi bazalta veće granulacije za sintezu uzoraka kompozita NPS/bazalt.

Slika 3.11. Mikrofotografije struktura livenog bazalta: a) staklasta osnova sa izmenjenim spinelima, mehur delimično ispunjen staklom; b) staklasta osnova i termički izmenjen neprovidni mineral. Snimljeno na plarizacionom mikroskopu. Propuštena svetlost, IIN [248].

Slika 3.12. XRD difraktogram uzorka LB [248].

Slika 3.13. SEM mikrofotografija uzorka LB [248].

Slika 3.14. Prisutni mehuri u strukturi livenog bazalta: a) mehuri različitih dimenzija na površini uzorka; b) mehur uklopljen u osnovu bazalta [248].

Slika 3.15. XRD difraktogram uzorka SB [249].

Slika 3.16. SEM mikrofotografija uzorka SB, vide se prisutni mehuri uklopljeni u strukturi.

Slika 3.17. Veliki mehur uklopljen u staklastu osnovu uzorka SB.

Slika 3.18. Punioc na bazi bazalta: a) XRD difraktogram punioca; b) SEM mikrofotografija punioca [242].

Slika 3.19. Lost foam vatrostralni premaz na bazi bazalta: a. mikrofotografije punioca i suspenzije premaza; b. osušeni slojevi premaza na polimernom modelu (tanji sloj, levo; deblji sloj, desno).

Slika 3.20. Mikrofotografije punioca i suspenzija Lost foam vatrostralnih premaza na bazi: a. mulita; b. kordijerita; c. cirkonijum-silikata; d. talka.

Slika 21. Osušeni slojevi Lost foam vatrostralnih premaza na polimernoj pločici: a) LFPB; b) LFPM; c) LFPK; d) LFPCS; e) LFPT.

Slika 3.22. Zaštitni premaz na bazi bazalta nanet na metalnu pločicu (uzorak PP): a) punioc na bazi bazalta; b) fotografija premaza PP na metalnoj pločici; c) SEM mikrofotografija osušenih slojeva premaza PP [242].

Slika 3.23. Zaštitni premaz na bazi bazalta nanet na polimernu pločicu (uzorak PS): a) punioc na bazi bazalta; b) fotografija premaza na polimernoj pločici; c) SEM mikrofotografija osušenih slojeva premaza PS [242].

Slika 3.24. Pripremljeni uzorci osnove kompozita (nezasićena poliestarska smola) za ispitivanje mehaničkih svojstava: a) savojne čvrstoće; b) zatezne čvrstoće [250].

Slika 3.25. Pripremljeni uzorci kompozita za ispitivanje mehaničkih svojstava: a) savojne čvrstoće; b) zatezne čvrstoće [250].

Slika 3.26. Uzorci smole i kompozita (glave epruveta za ispitivanje zatezne čvrstoće) pripremljeni za kavitaciono ispitivanje: a) S; b) K₁; c) K₂; d) K₃; e) K₄ [250].

Slika 3.27. SEM mikrofotografije uzoraka nezasićene poliestarske smole (S) i kompozita PES/B pre ispitivanja pod dejstvom kavitacije (uvećanje x500).

Slika 4.1. Gubitak mase uzoraka RB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Slika 4.2. Kavitaciona brzina uzoraka RB u funkciji vremena ispitivanja.

Slika 4.3. Fotografije uzoraka RB pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike i SEM mikrofotografije erodiranih površina uzoraka.

Slika 4.4. Nivo oštećenja površine uzoraka RB tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.

Slika 4.5. Broj formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak RB.

Slika 4.6. Srednja površina formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak RB.

Slika 4.7. Prisutni mehuri u strukturi uzorka RB manjih dimenzija.

Slika 4.8. SEM mikrofotografije erodiranih površina uzorka RB sa različitim uvećanjima (100x levo, 2000x desno) i vremenima dejstva kavitacije: (a, b) 15 min; (c, d) 30 min; (e, f) 60 min; (g, h) 120 min [248].

Slika 4.9. Nastajanje i razvoj oštećenja rovnog bazalta pod dejstvom kavitacije: a) hrapava površina sa plitkim jamicama, 15 min; b) povećanje postojeće jamice i formiranje novih jamica, 30 min; c) povećanje broja jamica, 60 min; d) mnoštvo većih jamica na kraju ispitivanja, 120 min, (uvećanje 30×).

Slika 4.10. Gubitak mase uzoraka LB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Slika 4.11. Kavitaciona brzina uzoraka LB u funkciji vremena ispitivanja.

Slika 4.12. Fotografije uzoraka LB pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike i SEM mikrofotografije erodiranih površina [248].

Slika 4.13. Nivo oštećenja površine uzoraka LB tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.

Slika 4.14. Broj formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak LB.

Slika 4.15. Srednja površina formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak LB.

Slika 4.16. Prisutni mehuri u strukturi uzorka LB većih dimenzija [248].

Slika 4.17. SEM mikrofotografije erodiranih površina uzorka LB sa različitim uvećanjima (100× levo, 2000× desno) i vremenima dejstva kavitacije: (a, b) 15 min; (c, d) 30 min; (e, f) 60 min; (g, h) 120 min [248].

Slika 4.18. Nastajanje i razvoj oštećenja livenog bazalta pod dejstvom kavitacije (uvećanje 30×) [252].

Slika 4.19. Gubitak mase uzoraka SB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Slika 4.20. Kavitaciona brzina uzorka SB u funkciji vremena ispitivanja.

Slika 4.21. Fotografije uzoraka SB pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike i SEM mikrofotografije erodiranih površina [249].

Slika 4.22. Nivo oštećenja površine uzoraka SB tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.

Slika 4.23. Broj formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak SB.

Slika 4.24. Srednja površina formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak SB.

Slika 4.25. Prisutni mehuri u strukturi uzorka SB većih dimenzija (početno stanje).

Slika 4.26. SEM mikrofotografije erodiranih površina uzorka SB sa različitim uvećanjima (100x levo, 2000x desno) i vremenima dejstva kavitacije: (a, b) 15 min; (c, d) 30 min; (e, f) 60 min; (g, h) 120 min [249].

Slika 4.27. Nastajanje i razvoj oštećenja površine uzoraka SB: promena jamica i površine mehurova pod dejstvom kavitacije [249].

Slika 4.28. Gubitak mase uzoraka RB, LB, SB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Slika 4.29. Kavitacione brzine uzoraka na bazi bazalta: rovni bazalt; liveni bazalt i sinterovani bazalt.

Slika 4.30. Kavitacione brzine uzoraka livenog i sinterovanog bazalta.

Slika 4.31. Nivo oštećenja površine uzoraka RB, LB, SB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Slika 4.32. Broj formiranih jamica za uzorke RB, LB, SB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Slika 4.33. Srednja površina formiranih jamica, P_{av} za uzorke RB, LB, SB pod dejstvom kavitacije.

Slika 4.34. Rezultati ispitivanja premaza na metalnoj pločici (PP): a) gubitak mase (mg); b) nivo oštećenja površine (%); c) srednja površina jamica (mm^2); d) broj formiranih jamica [242].

Slika 4.35. Rezultati ispitivanja premaza na polimernoj pločici (PS): a) gubitak mase (mg); b) nivo oštećenja površine (%); c) srednja površina jamica (mm^2); d) broj formiranih jamica [242].

Slika 4.36. Kavitacione brzine uzoraka premaza PP i PS.

Slika 4.37. Fotografije uzoraka premaza PP pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike.

Slika 4.38. Fotografije uzoraka premaza PS pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike.

Slika 4.39. SEM mikrofotografije površina uzorka premaza PP pri različitim uvećanjima pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Slika 4.40. SEM mikrofotografije površina uzorka premaza PS pri različitim uvećanjima pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Slika 4.41. Uzorci nezasićene poliestarske smole i kompozita tokom vremena ispitivanja na dejstvo kavitacije (min): 0; 15; 30; 45; 60.

Slika 4.42. Gubitak mase uzoraka smole i kompozita tokom vremena ispitivanja na dejstvo kavitacije [250].

Slika 4.43. Kavitacione brzine uzoraka kompozita NPS/B.

Slika 4.44. Svojstva uzoraka S (0% ojačivača) i uticaj količine ojačivača na bazi bazalta (od 0,15% do 0,5%) na svojstva kompozita NPS/B: a. zatezna čvrstoća, R_m (MPa); b. čvrstoća na savijanje, σ (MPa); tvrdoća po Shor-u [250].

Slika 4.45. SEM mikrofotografije površina uzoraka nezasićene poliestarske smole (S) pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Slika 4.46. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita K_1 pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Slika 4.47. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita K_2 pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Slika 4.48. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita K_3 pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Slika 4.49. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita K_4 pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Slika 4.50. Fotografije uzoraka kompozita K_1 i K_2 pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike.

Slika 4.51. Fotografije uzoraka kompozita K_3 i K_4 pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike.

Slika 4.52. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita pre i nakon ispitivanja pod dejstvom kavitacije sa izgledom formiranih jamica.

Slika 4.53. Rezultati ispitivanja kompozita K_1 pod dejstvom kavitacije: gubitak mase (mg); nivo degradacije površine P/P_0 (%); broj formiranih jamica, N_p ; srednja površina formiranih jamica, P_{av} , (mm^2).

Slika 4.54. Rezultati ispitivanja kompozita K_2 pod dejstvom kavitacije: gubitak mase (mg); nivo degradacije površine P/P_0 (%); broj formiranih jamica, N_p ; srednja površina formiranih jamica, P_{av} , (mm^2).

Slika 4.55. Rezultati ispitivanja kompozita K_3 pod dejstvom kavitacije: gubitak mase (mg); nivo degradacije površine P/P_0 (%); broj formiranih jamica, N_p ; srednja površina formiranih jamica, P_{av} , (mm^2).

Slika 4.56. Rezultati ispitivanja kompozita K_4 pod dejstvom kavitacije: gubitak mase (mg); nivo degradacije površine P/P_0 (%); broj formiranih jamica, N_p ; srednja površina formiranih jamica, P_{av} , (mm^2).

Spisak tabela

Tabela 1.1. Pregled udarnih opterećenja za različite fenomene kavitacije [3, 78]

Tabela 3.1. Hemijski sastav polaznog uzorka bazalta (RB), (%) [241]

Tabela 3.2. Veličina zrna punioca za izradu uzoraka SB i vatrostalnih premaza

Tabela 3.3. Faktor oblika zrna punioca za izradu uzoraka SB i vatrostalnih premaza

Tabela 3.4. Veličina zrna punioca na bazi bazalta za izradu uzoraka NPS/B

Tabela 3.5. Faktor oblika zrna punioca za izradu uzoraka NPS/B

Tabela 3.6. Sastavi vatrostalnih punioca, Lost foam vatrostalnih premaza i parametri sinteze premaza LFPB, LFPM, LFPK, LFPCS, LFPT [237 - 240, 242]

Tabela 3.7. Tehnološka svojstva ispitivanih vatrostalnih premaza na bazi bazalta [242]

Tabela 3.8. Sastav i parametri sinteze zaštitnih vatrostalnih premaza (PP i PS) [242]

Tabela 4.1. Rezultati merenja gubitka mase uzoraka RB pod dejstvom kavitacije (g)

Tabela 4.2. Nivo oštećenja površine uzoraka RB pod dejstvom kavitacije

Tabela 4.3. Broj formiranih jamica N_p pod dejstvom kavitacije za uzorak RB

Tabela 4.4. Srednja površina formiranih jamica pod dejstvom kavitacije, P_{av} (mm^2) za uzorke RB

Tabela 4.5. Rezultati merenja gubitka mase uzoraka LB pod dejstvom kavitacije, (g)

Tabela 4.6. Nivo oštećenja površine uzoraka LB pod dejstvom kavitacije

Tabela 4.7. Broj formiranih jamica N_p za uzorke LP pod dejstvom kavitacije

Tabela 4.8. Srednja površina formiranih jamica P_{av} (mm^2) za uzorke LB

Tabela 4.9. Rezultati merenja gubitka mase pod dejstvom kavitacije za uzorke SB, (g)

Tabela 4.10. Nivo oštećenja površine uzorka SB, P/P_0 , (%)

Tabela 4.11. Broj formiranih jamica N_p pod dejstvom kavitacije za uzorak SB

Tabela 4.12. Srednja površina formiranih jamica P_{av} (mm^2) za uzorak SB

Tabela 4.13. Rezultati merenja gubitka mase i parametri oštećenja površine uzoraka premaza PP određeni analizom slike [242]

Tabela 4.14. Rezultati merenja gubitka mase i parametri oštećenja površine uzoraka premaza PS određeni analizom slike [242]

Tabela 4.15. Gubitak mase uzoraka smole i kompozita pod dejstvom kavitacije, (g)

Tabela 4.16. Kavitacione brzine uzoraka kompozita, (mg/min)

Tabela 4.17. Svojstva uzoraka S i uzoraka kompozita NPS/B sa različitim udelom ojačivača na bazi bazalta

Tabela 4.18. Nivo oštećenja površine uzoraka kompozita pod dejstvom kavitacije (P/P_0 , %)

Tabela 4.19. Broj formiranih jamica N_p pod dejstvom kavitacije za uzorke kompozita

Tabela 4.20. Srednja površina formiranih jamica P_{av} , mm^2 za uzorke kompozita

1. Uvod

Vatrostalni materijali se primenjuju u različitim industrijskim procesima u kojima se javljaju visoke temperature i pritisci, protok fluida i suspenzija, korozija, habanje, dejstvo reaktivnih materijala kao što su tečni metali, šljaka, alkalije, jedinjenja hlorida, korozivni gasovi. Pri tome nastaju oštećenja i razaranja površine materijala koja su često uzrok iznenadnog i preranog otkaza opreme. U cilju dobijanja željenih i unapred zadatih vatrostalnih materijala povišene otpornosti na rigorozne uslove eksploatacije u metalurgiji i rudarstvu, neophodna su istraživanja različitih nemetaličnih sirovina i postupaka njihove prerade. Srbija raspolaže kvalitetnim nemetaličnim sirovinama što stvara mogućnost istraživanja procesa proizvodnje različitih vatrostalnih materijala i primene kao materijala za izradu delova opreme za topljenje i livenje, termičku obradu; izradu obloga mlinova; obloga flotacionih ćelija; fazonskih odlivaka za konstrukcione delove opreme; kao punioca za vatrostalne premaze i punioca za sintezu novih materijala i proizvoda.

Za izradu različitih vatrostalnih proizvoda u metalurškim procesima najčešće se primenjuju mešavine visokovatrostalnih materijala na bazi: cirkonijum–silikata, hromita, mulita, kordijerita, korunda, talka, pirofilita, šamotno–kvarcne i druge mešavine. U disertaciji je istraživana mogućnost primene novih vatrostalnih materijala na bazi bazalta za izradu konstrukcionih delova opreme u metalurgiji i rudarstvu. Istraživana je sinteza i karakterizacija sledećih uzoraka na bazi bazalta: rovni, liveni i sinterovani uzorci. Kao polazna sirovina za sintezu uzoraka korišćen je olivin-piroksenski bazalt iz ležišta Vrelo–Kopaonik. Za dobijanje unapred zadate strukture i svojstava uzoraka na bazi bazalta istraženi su postupci pripreme polaznih sirovina procesima drobljenja, mlevenja i mehaničke aktivacije i sinteza uzoraka procesima sinterovanja i procesima topljenja, livenja i termičkog tretmana.

Za ocenu mogućnosti primene dobijenih uzoraka na bazi bazalta u složenim uslovima eksploatacije u metalurgiji i rudarstvu, primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom prema standardu ASTM G32. Ova laboratorijska metoda omogućila je da se, u relativno kratkom vremenu, proceni mogućnost primene ispitivanih uzoraka u uslovima kavitacionih operećenja.

Kavitacija je svojevrsni tip habanja i predstavlja pojavu nastajanja, rasta i implodije (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 mikromlazeva, koji nastaju implodijom mehura, rasipa se unutar tečnosti.

Čvrsta površina, zid strujne cevi, koja je u kontaktu sa tečnošću koja struji, apsorbira deo energije i pri tome nastaje elastična, plastična deformacija ili razaranje materijala koje predstavlja oštećenje pod dejstvom kavitacije (eroziju).

Tokom određivanja otpornosti na dejstvo kavitacije praćena je promena mase uzoraka u funkciji vremena delovanja kavitacije. Merenjem ukupnog gubitka mase uzoraka u vremenu delovanja kavitacije određena je kavitaciona brzina ispitivanih uzoraka, na osnovu koje je vršeno poređenje i ocena mogućnosti primene uzoraka (rovni, liveni i sinterovani uzorci na bazi bazalta) u uslovima u kojima se očekuje prisustvo visokih kavitacionih opterećenja. Prema podacima iz dostupne literature, vatrostralni materijali pokazuju da se pod dejstvom kavitacije javljaju oštećenja površine i gubitak mase sa površine materijala, bez plastične deformacije. Morfologija oštećenja površine uzoraka bazalta nastalog dejstvom kavitacije praćena je primenom skening elektronskog mikroskopa, a nivo degradacije površine uzoraka određen je primenom analize slike. Na osnovu vrednosti kavitacione brzine i analize morfologije oštećenja površine određena je otpornost na dejstvo kavitacije uzoraka na bazi bazalta.

Pored istraživanja oblikovanih vatrostralnih materijala na bazi bazalta, istraženi su i procesi sinteze vatrostralnih premaza na bazi bazalta. Premaz na bazi bazalta predstavlja novinu i do sada se nije koristio u livarstvu. Istražene su dve vrste vatrosalnih premaza na bazi bazalta: Lost foam vatrostralni premazi za primenu u novim tehnologijama livenja (premazi na vodenoj osnovi, sa vezivom na bazi karboksimetilceluloze i bentonita, sa organskim aditivima za održanje suspenzije) i zaštitni premazi za metalne i nemetalne materijale (sa vezivom na bazi epoksi-smole, organskim rastvaračima i aditivima). Tokom istraživanja, posebna pažnja posvećena je izboru komponenti iz sastava premaza i istraživanju postupaka izrade premaza. Za pripremu vatrostralnih punioca primenjeni su procesi mlevenja i mehaničke aktivacije u cilju dobijanja punioca određene veličine i oblika zrna. To je omogućilo sintezu premaza visokih reoloških svojstava za primenu u novim tehnologijama livenja (Lost foam proces livenja, livenje sa topivim modelima). Za karakterizaciju dobijenih Lost foam vatrostralnih premaza primenjene su metode ispitivanja predviđene standardima za ovu vrstu vatrostralnih proizvoda. Rezultati ispitivanja su poređeni sa rezultatima ispitivanja vatrostralnih premaza na bazi mulita, kordijerita, cirkonijum–silikata i talka, koji se koriste u praksi.

U cilju ocene dobijenih zaštitnih vatrostralnih premaza, koji mogu da se primene za premazivanje delova opreme u metalurgiji, proučavano je ponašanje premaza pod dejstvom kavitacije, nastajanje i razvoj oštećenja na površini premaza, procena rizika oštećenja slojeva

premaza i oštećenja metalne površine ispod premaza za određena vremena izlaganja dejstvu kavitacije. Za ispitivanja primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom prema standardu ASTM G32. Detaljnom analizom promena površine uzoraka premaza utvrđen je mehanizam oštećenja pod dejstvom kavitacije, pre svega praćene su promene u ranom periodu dejstva kavitacije na osnovu kojih može da se prognozira dalji tok oštećenja materijala i da se proceni mogućnosti primene premaza za date uslove eksploatacije.

Takođe, u disertaciji je istraživana mogućnost primene bazalnog praha kao ojačivača u sastavu kompozita polimerna osnova/bazalt. Istražen je uticaj udela ojačivača na bazi bazalta na mehanička svojstva dobijenih kompozita (tvrdoća, zatezna čvrstoća i čvrstoća na savijanje) i otpornost na dejstvo kavitacije. Na osnovu vrednosti kavitacionih brzina i analize morfologije oštećenja površine određena je otpornost na dejstvo kavitacije dobijenih kompozita.

2. Teorijski deo

2.1. Osnovni pojmovi o procesu kavitacije

Kavitacija je nestacionaran proces nastajanja, rasta i implozije¹ mehura pare ili gasa u tečnosti koja struji. Stvaranje mehura pare u struji tečnosti predstavlja početak procesa kavitacije, a javlja se kao posledica smanjenja pritiska u mikrozapreminama do vrednosti pritiska isparavanja tečnosti na određenoj temperaturi. Proces zavisi od polja pritiska, temperature tečnosti, vrste tečnosti, režima strujanja, sadržaja nerastvornih gasova i mehaničkih uključaka, koji predstavljaju nukleuse kavitacije [1–7]. U stanju mirovanja fluida, prelaz tečne u parnu fazu nastaje kada se pritisak tečne faze spusti ispod tzv. napona pare tečnosti². U pokretnom fluidu do fazne promene dolazi usled lokalnog povećanja brzine kretanja fluida koji indukuje nizak pritisak struje tečnosti. U tom slučaju dolazi do tzv. razbijanja tečne faze koja se kreće i pojave praznih prostora–mehura. Kada stvoreni kavitacioni mehur nošen strujom tečnosti dospe u polje višeg pritiska implodira (nestaje) i tom prilikom se stvaraju udarni talasi i mikro–mlazevi koji oštećuju površine materijala u kontaktu sa tečnošću koja struji [8–11]. Nivo oštećenja površine elemenata hidrauličnih mašina nastao mehaničkim dejstvom udarnih talasa i mikro–mlaza zavisi od vrste materijala, njegove strukture i svojstava, a naziva se razaranje materijala pod dejstvom kavitacije³. Osim mehaničkog dejstva u zoni kavitacije na razaranje materijala utiče prisustvo elektrohemijjskih procesa i hemijske korozije [12–14], a dodatnom razaranju materijala doprinose visoke temperature i pritisci nastali lokalno, u vrlo kratkim vremenskim intervalima [15]. Kavitacija je pojava koja nastaje ne samo u vodi, već i u drugim vrstama tečnosti i obično izaziva pojavu loma, buke, vibracija i oštećenja površine u komponentama hidrauličnih mašina koje su pri radu izložene dejstvu brzog toka tečnosti [1].

U zavisnosti od načina pobuđivanja, postoje različite vrste kavitacija, a najčešće prisutne su [1, 3, 9]:

1. Hidrodinamička kavitacija, koja nastaje snižavanjem pritiska tečnosti na račun lokalnog povećanja brzine,

¹ Implozija je kolaps ili nestajanje mehura pare ili gasa u tečnosti koja struji [1]

² Napon pare ili pritisak pare tečnosti je pritisak pri kome tečnost počinje da ključa ili isparava [3].

³ U nekim literaturnim navodima koristi se i termini kavitaciono oštećenje, kavitaciona erozija [2,6]

2. Akustična kavitacija, koja je izazvana zvučnim talasima, odnosno padom pritiska kada ultrazvučni talasi prolaze kroz tečnost.

Kavitacija može nastati kao posledica dejstva svetlosti visokog intenziteta ili lasera na tečnost (optička kavitacija), kao i dejstvom elementarnih čestica na tečnost (čestična kavitacija).

Kavitacija je svojevrsni tip habanja. Nastaje implozijom kavitacionih mehura i stvaranjem udarnih talasa i mikro–mlazeva – koncentratora naprezanja. Koncentratori naprezanja mogu, u vrlo kratkom vremenskom periodu, na površinskim slojevima elemenata hidrauličnih mašina, prouzrokovati u lokalnim mikro–regionima zamor materijala i njegovo razaranje, tj. formiranje mikro–prslina. Ove mikro–regione, ponekad, je teško otkriti. Na kraju mnoge prsline mogu da se spoje i da dovedu do iznenadnog i preranog otkaza opreme [1]. Sagledavanje svih složenih procesa i fenomena kavitacije, zahteva multidisciplinarni pristup koji uključuje znanje iz mehanike fluida, nauke o materijalima i ostalih oblasti nauke i inženjerstva.

Kavitacija je predmet stalnih istraživanja od sredine sedamnaestog veka do danas. Proučavanje mehanizma razaranja materijala pod dejstvom kavitacije vezuje se za početak prošlog veka, kada su pokrenuta opsežna istraživanja oštećenja britanskih torpeda brodova (Lord Rayleigh, 1917.) [3]. Većina istraživanja u ovoj oblasti odnose se na izučavanje ponašanja metalnih materijala pod dejstvom kavitacije, pre svega čelika i legura aluminijuma [16–30]. U drugoj polovini dvadesetog veka, razvojem novih materijala, započela su istraživanja njihove primene za sintezu komponenti koje treba izložiti kavitaciji i to: kombinacija metalnih i keramičkih materijala [31, 32], polimernih, kompozitnih i drugih materijala [33–38], primena vatrostalnih premaza za zaštitu i povećanje otpornosti na dejstvo kavitacije metalnih konstrukcija [39–47], a znatno manje su istraživani vatrostalni materijali [48–54].

Za procenu i predviđanje oštećenja materijala pod dejstvom kavitacije objavljene su brojne eksperimentalne studije [55–69], razvijen je veliki broj fenomenoloških [2–4, 70–84] i numeričkih modela [85–89]. Razvijene su standardizovane metode za ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije (ASTM G32 i ASTM G134) [58, 59]. Različite korelacione empirijske metode za predviđanje oštećenja pod dejstvom kavitacije široko se koriste u industriji sa ciljem da se materijali klasifikuju prema njihovoj otpornosti na dejstvo kavitacije i ukoliko je moguće, da se korelira njihova otpornost sa mehaničkim svojstvima kao što su tvrdoća, elastičnost, zatezna čvrstoća, žilavost [2–5, 57, 90–96]. Ispitivanja otpornosti materijala na dejstvo kavitacije mogu da se obavljaju na terenu, na hidrauličnim mašinama, turbinama i pumpama, ali su skupa i ne sprovode se često. Za razliku od njih, laboratorijske

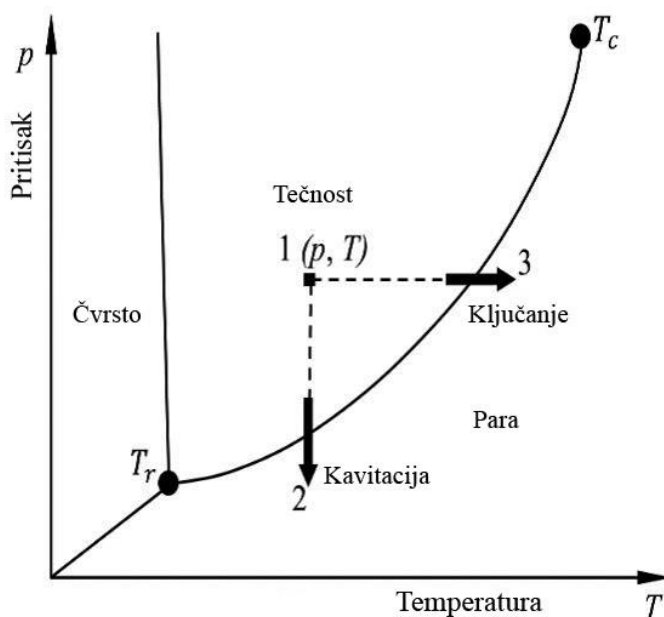
metode ispitivanja (vibracioni uređaj, metoda koja koristi Venturi cev, rotirajući disk, metoda ispitivanja udarom mlaza tečnosti) su jednostavne, brze i ekonomične, i intenzivno se koriste u praksi za rangiranje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije za preko 200 industrijskih legura [1, 23, 58, 59]. Ove metode omogućavaju da se za kratko vreme ispitivanja (4–10 h) odrede svojstva otpornosti materijala pod dejstvom kavitacije. Za detaljna istraživanja fenomena kavitacije razvijena je savremena oprema za eksperimentalna istraživanja, hidrodinamički vodeni tuneli velikih brzina protoka tečnosti, sa savremenom mernom tehnikom na bazi lasera, ali, za sada, ova metoda nije standardizovana [76, 87–89]. Razvijene su i eksperimentalne tehnike gde se sa kamerama velikih brzina, obavlja istovremeno posmatranje kavitacije, promena u strukturi tečnosti i merenje akustične emisije. To je dovelo do niza novih saznanja o prirodi složenih procesa i fenomena kavitacije, korelaciji relevantnih procesnih parametara, mikrostrukturnih karakteristika i svojstava materijala sa otpornošću na oštećenja dejstvom kavitacije [97–104].

U inženjerskoj praksi, kavitacija se smatra nepoželjnom pojavom, jer oštećuje i razara materijale važnih delova mašina i uređaja. Međutim, efekti hidrodinamičke kavitacije su poslednjih decenija korišćeni u novim specifičnim oblastima primene: tretman otpadnih voda, posebno rudničkih otpadnih voda, proizvodnja dizel goriva, procesi filtriranja, mešanja i miksovanja tečnost/čvrsto, tečnost/gas, tečnost/tečnost [9, 63, 64]. Upotreba ultrazvuka široko je primenjena za sintezu različitih hemikalija, lekova, namirnica, nanomaterijala, degradaciju zagađujućih materijala u tretmanu voda, u prehrambenoj industriji, obradi metala, tekstila i slično [64–69].

2.1.1. Teorijski principi procesa kavitacije

Idealni mehanizam kavitacije najbolje se može objasniti pomoću dijagrama faza za vodu, slika 2.1. Tačka T_r je trojna tačka na kojoj su sve tri faze (čvrsta, tečna i gasovita) u ravnoteži. Najvišu temperaturu pri kojoj postoji tečna faza i najnižu temperaturu pri kojoj postoji samo gasovita faza definiše kritična tačka T_c . Kriva T_r - T_c naziva se kriva napona pare tečne faze (vode) ili kriva isparavanja. Ona odvaja oblast tečne i čvrste faze. Za svaku tačku krive T_r - T_c važi da za dati pritisak i temperaturu (koji se mogu očitati sa grafika) dve faze, tečna i parna, se nalaze u stanju ravnoteže. Zbog toga se sve tačke krive T_r - T_c nazivaju tačkama ravnotežnih stanja. Tečna faza u statičkom ili dinamičkom stanju (tačka 1 na faznom dijagramu vode) sa pritiskom (p) i temperaturom (T) može da isparava na dva načina: porastom temperature pri konstantnom pritisku (promena stanja po liniji 1-3) koji se naziva ključanje i smanjenjem ili

padom pritiska na konstantnoj temperaturi (promena stanja po liniji 1-2) koji se naziva kavitacija [2].



Slika 2.1. Šematski prikaz faznog dijagrama za vodu [2]
 (T_r - temperatura trojne tačke; T_c - temperatura kritične tačke)

U idealnim uslovima, kada pritisak tečnosti padne ispod pritiska pare tečnosti ili napona pare (T_r - T_c) za određenu temperaturu, tečna faza će preći u parnu fazu. Kada se to desi lokalno prilikom strujanja tečnosti, doći će do stvaranja kavitacionog mehura. Međutim, u realnim uslovima istovremeno može doći do promene pritiska i temperature, tako da će način isparavanja odrediti dominantniji parametar. Potrebno je napomenuti da u realnim uslovima granica između različitih faza nije striktna i može doći do odstupanja što zavisi od vrste jedinjenja i sredine. Naime, fazna promena se može javiti na temperaturi ispod očekivane/definisane, što se naziva termičko kašnjenje pri kavitaciji. Slično tome, do fazne promene može doći i na pritisku ispod napona pare. U nekim slučajevima može doći i do dinamičkog kašnjenja koje se vezuje za fenomene inercije, odnosno uočavanja pojave parnog mehura. Za proces kavitacije može se reći da je sličan ključanju, ali mehanizam nije promena temperature, već promena pritiska kontrolisana dinamikom protoka [1-3].

Početak kavitacije karakterišu sledeći koraci: smanjenje kohezivne sile tečne faze i stvaranje praznog prostora (mehura); popunjavanje ovih praznina parom tečne faze/fluida i zasićenje praznina parom. Ovi koraci se odvijaju brzo i istovremeno, tako da se praznine gotovo trenutno zasićuju parom tečnosti. Treba imati na umu da kriva T_r - T_c na faznom dijagramu za

Kavitacija može da ima razne oblike i u početnoj fazi veoma zavisi od osnovne nekavitacijske strukture protoka fluida. U protoku fluida mehuri mogu da budu parni, gasni ili mešoviti (paro-gasni). Ako je kavitacija nastala samo isparavanjem tečnosti tada se naziva parna kavitacija, a ako je kavitaciji prethodio gasni mehur kavitacija se naziva gasna [1].

2.1.2. Kavitacija u industrijskim uslovima i mere za smanjenje rizika od oštećenja

Odvijanje kavitacije u realnim industrijskim uslovima se može posmatrati kroz dve faze:

- Početak kavitacije, kao granični režim između nekavitacijskog i kavitacijskog režima tečenja, tokom koga treba voditi računa o početku pojave oštećenja nastalog dejstvom kavitacije [3]. Oštećenja nastala dejstvom kavitacije su u funkciji karakteristika primenjenog materijala, a ne funkciji vrste i/ili tipa kavitacije [3, 78],
- Razvijena kavitacija podrazumeva određenu stalnost i stepen, te moguće posledice izazvane dejstvom kavitacije u hidrauličnom sistemu, kao što je pad performansi rada hidrauličnih mašina [2, 3, 78].

Mere za smanjenje rizika pojave oštećenja usled dejstva kavitacije su:

- konstrukcione mere vezane za dizajniranje geometrije zida u cilju smanjenja rizika pada pritiska unutar stabilnog protoka usled oštih promena poprečnog preseka, suženja preseka, iskrivljenosti i oštih uglova na prelazima preseka [3, 29, 78];
- mere vezane za izbor optimalnih režima protoka i optimalnih konstrukcija, posebno kod konstrukcije mlaznica, uskih cevi i slično u cilju umanjenja rizika koga uzrokuju smicajni turbulentni tokovi [26, 32, 45];
- mere vezane za izbor materijala visoke otpornosti na dejstvo kavitacije i njihova primena za izradu elemenata koji rade u uslovima gde se očekuje pojava kavitacije [1-6, 11, 23, 33, 53];
- mere vezane za povišenje kvaliteta, tj. minimiziranje hrapavosti površine čime se povećava otpornost na oštećenja delova izloženih kavitacionim tokovima [13, 15];
- mere vezane za optimalno dizajniranje hidrodinamičkih konstrukcija čime se smanjuju vibracije zidova tokom rada [4, 78].

Variranje temperature uzrokuje dva efekta na kavitacione pojave, prvo, da pri stalnom ambijentalnom pritisku, povećanje temperature fluida daje veću sposobnost kavitacije, drugo, uparavanje na međupovršini tečnost/para zahteva prenos toplote kondukcijom i konvekcijom, što utiče na pojavu termičkog kašnjenja [3].

Neke tipične vrednosti nađene u polju kavitacije su [3]:

- trajanje kolapsa sfernog mehura pare radijusa od 1cm, pri spoljnjem pritisku od jednog bara je oko milisekunde;
- trajanje završne faze kolapsa mehura ili kolapsa kavitacionog vrtloga⁴, što je važno u procesu nastajanja oštećenja materijala, je reda mikrosekunde;
- uobičajena brzina na međupovršini uglavnom leži između nekoliko metara i nekoliko stotina metara u sekundi;
- nadpritisak usled implozije struktura pare (mehuri i vrtlozi) može da dostigne do nekoliko hiljada bara.

Kao ne-dimenzionalni parametar za različite proračune i numeričke analize procesa kavitacije koristi se tzv. kavitacioni broj [1-3, 76], koji se definiše kao:

$$\sigma_v = \frac{p_r - p_v(T)}{\Delta p} \quad (1.1)$$

gde je:

- σ_v – kavitacioni broj;

- p_r - pritisak na ulazu;

- p_v – pritisak gde se očekuje početak kavitacije u zavisnosti od temperature T ;

- Δp - razlika pritisaka koja je karakteristična za sistem.

2.1.3. Mehanizmi stvaranja, rasta i implozije kavitacionog mehura

Mehanizme stvaranja, rasta i implozije mehura gas/para unutar tečnosti izučavali su brojni autori tokom dugog niza decenija [1-7, 57, 65, 73, 76-78, 81, 82]. Za predviđanje, izbegavanje ili pokretanje procesa kavitacije neophodno je poznavati mehanizme nastajanja i rasta kavitacionog mehura (procesom heterogene ili homogene nukleacije), imploziju kavitacionog mehura i mehanizme oštećenja materijala dejstvom kavitacije.

Da bi se stvorio kavitacioni mehur i započeo proces kavitacije neophodna su tzv „slaba“ mesta u struji tečnosti, na kojima mogu da se stvore nukleusi za formiranje mehura. Potencijalna mesta za stvaranje nukleusa mehura mogu biti: površina zida strujne cevi koja je u kontaktu sa fluidom, nečistoće ili namerno dodate čvrste čestice (sintetičke inkluzije, rastvori soli, kristali) i mali nerastvorni mehuri gasa unutar tečnosti [99].

⁴ Pri kolapsu kavitacionog mehura nastaje konverzija potencijalne energije, sadržane u mehuru, u kinetičku energiju, što inicira stvaranje kavitacione strukture tipa kavitacionih vrtloga, koji mogu biti oblika prstena ili potkovice. Kavitacioni vrtlozi se koncentrišu ka površini zida strujne cevi i uzrok su ozbiljnih oštećenja materijala [3].

Poznato je da su u struji tečnosti uvek prisutni i zarobljeni mikro-mehuri vazduha ili gasa, koji mogu predstavljati nukleuse za stvaranje gasnih/parnih mehura [2]. Takođe, na čvrstim površinama zidova strujne cevi nalaze se brojne nano-neravnine u kojima može ostati zarobljen vazduh tako da i ta mesta predstavljaju nukleuse za formiranje mikro-mehura u uslovima kavitacije, kao i prisutne čvrste čestice u fluidu. Kada kavitacioni mehur nastane usled pada lokalnog pritiska tečnosti ispod kritične vrednosti, odnosno napona pare tečnosti, mehuri pomešani sa fluidom se kreću i eksplozivno rastu. Kada mehuri pređu u područje višeg pritiska, odnosno kada pritisak unutar mehura postane veći od lokalnog pritiska fluida mehuri se naglo kondenzuju, prelaze u kapi koje velikom brzinom udaraju o čvrstu površinu na koju naiđu [1, 3]. Proces implozije mehura dešava se veoma burno, pri čemu se stvara intenzivan pritisak i zvuk i dolazi do erozije bilo koje čvrste površine u njihovoj blizini [65, 78, 81, 94]. U ovim slučajevima, nukleacija započinje na mestu kontakta čvrsto/tečne ili gasno/tečne faze i smatra se da je to heterogena nukleacija. Postoje dva mehanizma i pokretača za rast mehura. Kada nukleusi mehura nastanu, dalje mogu da se razvijaju pod uticajem dva faktora: 1. slobodni nukleusi (koji nisu na površini zida koji je u kontaktu sa strujom tečnosti) rastu putem gravitacije i 2. svi nukleusi razmenjuju se difuzijom sa rastvorenim gasom prisutnim u okolnom fluidu [3]. Rezultati mnogobrojnih istraživanja objašnjavaju heterogenu nukleaciju kako na ravnim, hidrofobnim i hrapavim površinama [65, 72, 76], tako i na postojećim mehurima i mehaničkim primesama u struji tečnosti [13, 14, 78]. Poznato je da kavitacija može da bude inicirana prisustvom određenih nedostataka u struji tečnosti, koji potiču od termalnih fluktuacija ili veoma malog stepena metastabilnosti pritiska i ta mesta postaju nukleusi za stvaranje mehura unutar struje tečnosti. U ovim slučajevima javlja se homogena nukleacija za koju je neophodna veoma čista tečnost bez gasova, prisutnih nečistoća i uključaka. U praksi se ovaj tip nukleacije teže ostvaruje s obzirom da je veoma teško postići zadovoljavajući nivo čistoće vode/tečnosti [64].

Stvoreni kavitacioni mehuri, najčešće formirani oko nukleusa koje predstavlja već postojeći mehur nerastvornog gasa u tečnosti, daljim sniženjem pritiska tečnosti i usled dodatnog isparavanja, kao i širenja gasa i pare, povećavaju dimenzije i u isto vreme se deformišu, odnosno izdužuju se u smeru strujanja [1, 3]. Idealno rast mehura treba da se zaustavi kada je pritisak unutar mehura jednak pritisku tečnosti. U realnim uslovima zbog strujanja tečnosti, velike brzine i/ili efekta inertnosti tečnosti (koja upravo pokreće rast mehura), mehur može prekomerno da poraste, a kada ponovo uđe u oblast povišenog pritiska tečnosti, usled visokog gradijenta pritiska prema centru mehura, doći će do njegovog snažnog kolapsa. Takvi kolapsi

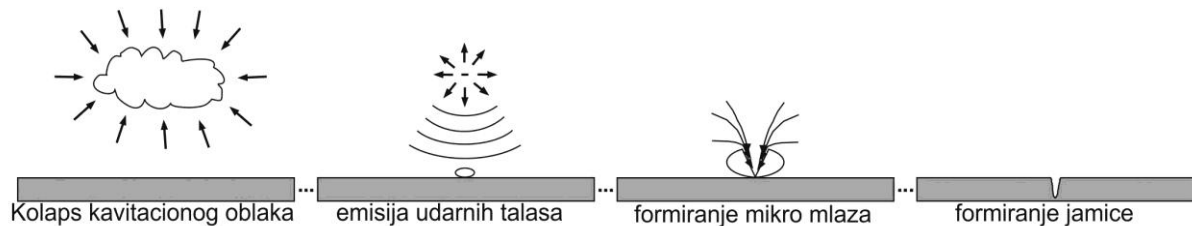
često su povezani sa formiranjem mikro-mlaza velike brzine i intenzivnih udarnih talasa [1, 2].

Sredina u kojoj se dešava kavitacija, uslovi pod kojima se odvija formiranje i rast mehura (vrsta tečnosti, temperature tečnosti, polje pritiska, režim strujanja, sadržaj nerastvornih gasova i mehaničkih primesa koji predstavljaju nukleuse kavitacije) ima važan efekat na dinamiku implozije mehura. Pojedinačan mehur koji je formiran daleko od granice čvrsto-tečno (zid strujne cevi) tokom implozije nestaje sferično. Oblast najvišeg pritiska u ovom slučaju je geometrijski centar mehura iz kog se emituje sferični udarni talas. Međutim, u realnim uslovima prisustvo zida strujne cevi ili drugih mehura u struji tečnosti, turbulencija, trenje tečno-tečno ili tečno-čvrsto, prisustvo čvrstih čestica u tečnosti, prouzrokuju odstupanje od savršeno simetrične implozije mehura. Svaki od ovih faktora utiče na to da pritisak tečnosti na celoj površini mehura nije uvek isti, što vodi asimetričnom rastu i imploziji kavitacionih mehura. Kao rezultat ovakve asimetrične implozije javlja se mikro-mlaz velike brzine koji se pri udaru o površinu ponaša kao "vodeni čekić" [2, 14].

Pri proučavanju uzroka nastajanja oštećenja materijala pod dejstvom kavitacije potrebno je imati u vidu interakciju između toka tečnosti i čvrstog zida strujne cevi. Implozija kavitacionog mehura proizvodi udarni talas visokog intenziteta zajedno sa mikro-mlazom. Kada udarni talas udari u čvrsti zid, materijal zida pruža otpor i udarni talas gubi deo svoje energije i intenzivno slabi. Deo udarnog talasa se reflektuje natrag u tečnost, dok se deo prenosi kroz površine u koje je udario (energiju udarnog talasa apsorbuje materijal). Ponovljenim udarima visokog intenziteta stvara se zamor materijala i nastaju oštećenja koja često dovode do otkaza različitih hidrauličnih struktura [1-4]. Proces dejstva kavitacije je podeljen na četiri različite faze, što u krajnjoj liniji dovodi do formiranja jamice:

1. implozija kavitacionog oblaka izaziva udarni talas koji se radialno širi i emituje u tečnosti; jačina udarnih talasa slabi putujući ka čvrstoj površini;
2. pojedinačni mehuri prisutni u blizini čvrste površine počinju da osciluju pod dejstvom pritiska okolnog fluida (veći pritisak trpi strana okrenuta fluidu dok manji pritisak strana okrenuta zidu);
3. ukoliko oscilacije mehura postanu dovoljno velike, okolni fluid će probiti mehur i u obliku mlaza, koji se naziva mikro-mlaz, velikom brzinom udara u čvrstu površinu zida strujne cevi; i
4. stvaranje oštećenja (jedna jamica) je uzrokovano velikom brzinom mikro-mlaza koji udara na čvrstu površinu, slika 2.3 (Dular i saradnici, 2006) [71].

Korelacija između kavitacionih struktura i oštećenja materijala bila je utvrđena kroz brojna eksperimentalna istraživanja i numeričke studije [71-74]. Velika oštećenja materijala dejstvom kavitacije potiču i od implozije kavitacionih vrtloga, koji relativno dugo traju (tipično nekoliko milisekundi), pri čemu se formira oblak mehura čija implozija doprinosi daljem oštećenju materijala koji je u kontaktu sa fluidom koji struji [78, 85].



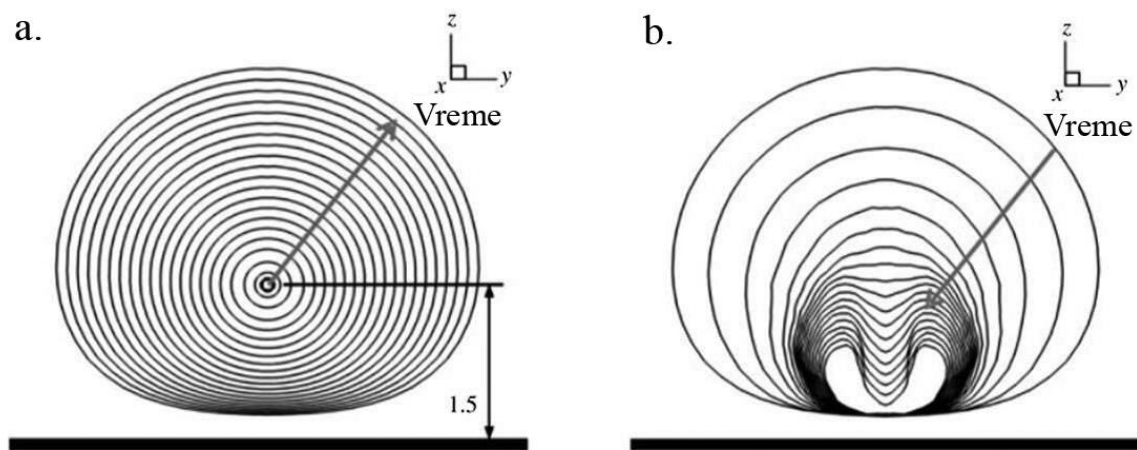
Slika 2.3. Nastajanje oštećenja metalnih materijala dejstvom kavitacije (prema Dular i saradnici, 2006.) [71].

Asimetrična implozija mehura se najčešće javlja u realnim strujanjima fluida tokom hidrodinamičke kavitacije. Plesset i Chapman uradili su numeričku analizu asimetrične implozije mehura koji se nalaze na ili u blizini zida strujne cevi [97]. Nakon toga urađeni su obimni radovi [2, 13, 21, 57, 97-99] kako bi se razumeli mehanizmi promene oblika mehura tokom implozije. Simulirana su dva slučaja implozije sfernih mehura: 1. *slučaj*- mehur koji je prvobitno u kontaktu sa zidom i 2. *slučaj*- mehur, koji je udaljen od najbliže tačke zida za polovinu svog radijusa. Pokazano je da mehur razvija mlaz usmeren direktno prema zidu, mnogo pre same implozije mehura. Proračunate su brzine mlaza u različitim stupnjevima tokom vremena implozije mehura uzimajući u obzir gustinu tečnosti i razliku pritiska između pritiska tečnosti i pritiska u mehuru, koja je u prvom slučaju iznosila 130 m/s, a u drugom slučaju 170 m/s. Takve brzine mlaza mogu da objasne velika oštećenja materijala nastala dejstvom kavitacije [97, 98]. Pritisak udarnog talasa se uvećava u slučaju implozije "oblaka" mehura⁵ i deluje na mehure sferičnog oblika koji se nalaze u blizini čvrste površine, na primer strujne cevi, zbog čega oblik mehura postaje nestabilan i mehur počinje da osciluje. Ukoliko amplituda oscilacija postane dovoljno velika, javlja se fenomen nastanka mikro-mlaza. Fluid oko mehura dobija oblik mlaza prodirajući kroz mehur i usmeren je ka čvrstoj površini koja je najbliža mehuru [73].

⁵ Kavitacioni "oblaci" su strukture male veličine i topologije, sastoje se iz mnoštva kavitacionih mehura i imaju značajnu ulogu u potencijalu kavitacije. Često nastaju kolapsom vrhova kavitacionih vrtloga [14].

Na slici 2.4. je prikazana promena oblika mehura tokom vremena rasta i implozije [98]. Kada se implozija mehura dogodi u blizini zida strujne cevi, emituje se mikro-mlaz koji je uvek usmeren ka zidu strujnice odnosno čvrste površine. Tokom krajnje faze implozije veličina mehura počinje da se redukuje, a brzina u centru mehura se povećava. Posmatrana tečnost blizu zida mehura, najdalje od zida strujne cevi, se fokusira i ubrzava prema zidu mehura, bliže čvrstoj granici, u obliku mikro-mlaza. Brzina takvog mlaza može biti vrlo velika, oko nekoliko stotina m/s, kao što su pokazali eksperimenti [2, 31, 97, 99], ili znatno veća u slučaju mikro-mlaza, reda 1500 m/s, kao što sugerišu numeričke studije [98].

Emitovani mikro-mlaz prvo udara u zid mehura, prodire kroz mehur, a potom udara na čvrstu površinu. Prisustvo vodenog sloja između zida mehura i čvrste granice umanjuje brzinu udara mikro-mlaza. Formiranje jamica na površini materijala se odvija kada je impulsni pritisak mlaza dovoljno veliki da premaši svojstva otpornosti materijala strujne cevi.



Slika 2.4. Promena oblika mehura u posmatranom vremenu: a. rast mehura; b. implozija mehura. Strelica pokazuje povećanje vremena. (3D metoda graničnih elemenata simulacije početnog jezgra od $50\mu\text{m}$ na distanci 1.5mm , prolazi razliku pritiska 10MPa u periodu 2.415ms , prema C.T.Hisao i saradnici, 2014.) [2, 98].

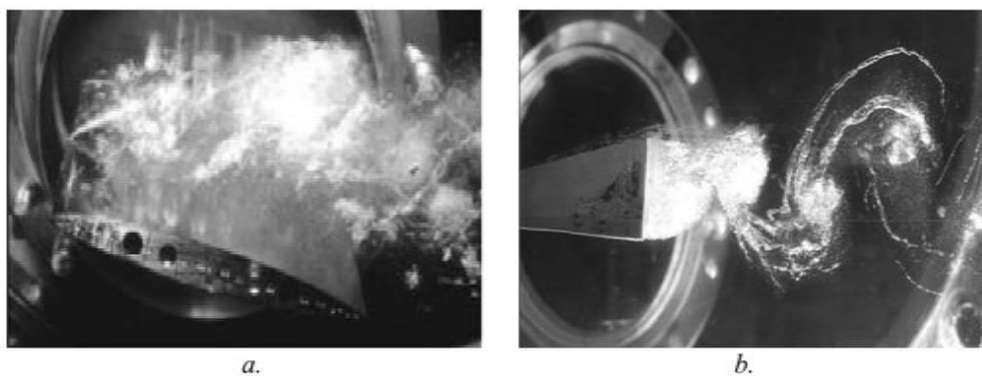
Kako eksperimentalne, tako i numeričke studije ukazuju da nakon prve implozije mehura stvara se vrtlog koji ima oblik potkovice ili prstena⁶, koji se kasnije urušava stvarajući drugi udarni talas usmeren ka čvrstoj površini. U suštini može se konstatovati da je implozija kavitacionog mehura veoma složen fenomen. Široke mogućnosti istraživanja mehanizama stvaranja i implozije mehura pružaju istraživanja na hidrodinamičkim vodenim tunelima [72-76, 88, 89].

⁶ Vrtlozi u vidu prstena ili potkovice nastaju u nestabilnom protoku fluida oko čvrstog tela oblika klina, koncentrišu se ka površini i uzrok su velikih razaranja materijala [3].

2.1.4. Fizički mehanizmi kavitacije

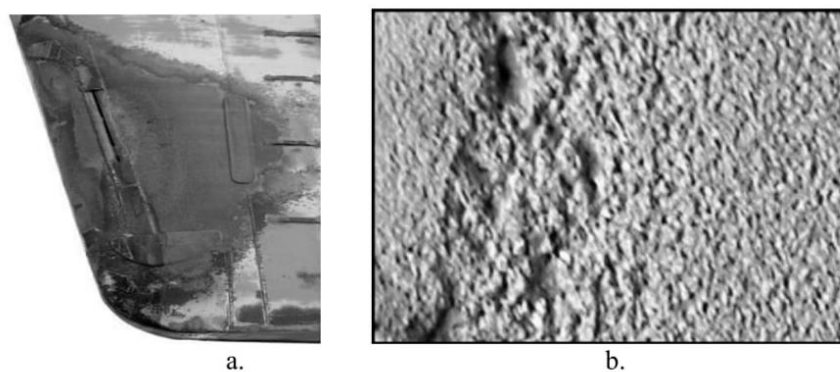
Veliki broj autora je ispitivao prirodu fizičkih mehanizama koji dovode do oštećenja materijala dejstvom kavitacije [1-10, 57, 58, 66, 72-78, 84, 87, 88, 97-103]. Prema istraživanjima autora [3, 78] fenomenološki opis oštećenja dejstvom kavitacije, nastao procesima stvaranja, rasta i implोजije mehura sa pojavom kavitacionih vrtloga, zasnovan je na konverziji potencijalne energije, sadržane u mehurima u kinetičku energiju fokusiranu u kavitacione vrtloge, koji mogu biti oblika prstena ili potkovice.

Vrtlozi u vidu potkovice se koncentrišu ka površini. Njihova koncentracija postaje mehanizam razbijanja monolitnih mehura nastalih pri velikim brzinama fluida, slika 2.5. U istraživanjima se pretpostavlja da udarni talasi izazvani implोजijom jednog mikro-mehura su dovoljni da izazovu sinhronizovanu implोजiju oblaka mikro- mehura u neposrednoj blizini.



Slika 2.5. Istraživanje mehanizama kavitacije na hidrofoliji: a. stvaranje oblaka mehura; b. stvaranje vrtloga [3, 76].

Kavitacioni mehuri i vrtlozi su glavni izvor oštećenja površine materijala dejstvom kavitacije u realnim tokovima, naprimer kod delova broda, krme i propelera, slika 2.6 [76, 85].



Slika 2.6. Primeri oštećenja površine brodskih delova dejstvom kavitacije: a. krma; b. propeler [76, 85].

Franc i Michael [3] su definisali četiri fenomena kavitacije kao osnovne mehanizme koncentracije energije u različitim oblicima implozije mehura: implozija mikro-mehura, udarni mikro-mlaz, implozija oblaka mikro-mehura i udarni kavitacioni vrtlog. U tabeli 1.1 prikazan je pregled kavitacionih fenomena, udarnih opterećenja i vremena njihovog trajanja.

Tabela 1.1. Pregled udarnih opterećenja za različite fenomene kavitacije [3, 78]

Mehanizam	Tip i amplituda opterećenja (MPa)		Trajanje (μ s)
Implozija mikro- mehura	Pritisni talas	100	1
Mikro-mlaz (iz 1 mm mehura)	Udarni mlaz	150	0,03
Implozija oblaka mikro-mehura	Pritisni talasi	$\gg 100$	$\gg 1$
Kavitacioni vrtlog	Udarni mlaz	> 100	> 10

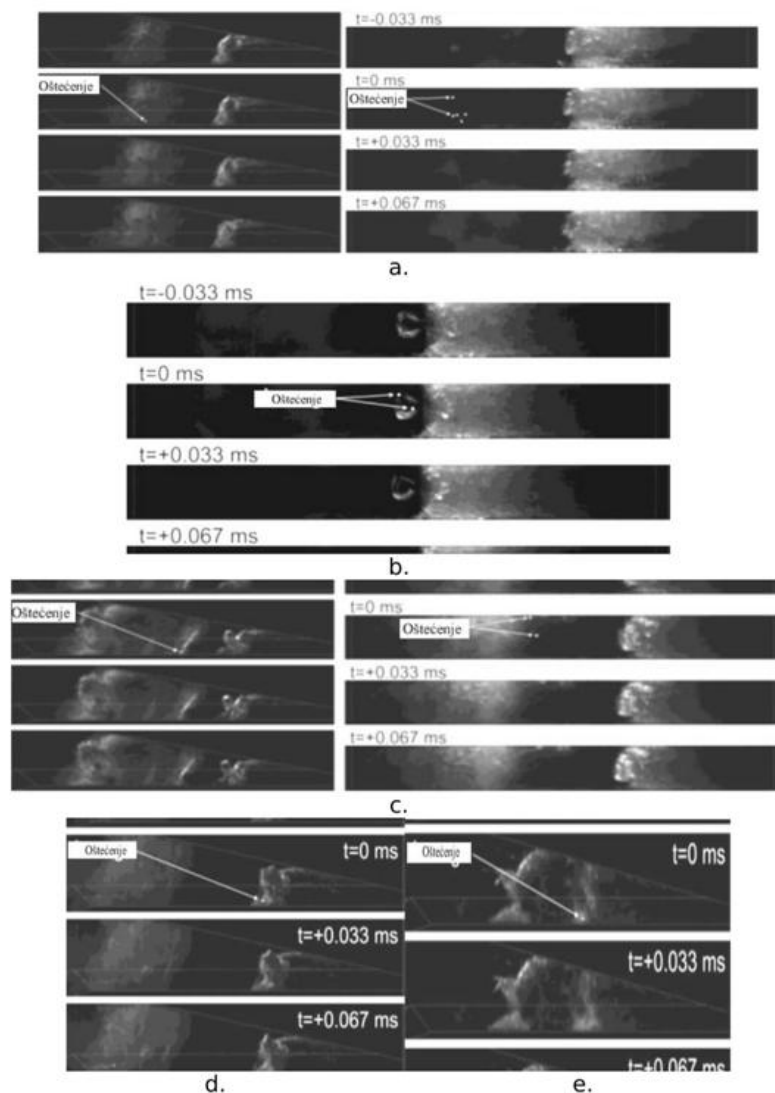
Kraj implozije sfernog mehura obeležen je visokim vrednostima temperature i pritiska, nakon čega sledi emisija mikro-mlazeva i udarnih talasa velikog intenziteta. Time se stvaraju impulsi visokog pritiska, koji dostižu zateznu čvrstoću uobičajenih metala. Pažnja, takođe, treba da se posveti trajanju impulsa prenosa energije iz tečnosti na čvrst materijal. Naime, udarni talasi i mikro-mlazevi proizašli iz implozije izolovanog mehura su veoma kratkog trajanja. Sa povećanjem veličine mehura može se povećati vreme njihovog trajanja [3].

Kavitacioni vrtlozi su uzrok ozbiljnih oštećenja hidrauličnih mašina, a pojavljuju se u smicajnim slojevima u struji fluida [3, 78]. Slika 2.7. prikazuje razbijanje vrha kavitacionih vrtloga, čiji kolaps izaziva pojavu oštećenja materijala [78].



Slika 2.7. Razbijanje vrha kavitacionih vrtloga [78].

Jedini način da se direktno prati tok i vizualizira proces sa područja oštećenja je kroz eksperiment u hidrauličnom vodenom tunelu korišćenjem veštačke površine za tretman, koja brzo reaguje na dejstvo kavitacije [104]. Razvijene su eksperimentalne tehnike gde se sa kamerama velikih brzina, vrši istovremeno posmatranje kavitacije, promena u strukturi tečnosti i merenje akustične emisije. Stvorena su nova saznanja o fizici oštećenja dejstvom kavitacije i ukazano je da strukture male veličine i topologija kavitacionih oblaka igraju značajnu ulogu u potencijalu kavitacije. Na slici 2.8 prikazani su mehanizmi kavitacije prema radu [104].



Slika 2.8. Mehanizmi kavitacije: a. sferni kavitacioni oblak; b. "potkovica" kavitacioni oblak; c. "tornado" kavitacioni oblak; d. odvajanje kavitacionog oblaka; e. zatvaranje prikačene praznine (prikaz pojedinih snimaka iz rada Dular i saradnici, 2015.) [104].

Analiza slika otkrila je da postoji pet različitih mehanizama oštećenja: sferični kolaps kavitacionog oblaka; kolaps "potkovica" kavitacionog oblaka; kolaps "tornado" kavitacionog

oblaka ("tvister", kavitaciona pojava po prvi put uočena ovim eksperimentima) i pored toga, otkriveno je da se jamice pojavljuju u momentu separacije kavitacionog oblaka i pri zatvaranju prikačene praznine - mehura za čvrstu površinu, slika 2.8. Procenjen je uticaj mehanizama kavitacije na nastajanje oštećenja materijala na sledeći način: 39% "tornado" vrtlozi; 28% "potkovicica" vrtlozi; 17% izdvojeni kavitacioni oblaci; 11% sferični kavitacioni oblaci; 5% zatvorene praznine [104].

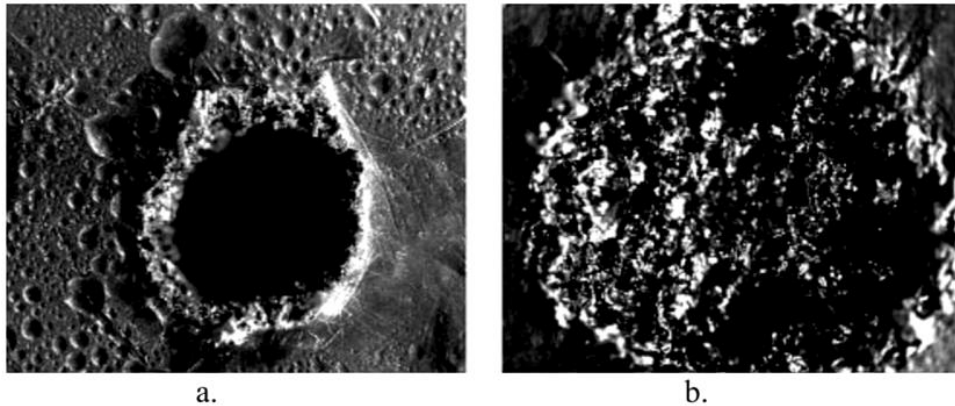
2.1.5. Oštećenja materijala pod dejstvom kavitacije

Istraživanja oštećenja metalnih materijala pod dejstvom kavitacije pokazala su veliki uticaj njihovih svojstava na otpornost prema kavitaciji, a pre svega uticaj tvrdoće, čvrstoće, Jungovog modula elastičnosti [1-4, 25, 70, 71, 74, 76, 78]. Takođe, na nastajanje oštećenja utiču hidrodinamički parametri procesa kavitacije (srednje amplitude udara, faktor oblika strujnog profila, brzine fluida), struktura i karakteristike ispitivanog materijala, ponašanje materijala tokom opterećenja (veličina i topologija oštećene površine, ojačavanje, debljina ojačanog sloja) [90-92, 96-104]. Ispitivanje otpornosti materijala na dejstvo kavitacije u praksi se obavlja primenom standardnih metoda za ispitivanje materijala na dejstvo kavitacije [58, 59].

Stepen oštećenja duktilnih metalnih materijala pod dejstvom kavitacije (obojeni metali i legure, sivi liv i legirana livena gvožđa različitog sastava, niskougljenični čelici male tvrdoće i niske otpornosti na dejstvo kavitacije) zavisi od intenziteta udarnih naprezanja. Pokazalo se da, udarna opterećenja nastala implozijom kavitacionog mehura, čije su amplitude između vrednosti čvrstoće na granici velikih izduženja i zatezne čvrstoće materijala, doprinose nastajanju elastično/plastične deformacije i otvrdnjavanju površine, dok impulsni pritisci, sa amplitudom većom od zatezne čvrstoće materijala, izazivaju oštećenja i gubitak mase materijala. Efektivno opterećenje na čvrstoj površini tokom kavitacije zavisi i od akustičnih impendansi čvrste i tečne faze [1-4, 10-12, 25, 70, 80].

Na početku procesa kavitacije materijal je čist, vrlo je duktilan i sposoban da plastičnom deformacijom apsorbuje veliki deo energije udara nastao implozijom kavitacionih mehura [1, 25]. Akumulacija energije indukuje progresivno otvrdnjavanje površinskih slojeva materijala. Materijal postepeno postaje sve krutiji, smanjuje se sposobnost za dalju deformaciju i verovatnoća pojavljivanja pukotina i mikro jamica ili jamica većih dimenzija (rupa) se povećava, slika 2.9.

Brojna istraživanja ponašanja metalnih materijala pokazala su, da je, razaranje pod dejstvom kavitacije vrsta fenomena zamora materijala [1-4, 78, 85]. Metali su veoma osetljivi na zamor materijala i to dovodi do većeg oštećenja nego jamice nastale udarnim talasima i mikro-mlazom. Istraživanja su pokazala da oblik i veličina jamica nastalih mikro-mlazom tokom procesa se gotovo ne menjaju i takve jamice jedva da igraju ulogu u razvoju kavitacije.



Slika 2.9. Tipovi oštećenja pod dejstvom kavitacije na uzorku duktilnog metalnog materijala: a. duboka oštećenja; b. površinska oštećenja [25].

Nastale jamice na metalima su uglavnom kružne sa prečnikom približno nekoliko mikrometara do jednog milimetra [3, 102]. Morfologija oštećenih površina oko takvih jamica pokazuje da je malo uklonjenih čestica sa površine. Mnogo su veća oštećenja koja se javljaju zamorom materijala, a to se posebno odnosi na metale i legure velike tvrdoće i čvrstoće (čelici visoko legirani sa hromom, niklom, kobaltom, termički obrađeni, sa beinitnom i martenzitnom strukturom; austenitni nerđajući čelici legirani sa kobaltom, visoke otpornosti na dejstvo kavitacije; legure nikla i titana; bronzе različitog hemijskog sastava i druge legure) [11, 23, 25, 28, 60, 70].

Zamor materijala dejstvom kavitacije se manifestuje u vidu traka ili linija zamora na površini preloma. Istraživanjem strukture materijala, veliki broj dislokacija je evidentiran daleko od površine materijala, a smatra se da potiču od udarnih talasa različitog intenziteta, čiju energiju apsorbuje materijal. Oštećenja evidentirana relativno dublje unutar materijala, se takođe pripisuju udarnim talasima. Eksperimentalna istraživanja oštećenih površina usled dejstva kavitacije pokazala su prisustvo pukotina koje su inicirane na površini materijala, što pretpostavlja da se maksimalno naprezanje javlja na površini materijala i da se smanjuje sa dubinom [1-4, 70, 76]. Zbog toga, površine materijala izložene dejstvu kavitacije treba da imaju visoku tvrdoću, da budu ravne i glatke, bez hrapavosti i prisustva pora u koje može da proдре tečnost za testiranje i naknadno izazove oštećenja površine. Projektovanje površine

materijala može da pruži adekvatna rešenja za povećanje otpornosti na dejstvo kavitacije putem taloženja tvrdih slojeva vezanih za osnovni material (naprimer, kod čelika legiranih sa titanom i vanadijumom, to mogu da budu čestice TiC, VC). Takođe, vatrostalni premazi doprinose poboljšanju svojstava otpornosti osnovnog materijala na habanje, otpornost na koroziju i razaranje pod dejstvom kavitacije [2, 44-47].

Efekti dejstva veoma visokih naprezanja nastalih mikro-mlazom, udarnim talasima, implozijom kavitacionih vrtloga ili nekih drugih kavitacionih struktura kojima je izložen materijal, mehanizmi akumulacije naprezanja u kavitacionoj zoni, pojava deformacije i otvrdnjavanja materijala, gubitak mase, još uvek nisu u potpunosti istraženi i objašnjeni i postoji potreba za njihovim daljim izučavanjem za različite vrste materijala. U odnosu na istraživanja metalnih materijala, radovi koji se bave istraživanjima efekata uticaja kavitacije na oštećenja keramičkih i polimernih materijala manje su prisutni u literaturi [4, 18, 34-40, 48-54].

Istraživanja keramičkih materijala u uslovima delovanja kavitacije započela su poslednjih decenija prošlog veka i pokazala su da nastajanje oštećenja veoma zavisi od strukture i svojstava ovih materijala. Za ocenu efekata dejstva kavitacije, kao referentni materijal, u većem broju radova, korišćen je termički obrađen nerđajući čelik ili intermetalne legure na bazi železa. Detaljnim posmatranjem keramičkih uzoraka posle ispitivanja na dejstvo kavitacije pokazano je da postoje različiti mehanizmi oštećenja keramičkih materijala prema kojima može da se izvrši poređenje njihove otpornosti na oštećenja. U većem broju radova proučavane su performanse inženjerskih keramika na bazi: Al_2O_3 visoke čistoće; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$; ZrO_2 ; SiC; SiC/BC kompoziti; ZrO_2 stabilizovan itrijumom; Si_3N_4 i druge vrste komercijalno dostupne silicijum-nitridne keramike; staklo-keramika na bazi liskuna (MacorTM); keramika na bazi Al_2O_3 obogaćena sa itrijumom u cilju stabilizacije strukture; BC keramika sa polimerom (sialon), silicijum-karbid-kordijeritna keramika i druge keramike [18, 48-54], a za ispitivanje primenjena je standardna metoda za ispitivanje uzoraka dejstvom kavitacije [58]. Za mogućnost procene otpornosti keramičkih materijala na dejstvo kavitacije korišćeni su rezultati dobijeni ispitivanjem u ranom periodu razvoja kavitacije- inkubacionom periodu. Poređenje je obavljeno prema sledećim kriterijumima: gubitak mase; gubitak površine usled pojavljivanja jamica, zapremina i dubina jamica određeni analizom slike; povećanje hrapavosti površine; promene u polikristalnoj strukturi i slično, pri istim geometrijskim karakteristikama keramičkih uzoraka, istom načinu njihove pripreme, poliranjem sa dijamantskom pastom da se izbegne početna hrapavost površine, kao i istim uslovima

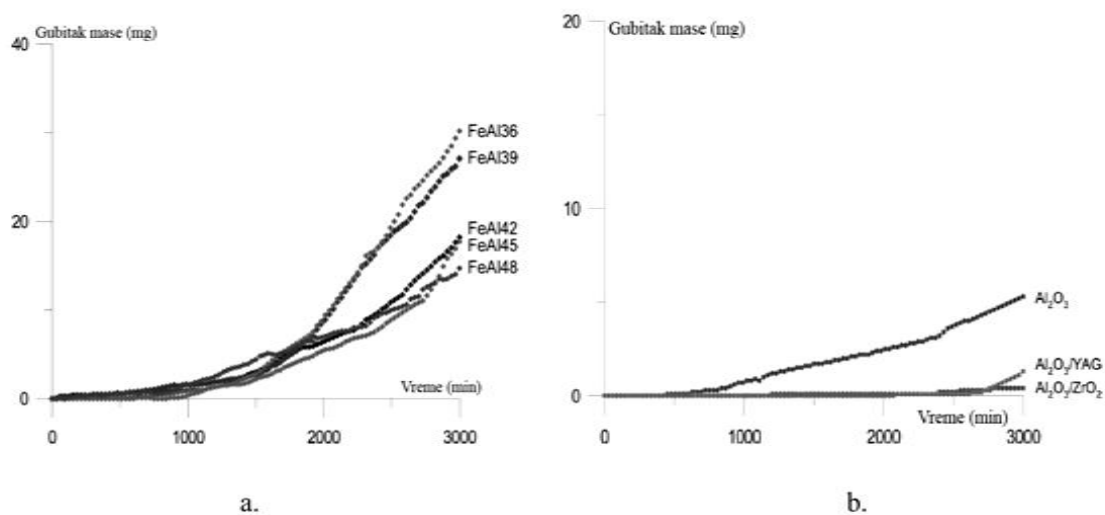
testiranja (prema G. Fatjao i saradnici, 2009) [49]. Posebna pažnja posvećena je otkrivanju jamica i merenju njihovih karakterističnih dimenzija sa optičkim profilmetrom, kao i korišćenju nedestruktivnih metoda ispitivanja za praćenje i analizu mehanizama oštećenja dejstvom kavitacije.

U radovima [48,49,53] efekti razaranja posebno su izraženi kod keramike na bazi Al_2O_3 , čak i kod keramike obogaćene sa itrijumom [18]. Mehanizam oštećenja ove keramike je potpuno drugačiji od ostalih keramičkih materijala- oštećenje nastaje prelomom bez plastične deformacije (krt prelom), pri čemu se na samom početku procesa (u prvih 30s inkubacionog perioda) javljaju prskotine i one se vremenom produbljuju gubitkom čestica sa ivica prskotine i površine preloma. Takođe, utvrđeno je da intenzitet oštećenja keramike na bazi Al_2O_3 veoma zavisi od veličine zrna i početne hrapavosti površine.

Keramika na bazi ZrO_2 pokazuje visoku otpornost na dejstvo kavitacije. U ranoj fazi procesa kavitacije, na početku je veoma teško otkriti jamice, tek posle dužeg perioda vremena pojedinačne male jamice se pojavljuju i taj broj se povećava proporcionalno sa vremenom. Proces gubitka mase nastaje dejstvom udarnih naprezanja i plastičnom deformacijom materijala kojom se stvaraju male prskotine koje se produbljuju gubitkom čestica sa ivica prskotina. Vremenom ove prskotine mogu da postanu brojnije i da dovedu do gubitka mase i gubitka površine, ali to je proces koji se odvija malom brzinom. Prema rezultatima istraživanja keramika na bazi ZrO_2 poseduje visoke performanse i ima znatno manja oštećenja i gubitak površine u poređenju sa silicijum-nitridnom keramikom, koja takođe pokazuje visoka svojstva otpornosti na oštećenja usled kavitacije. Kao primer mogu se navesti sledeći rezultati ispitivanja: pojava jamica u prvih 30s kod ZrO_2 je 4, kod Si_3N_4 je 62; posle 180 min, gubitak površine kod ZrO_2 je 0.091mm^2 , dok je kod keramike na bazi Si_3N_4 taj gubitak veći i iznosi 0.144mm^2 , hrapavost uzorka je malo manja kod silicijum-nitridne keramike. Ove dve vrste keramike pod dejstvom kavitacije pokazuju lokalno pseudoplastičnu deformaciju sa malom pojavom oštećenja na već postojećim defektima pre izlaganja dejstvu kavitacije koji se sporo produbljuju tokom vremena [48, 49]. ZrO_2 ima preobražaj tetragonalne u monokliničnu fazu koji je aktiviran uticajem kavitacije (izlaganje 40 min), odvija se na sobnoj temperaturi posle određenog vremena odstojevanja uzoraka na vazduhu (oko dva meseca), a manifestuje se povećanjem hrapavosti površine [49]. Ove promene nisu zapažene na uzorcima ZrO_2 kod kojih je primenjen itrijum kao stabilizator strukture. Keramika sa delimično stabilizovanom strukturom pokazuje povećanje žilavosti i otpornosti na oštećenja u uslovima dejstva kavitacije [51].

Keramike na bazi SiC, BC, SiC-BC kompoziti imaju dobru otpornost na oštećenje delovanjem kavitacije. Kombinacija keramičkih materijala i polimera (bor-karbid i sialon), takođe, imaju dobra svojstva otpornosti na kavitaciju [50]. Staklo-keramika na bazi liskuna ne pokazuje otpornost na dejstvo kavitacije, ali poseduje dobru korozionu otpornost na različite medije (kisljine, baze, morsku vodu) [48].

Upoređujući gubitak mase različitih materijala povišene otpornosti na dejstvo kavitacije, naprimer, metalnih materijala (kao što su intermetalne legure na bazi železa sa različitim sadržajem aluminijuma) i keramike (Al_2O_3 ; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$; Al_2O_3 stabilizovane itrijumom) pokazano je da keramički materijali imaju gotovo 15 puta veću otpornost na dejstvo kavitacije od intermetalnih legura, slika 2.10 [18].

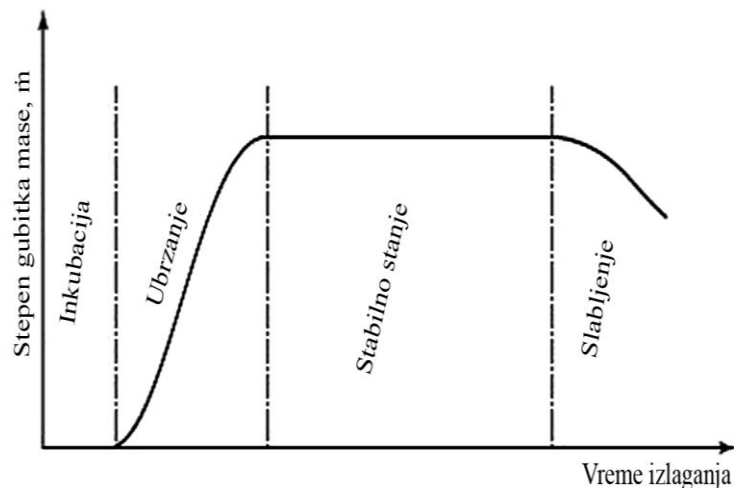


Slika 2.10. Karakteristične krive gubitka mase pod dejstvom kavitacije: a. Fe-Al intermetalne legure; b. keramički uzorci [18].

Razlog boljih svojstava keramike potiče od njihove finostrukture, bez defekata nastalih u toku procesa proizvodnje, kao i visoke tvrdoće. Kod metalnih uzoraka, slika 2.10.a, posmatranjem strukture na površini u ranom periodu razvoja kavitacije uočeni su efekti početka deformacije usled delovanja naprezanja izazvanih implozijom kavitacionih mehura. Javljaju se veoma male prskotine na površini metala duž granica zrna koje tokom vremena izlaganja dejstvu kavitacije se povećavaju i tada počinju da se primećuju fragmenti čestica duž ivica prskotina nastali kao rezultat deformacije i drobljenja ivica. Kako se vreme izlaganja dejstvu kavitacije povećava, prskotine na površini uzorka postaju vidljive, ali gubitak mase materijala je mali i smanjuje se sa povećanjem sadržaja aluminijuma u leguri (samo 10-20 mg posle 3000 minuta). Na površinama keramičkih materijala primećena su

mala oštećenja na ograničenim oblastima, oko već postojećih prskotina ili defekata na površini nastalih pre izlaganja dejstvu kavitacije, tokom izrade uzoraka. Iz dijagrama sa slike 2.10.b vidi se da najveći otpor pod dejstvom kavitacije pokazuju uzorci keramike na bazi $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (nakon perioda inkubacije nema oštećenja na uzorcima, a maseni gubitak posle 3000 min izlaganja je bio samo 0,4 mg). Gubitak mase pokazali su uzorci Al_2O_3 ojačani sa itrijumom (prosečan gubitak mase za 3000 min bio je 1,3 mg). Najmanju otpornost na dejstvo kavitacije pokazali su uzorci Al_2O_3 (period ubrzanog oštećenja nastao je nakon 1800 min, sa brzinom oštećenja oko 1,16 mg/h). Primena analize slike na površinama preloma pokazala je da, dominantan mehanizam oštećenja ispitivane keramike je uklanjanje celog zrna sa površine preloma, bez degradacije i promena mikrostrukture.

Za duktilne metalne materijale kinetička kriva oštećenja pod dejstvom kavitacije, dobijena eksperimentalnim putem, prikazana je na slici 2.11 [3].



Slika 2.11. Karakteristična kriva razaranja materijala pod dejstvom kavitacije [3].

Krive razaranja materijala pod dejstvom kavitacije zavise od vrste materijala koji se testira i uređaja koji se koristi. Na krivoj se uočavaju četiri perioda promena materijala tokom vremena izlaganja dejstvu kavitacije. U početku, tokom tzv. inkubacionog perioda, najčešće se ne pojavljuje gubitak mase materijala pod dejstvom kavitacije. U tom periodu javlja se elastična deformacija i sitne jamice na površini materijala. U drugom periodu (period ubrzanja) nastaje veći gubitak mase materijala, formiraju se nove jamice, koje se spajaju u veće i dublje jamice, a oštećenje materijala progresivno raste sa vremenom. U trećem periodu, posle određenog vremena delovanja kavitacije, ne dolazi do promena u materijalu i dostiže se stabilno stanje. Za dugotrajne testove često se primećuje period slabljenja tokom

laserskog zraka na površinu koja se meri, čime se postiže kompletno mapiranje površine sa tačnošću merenja dubine od 0,06 μm .

2.2. Osnovne karakteristike vatrostralnih materijala

Vatrostalni materijali su keramički konstrukcioni materijali sa svojstvima vatrostalnosti iznad 1580°C, tj. iznad SK 26⁷. U praksi se javljaju od prostih jedinjenja, do smeša mnogih složenih međusobno povezanih faza i jedinjenja. Zahvaljujući širokom spektru mehaničkih i toplotnih svojstava keramički materijali se koriste za različite primene [105-111].

Struktura vatrostralnih materijala je porozna, nejednaka, a čini je više vrsta kristalnih zrna objedinjenih sa matricom. Matricu predstavlja amorfni međusloj koji se sastoji od vezivne faze i sitnih zrna. Struktura i svojstva vatrostralnih materijala zavise i od tehnologija izrade [109]. Kod sinterovanih materijala kristalna zrna su približnih prečnika. Sinterovani vatrostalni materijali, koji se proizvode po tehnologijama za keramiku, sastoje se od zahlađene staklaste mase, koja spaja neproreagovane čestice polaznih materijala i minerale, koji su obrazovani tokom procesa sinterovanja. Proizvodi dobijeni topljenjem i livenjem imaju homogeniju strukturu nastalu pri hlađenju rastopa, pri čemu se izdvaja kristalna ili amorfna faza u zavisnosti od polaznog sastava sirovina i uslova kristalizacije. Optimizacijom procesa kristalizacije mogu se dobiti vatrostalni materijali željene strukture i svojstava [110, 111].

U strukturi vatrostralnih materijala prisutne su pore koje mogu da se podele prema obliku (ispupčene, udubljene, ispupčeno-udubljene); veličini (mogu da dostignu i dimenzije reda 1mm); termodinamičkoj stabilnosti (male pore- nestabilne, velike pore- stabilne); otvorenosti (otvorene i zatvorene pore, otvorene pore utiču na razarenje vatrostralnog materijala dejstvom rastopa i šljake). Veliki broj pora nastaje kao posledica nepravilnog izbora veličine zrna polaznog materijala, kao i neadekvatnog izbora parametara procesa presovanja i sinterovanja. Veličina pora, njihov oblik i raspodela imaju značajan uticaj na svojstva vatrostralnog materijala i zbog toga je važno kontrolisati poroznu strukturu u skladu sa primenom u praksi [109, 111].

Svojstva vatrostralnih materijala uglavnom zavise od hemijskog sastava, mikrostrukture i stanja površine i tome treba posvetiti pažnju pri izradi vatrostralnih proizvoda za različite industrijske primene– u metalurgiji, rudarstvu, industriji stakla, građevinarstvu i drugim oblastima. Takođe, svojstva vatrostralnih materijala veoma zavise od čistoće sirovina i proizvoda. Važna svojstva vatrostralnih materijala koja utiču na njihovu široku primenu su: visoka temperatura topljenja, velika otpornost na koroziju, habanje, velika čvrstoća, velika tvrdoća, mali koeficijent toplotnog širenja, mala gustina. Svojstva materijala kao što su:

⁷ Vatrostalnost se određuje prema standardu testom sa Segerovim piramidama (SK) [111].

krtoš, odnosno, mala žilavost i plastičnost su nepoželjna i ograničavaju njihovu primenu [108]. Nedostatak plastičnosti u vatrostralnim materijalima nastaje zbog njihovih usmerenih jonskih i/ili kovalentnih hemijskih veza [111].

Svojstva materijala veoma zavise od strukture. Čvrstoća vatrostralnih materijala je funkcija veličine zrna vatrostralnih punioca. Materijali sa finijom granulacijom zrna i time manjom veličinom prskotina na granicama zrna, su veće čvrstoće, nego oni sa većim zrnima [108]. Istraživanja su pokazala da mehanički lom vatrostralnih materijala u eksploataciji nastaje uglavnom usled strukturnih greški kao što su: površinske prskotine nastale u toku završne obrade površine; pore (poroznost nastala u procesu sinterovanja); prisustvo uključaka i velikih zrna nastalih tokom procesa sinteze [109, 111].

Kod postupaka sinteze cilj je da se dobiju vatrostralni materijali poboljšane strukture i svojstava koji sa sigurnošću mogu da se koriste u složenim uslovima eksploatacije. Do sada su u takvim uslovima eksploatacije (visoke temperature i pritisci, habanje, korozija, protok fluida i agresivnih suspenzija) najviše korišćeni metalni materijali, pre svega čelik, dok su manje korišćeni vatrostralni materijali. Poslednjih decenija vatrostralni materijali nalaze sve veću primenu. Za njihovu proizvodnju koriste se prirodne mineralne sirovine. Razvoj tehnologija dobijanja raznovrsnih vatrostralnih proizvoda može da bude aktuelan, s obzirom da mogu da zamene metalne materijale, proizvode na bazi azbestnih i staklenih vlakana [112-117].

2.2.1. Sastav i klasifikacija vatrostralnih materijala

Vatrostralni materijali predstavljaju veliku grupu materijala različitih svojstava, a obuhvataju vatrostralne sirovine i vatrostralne proizvode. Pod vatrostralnim sirovinama podrazumevaju se prirodne i veštačke sirovine koje služe za izradu vatrostralnih proizvoda. Prirodne sirovine su vatrostralne gline i kaolini, kvarcni pesak, boksit, magnezit, hromit. Veštačke sirovine predstavljaju sintetički mulit, spinel, karbide i nitride silicijuma i druge. Vatrostralni proizvodi dobijaju se iz vatrostralnih sirovina određenim tehnološkim postupkom. Pretežno se koriste oksidi (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 i drugi) zbog njihove izrazite vatrostralnosti i njihove pristupačnosti, tj. nalaženja u prirodi u velikim količinama.

Vatrostralni proizvodi dele se na dve osnovne grupe: oblikovani proizvodi (opeke, cevi, delovi peći za topljenje, lonci) i neoblikovani proizvodi (materijali za vezivanje, premazi, smese za monolitne konstrukcije i popravke, mase za nabacivanje, vatrostralni betoni) [109-112].

Osnovna namena vatrostralnih materijala je da služe kao konstrukcioni materijali u industrijskim uređajima u kojima vladaju visoke temperature. Prema temperaturi topljenja, tj. prema vatrostralnosti ovi se materijali dele u tri grupe [107, 110-112]:

- vatrostralni (1580-1770°C; SK 26- SK 35)
- povišene vatrostralnosti (1770-2000°C; SK 35-SK 42)
- visokovatrostralni (>2000°C; >SK42).

Vatrostralni materijali su heterogene strukture, sadrže komponente koje poseduju visoku temperaturu topljenja i te komponente su nosioci vatrostralnosti. U sastavu vatrostralnih materijala nalaze se i izvesne količine nevatrostralnih primesa. Pri zagrevanju na visokim temperaturama neće doći do ravnomernog topljenja materijala i prelaska čvrste u tečnu fazu na nekoj određenoj temperaturi. Prelaz iz čvrste u tečnu fazu se odigrava u temperaturnom intervalu, u kome materijal omekšava i deformiše se pod dejstvom sopstvene mase. Temperatura topljenja je uvek viša od vatrostralnosti određenog materijala. Za ocenu kvaliteta vatrostralnog materijala, u praksi nije merodavna samo vatrostralnost, već je potrebno poznavanje i drugih svojstava, kao što su omekšavanje na povišenoj temperaturi i pritisku, termička i hemijska stabilnost, otpornost na habanje i koroziju i druga svojstva. Sa porastom temperature opada čvrstoća pod opterećenjem i zbog toga su radne temperature vatrostralnih materijala daleko ispod temperature vatrostralnosti [107, 108]. Zahtev kvaliteta vatrostralnih materijala je da pri radnim temperaturama ne menjaju oblik i zapreminu; da imaju dobru čvrstoću pri opterećenju; da zadrže dobru mehaničku čvrstoću i na visokim temperaturama; da budu otporni na nagle temperaturne promene; da ne stvaraju veće količine rastopa; da su na radnim temperaturama otporni na dejstvo agresivnih suspenzija i gasova, tečnog metala i troske, kiseonika iz vazduha [107, 108, 110, 113].

Pod dejstvom visokih temperatura i pritisaka kojima su u radu izloženi vatrostralni materijali mogu da nastanu promene u strukturi materijala. Često, promene su prouzrokovane procesima kristalizacije, razlaganjem ili transformacijom prisutnih jedinjenja, nastajanjem novih jedinjenja, nastajanjem staklaste faze [109-111]. Za uspešnu proizvodnju i primenu vatrostralnih materijala potrebno je poznavanje svih navedenih promena pri radnim uslovima na osnovu čega se vrši projektovanje vatrostralnih proizvoda i izbor načina proizvodnje.

2.2.2. Primena vatrostralnih materijala

U industriji primena vatrostralnih materijala je veoma široka: oblaganje zidova, podova, svodova i drugih delova peći i pomoćnih uređaja (rekuperatora, kotlova, dimovoda i drugo); za oblaganje uređaja i habajućih delova raznih postrojenja, posebno u cementnoj industriji i pripremi mineralnih sirovina; za silose za skladištenje mineralnih sirovina; bunkere za koks i razne rude; klasifikatore i mešalice [112-117].

U metalurškim pogonima za izradu različitih vatrostralnih proizvoda najčešće se primenjuju mešavine visokovatrostralnih materijala na bazi: cirkonijum–silikata, hromita, mulita, kordijerita, korunda, talka, pirofilita, silicijum–karbida, silike, šamotno-kvarcne i druge mešavine [108, 110]. Ovi materijali se najčešće klasiraju prema sadržaju SiO_2 i dvovalentnih oksida kao kiseli, neutralni i bazni vatrostralni materijali. Silikatne i šamotne opeke sa sadržajem $>85\%$ SiO_2 pripadaju kiselom tipu, neutralne opeke su na bazi Al_2O_3 , mulita i hromita, a bazne su magnezitne, hrom-magnezitne i dolomitne opeke [107, 108, 111]. Vatrostralni proizvodi na bazi čistih oksida proizvode se u specijalnim oblicima kao što su: tignjevi, cevi, pojedini delovi za visokotemperaturne peći. Najčešće se primenjuju oksidi: Al_2O_3 ; BeO ; CaO ; CeO_2 , Cr_2O_3 ; MgO ; SiO_2 ; SrO ; TiO_2 ; V_2O_3 ; ZrO_2 .

Oblikovani vatrostralni proizvodi obuhvataju različite vatrostralne opeke koje se dobijaju obradom, oblikovanjem, sušenjem i povezivanjem vatrostralnih sirovina bilo sinterovanjem ili nekim drugim postupkom. Podela ovih proizvoda na osnovu hemijskog sastava je: visokoaluminatni proizvodi ($45\% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 56\%$); proizvodi od vatrostralne gline –šamot ($30\% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 45\%$); niskoaluminatni proizvodi–polukiseli ($10\% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 30\%$; $\text{SiO}_2 < 85\%$); silika-proizvodi ($\text{SiO}_2 > 93\%$); silikatni proizvodi ($85\% < \text{SiO}_2 < 93\%$); bazični proizvodi–magnezitni ($\text{MgO} > 80\%$) [110]. Oblikovani vatrostralni proizvodi takođe obuhvataju izolacione vatrostralne proizvode koji se upotrebljavaju za toplotnu izolaciju delova peći i postrojenja koji ne dolaze u direktan dodir sa rastopljenim metalima i troskama.

U livnicama za izradu kalupa, jezgara i vatrostralnih premaza, primenjuju se različiti vatrostralni materijali. Oni imaju važnu ulogu za postizanje zahtevanog kvaliteta odlivaka i povećanje produktivnosti rada [118-121].

Savremeni vatrostralni materijali nalaze primenu u raketnoj tehnici i vazduhoplovstvu kao konstrukcioni materijali za izradu lopatica turbina, mlaznica izduvnih gasova kod mlaznih aviona i slično [108].

Zbog svoje velike čvrstoće i tvrdoće vatrostralni materijali se teže obrađuju, slabo se spajaju sa drugim materijalima, imaju različite koeficijente širenja u odnosu na metale, a što sve

stvara probleme za njihovu primenu. Sinteza materijala poboljšane strukture i svojstava je veoma značajna za tehničke primene u uslovima gde postoji visokotemperaturna i visokoabrazivna sredina, kao što je, naprimer, sredina u kojoj je prisutna kavitacija. U uslovima delovanja kavitacije, do sada, pretežno su korišćeni metalni materijali [1, 11, 18, 28, 29]. Novija istraživanja ukazuju na uspešnu primenu konstrukcione keramike i staklo-keramike u uslovima dejstva kavitacije [6, 48-53].

2.2.3 Vatrostalni materijali za primenu u uslovima dejstva kavitacije

Razvoj novih vatrostalnih materijala otpornih na razaranje pod dejstvom kavitacije postavlja niz zahteva: čiste i kvalitetne polazne komponente za pripremu vatrostalnih punioca i masa; jeftine i lako dostupne nemetalične sirovine; razvoj postupaka sinteze i karakterizacije proizvoda za dobijanje zahtevane strukture i svojstava; praćenje ponašanja dobijenih materijala u eksploataciji u cilju optimizacije procesa sinteze proizvoda sa poboljšanom strukturom i svojstvima za primenu u praksi. To se pre svega odnosi na istraživanja vatrostalnih materijala koji se već koriste u praksi: mulita, kordijerita, cirkonijum–silikata, talka [119-121], kao i novih materijala i proizvoda na bazi bazalta [115, 116].

2.2.3.1 Vatrostalni materijali na bazi mulita

Mulit⁸ sadrži oko 72% Al_2O_3 i 28% SiO_2 (hemijska formula $Al_6Si_2O_{13}$). Postupci proizvodnje su dizajnirani tako da maksimiziraju formiranje složenog tipa mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). U industriji korišćenjem različitih sirovina i procesa sinteze mogu se dobiti različiti tipovi mulita. Na sintezu mulita utiče niz parametara: čistoća, kristalni oblik i veličina čestica reaktanata Al_2O_3 i SiO_2 u početnoj smeši za dobijanje mulita, zatim temperatura i vreme trajanja reakcije, vrsta i količina dodataka koji utiču na proces sinteze [122-128]. Važan faktor sinteze mulita je primena mineralizatora (LiF , NaF , Cr_2O_3 , Na_2WO_3 , TiO_2). Mineralizatori ubrzavaju sintezu mulita kroz indirektan uticaj na smanjenje viskoznosti i površinskog napona proizvedenog rastopa [122, 129-132]. Savremena sinteza mulita se fokusira na sol–gel metodama koje omogućavaju dobijanje mulita sa homogenom strukturom. Sol-gel metode otvaraju mogućnosti razvoja proizvodnje tankih filmova, vlakana mulita sa bilo kojom čistoćom faza, distribucijom faza i morfologijom zrna [122]. Mulit se industrijski

⁸Mulit se veoma retko pojavljuje kao prirodan mineral. Otkriven je 1924.god. na ostrvu Mul, Škotska u sastavu vulkanskih stena i od tada počinje njegovo intenzivno istraživanje i primena [122].

proizvodi u providne, porozne i neporozne oblike. Ovi materijali mogu da imaju visoka optička i elektronska svojstva [133, 134].

Zahvaljujući strukturi i svojim odličnim svojstvima mulit može da bude izvrstan konstrukcioni material. Važna svojstva mulita su: dobra stabilnost zapremine i čvrstoće na visokim temperaturama; visoka otpornost na puzanje i termo šok; niska toplotna ekspanzija i provodljivost; visoka otpornost na abraziju i eroziju; koroziona otpornost na šljake, alkalije, tečne metale, soli hlorida, korozivne gasove; otpornost na dejstvo kavitacije. To sve ga čini atraktivnim materijalom za dobijanje vatrostalnih proizvoda i primenu u rigoroznim uslovima eksploatacije u oblasti metalurgije i rudarstva [123, 130, 135].

Prema literaturnim podacima mulit se široko primenjuje u raznim oblastima: za dobijanje mulitnih vatrostalnih opeka za ozide i podne obloge u pećima za topljenje metala (elektrolučnim pećima, visokim pećima i predpećicama), pećima za topljenje stakla, za ozide kanala za izlivanje tečnog čelika, za delove peći kao što su cevi, valjci, štapovi, nosači, termoelementi i drugi toplotno otporni delovi [129, 132]. Na bazi mulita razvijen je napredni keramički motor sa niskim koeficijentom toplotnog širenja sa veoma izdržljivom glavom motora [136]. U izduvnim delovima motora koriste se kompoziti sa osnovom mulita i dugim vlaknima na bazi glinice, kao ojačivača. Na bazi mulita, za tunnelske peći, razvijen je transportni prenosnik kao zamena za transportne trake od nerđajućeg čelika [137, 138]. S obzirom na visoku termičku stabilnost u uslovima oksidacije, mulit se preporučuje kao materijal za izradu osnove kompozita [124, 130]. Izrada kompozita sa osnovom mulita i primenom ojačivača na bazi čestica SiC, ZrO₂, TiO₂ predstavlja napredak u razvoju proizvoda na bazi mulita za primenu u uslovima visokih napona i visokih temperatura. Pri tome se koriste različite metode sinteze: plazma spraying proces, CVD proces, sinterovanje, sol-gel proces i druge [131, 136-138].

2.2.3.2. Vatrostalni materijali na bazi kordijerita

Kordijerit⁹, je trokomponentno jedinjenje u sistemu MgO-Al₂O₃-SiO₂ a označava fazu 2MgO·2Al₂O₃·5SiO₂ [139, 140]. Dostupnost kordijerita kao minerala u prirodi je izuzetno retka i teško se javlja u komercijalnim količinama. Kordijerit se može sintetizovati iz različitih sirovina, a za industrijsku proizvodnju koriste se prirodni materijali: talk, visokokvalitetne vatrostalne gline, glinica ili elektrotopljeni korund [141-144]. Postoje različite metode sinteze kordijerita [145-152]. Jedna od metoda sinteze je reakciono

⁹Kordijerit je otkriven 1813. godine od strane francuskog geologa Luis Cordier-a [140].

sinterovanje različitih smeša polaznih sirovina proračunatih prema stehiometrijskom sastavu kordijerita i to: smeša od slobodnih oksida (MgO , Al_2O_3 , SiO_2); smeša od oksida magnezijuma, kvarca, žarene gline; smeša na bazi talka i kaolina [140, 144]. Kordijerit se obrazuje na temperaturama 1200-1250°C malom brzinom, a na temperaturama iznad 1350°C reakcija sinteze je intenzivnija i obrazuje se značajna količina kordijerita [151]. Sinteza kordijerita se odvija u veoma uzanom temperaturnom intervalu (15-25°), što veoma otežava proizvodnju kordijerita [141]. Pri sintezi dodatak aditiva utiče na proširenje intervala sinterovanja za 40–50° i to poboljšava karakteristike kordijeritne keramike. Preporučuje se uvođenje 2-3% oksida baznih metala preko feldspata [112, 140], a pokazalo se da najpovoljniji uticaj na sinterovanje i svojstva sinterovanog kordijerita ima TiO_2 i ZrO_2 [149, 150].

Poslednjih godina intenzivno se istražuju i razvijaju različite metode sinteze finog kordijeritnog praha velike sinterabilnosti, a jedna od metoda sinteze je sol-gel postupak [152]. Kordijerit poseduje nisku vrednost dielektrične konstante, vrlo malu vrednost koeficijenta toplotne provodljivosti i koeficijenta linearnog toplotnog širenja, visoku tvrdoću i čvrstoću, relativno visoku temperaturu topljenja sa mogućnošću primene do 1380°C, visoku inertnost prema tečnom metalu [140, 144-147]. Ova svojstva čine kordijerit važnim materijalom za istraživanje i široku primenu u oblastima: elektrotermije, elektronike, za izradu specijalnih konstrukcionih delova u mašinstvu, automobilskoj industriji, za specijalne potrebe hemijske industrije, industrije vatrostalnih materijala, industrije abraziva, za primenu u uslovima kavitacionih opterećenja, u livarstvu kao punioc vatrostalnih premaza [112, 119, 153].

2.2.3.3. Vatrostalni materijali na bazi cirkonijum–silikata

Cirkonijum–silikat (ZrSiO_4) sadrži 67,2 % ZrO_2 i 32,8 % SiO_2 . Mineral cirkonijum–silikat se koristi za dobijanje cirkonijum metala, cirkonijumskih jedinjenja, keramičkih proizvoda, abraziva i slično [154, 155]. To je atraktivan vatrostalni materijal koji se široko koristi za sintezu novih materijala zbog svojih svojstava: visoka temperatura topljenja ili visoka vatrostalnost, mali koeficijent toplotnog širenja, visoka otpornost na termički udar, otpornost na dejstvo tečnog metala i šljake, ne kvasi se tečnim metalom, ne proizvodi gasove u kontaktu sa tečnim metalom [156].

U livnicama cirkonijum–silikat se koristi za izradu kalupa za livenje visokokvalitetnih čeličnih odlivaka, keramičkih školjki i keramičkih jezgara za precizno livenje. Kao punioc za

vatrostralne premaze preporučuju se za livenje velikih i složenih čeličnih odlivaka [112, 121, 157].

Cirkonijum–silikat nije magnetičan i neprovodnik je. Za različite uslove primene zahtevaju se različita fizičko–hemijska svojstva korišćenih sirovina na bazi cirkonijum–silikata. Postoji širok spektar komercijalnih cirkonijumskih proizvoda koji se razlikuju po sadržaju nečistoća, obliku i veličini zrna punioca. Svojstva koje zahteva tržište vatrostralnih materijala (opeke, cigle, malteri, betoni, obloge, premazi) pre svega se odnose na čistoću sirovina, visok sadržaj ZrO_2 , nizak sadržaj Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 i slobodnog silicijuma, nizak sadržaj intersticijske vode [156-159].

Cirkonijum–silikat može da se dobije sintezom iz SiO_2 i ZrO_2 u elektrolučnim pećima ili reakcijom cirkonijumskih soli sa natrijumsilikatom u vodenim rastvorima. Može da se eksploatiše iz prirodnih ležišta i koncentriše se raznim procesima pripreme mineralnih sirovina. Separiše se iz peska elektrostatičkim i elektromagnetnim metodama, korišćenjem razlika u specifičnim težinama, razlikama u magnetnim svojstvima ili razlikama u svojstvima provodljivosti. Mineral cirkon varira od ležišta do ležišta po veličini zrna, obliku zrna i hemijskoj čistoći [156]. Vatrostalni punioci na bazi cirkonijum–silikata dobijaju se prečišćavanjem, separacijom i usitnjavanjem peska cirkonijum–silikata procesima usitnjavanja i mlevenja do veličine zrna 40-50 μm za sintezu različitih vatrostralnih proizvoda, a pre svega za sintezu vatrostralnih premaza [112, 118, 156-159]. Imajući u vidu svojstva cirkonijum–silikata: visoka vatrostalnost, visoka tvrdoća i čvrstoća, velika gustina, mali koeficijent termičkog širenja, mala toplotna provodljivost, može se pretpostaviti da ovaj materijal može da pruži dobru otpornost na oštećenja u ekstremnim uslovima, kao što je dejstvo tečnih rastopa metala, agresivno dejstvo rastopljenih šljaka, gasova, kao i dejstvo visokih kavitacionih opterećenja [160].

2.2.3.4. Vatrostalni materijali na bazi hromita

Hromit predstavlja čvrst rastvor nekoliko minerala koji pripadaju grupi spinela. U hromitnim rudama nalaze se oksidi FeO , MgO , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Vatrostalna svojstva hromitne rude zavisi od karakteristika i količine silikata koji se nalaze u rudi, a najznačajnije je prisustvo Cr_2O_3 . Za primenu u livarstvu hromitni pesak treba da sadrži Cr_2O_3 iznad 44,0%, a sadržaj SiO_2 i CaO treba da bude što je moguće manji. Pesak treba da je prečišćen od hidratizanih minerala. Ovakav hromit može da se dobije samo obogaćivanjem, putem ispiranja i prosejavanja. Hromit se topi na 2180 °C, tvrdoća mu je oko 5,5 jedinica Mohs-ove skale, ima

mali koeficijent toplotnog širenja, što omogućava primenu u livnicama i dobijanje odlivaka sa dobrom dimenzionalnom tačnošću [105, 161]. Premazi na bazi hromita uspešno se primenjuju kod livenja svih vrsta čelika, a posebno je pogodan za livenje teških odlivaka od austenitnog manganskog čelika. Zbog svoje male reaktivnosti sa oksidima mangana, sprečava stapanje peska i prodiranje metala u kalup. Takođe, premazi na bazi hromita primenjuju se u slučajevima livenja nerđajućih i vatrostalnih visokolegiranih čelika [109, 162].

2.2.3.5. Vatrostalni materijali na bazi talka

Talk je hidrosilikat magnezijuma čija opšta formula može da se prikaže kao $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ sa primesama Al_2O_3 , FeO, NiO, CaO. U prirodi se retko nalazi čist talk. Zbog toga, praktično postoji samo industrijski talk, čiji je hemijski sastav dosta heterogen [105, 161, 163]. Iz mineralne sirovine talk se dobija postupcima usitnjavanja i luženja. Osnovni cilj procesa prečišćavanja luženjem je snižavanje sadržaja Fe_2O_3 i CaO [161].

Širok je spektar primene fino samlevenog, mikoroniziranog talka: u industriji boja, keramičkoj industriji, farmaceutskoj industriji, u građevinarstvu i drugim oblastima.

U oblasti keramike od mlevenog talka proizvode se visokonaponski izolatori, izolacioni uređaji u radioindustriji, auto i avio izolatori, keramičke cevi, posude od keramike i sl.

Zahtev za postizanje kvaliteta proizvoda na bazi talka je da sadržaj SiO_2 bude iznad 60%, sadržaj MgO ne manji od 28%, da sadržaj železa preračunat na Fe_2O_3 ne bude veći od 1,5%, sadržaj CaO ne viši od 0,8%, vlaga manja od 1% [163]. Talk ima listastu strukturu i nisku tvrdoću. Kao punioc za izradu različitih keramičkih proizvoda ima nekoliko odličnih svojstava: visoka tačka topljenja; visoka inertnost, tj. otpornost prema kiselinama, alkalijama i zagrevanju; visoka mehanička otpornost; fina struktura; niska higroskopnost; neosetljivost na temperaturne promene; mali koeficijent toplotne provodljivosti; mali koeficijent linearnog termičkog širenja; velika sposobnost nalepljivanja i oblaganja površina, dobra meljivost [161].

2.2.3.5. Vatrostalni materijali na bazi bazalta

Bazalt je tvrda, kompaktna bazična vulkanska stena. U sastavu bazalta zastupljeni su različiti minerali: plagioklasi, pirokseni, olivin, neprovidni minerali (spinel, magnetit, hromit), serpentini, hlorit, limonit, a često ima staklast izgled [164-170]. Bazalt je obično crn ili siv. Pogodan je za izradu različitih dekorativnih proizvoda, suvenira, za tehničku keramiku.

Veliku mogućnost za primenu u sastavu keramičkih glazura imaju vulkanska stakla kao što su: perlitni, vulkanski tufovi, andeziti, sijeniti, bazaltni tufovi i slično [171-173].

Bazalt poseduje dobra tehnička svojstva: visoka tačka topljenja; velika tvrdoća; velika gustina i kompaktnost; otpornost na koroziju, habanje, kiseline, baze i toplotu, dejstvo agresivnih suspenzija i fluida. Lako je dostupan i predstavlja jeftinu sirovinu za dobijanje stakla i staklo–keramike procesima sinter kristalizacije, topljenja, livenja i termičkog tretmana. Staklo–keramika na bazi bazalta ima veoma finu i homogenu strukturu, odlična fizička i mehanička svojstva, hemijsku postojanost, visoku otpornost na habanje i koroziju [167, 174, 175]. Prema podacima iz literature, vatrostalni materijali na bazi bazalta nalaze primenu u svim industrijskim granama u kojima se zahteva hemijska postojanost i otpornost na habanje: elektrotehnika, hemijska industrija, metalurgija, rudarstvo, građevinarstvo, putna privreda [167, 176-181].

Rovni bazalt se primenjuje kao zamena za prirodni kamen za oblaganje uređaja i habajućih delova raznih industrijskih postrojenja, posebno u cementnoj industriji [114], za silose za skladištenje mineralnih sirovina, bunkere za koks i razne rude, klasifikatore i mešalice [115, 116], za izradu antikorozivnih i termoizolacionih materijala [180-182].

Za opštu primenu bazalt se koristi za izradu porcelana, majolike, fajansa, sanitarne keramike, umetničke keramike, za izradu dekorativnog nameštaja, posuđa, glazura za dekorisanje različitih keramičkih i drugih proizvoda [183-185].

Sinteza i primena kompozitnih materijala sa polimernom osnovom i ojačivačem na bazi bazalta (tanka i super tanka bazaltna vlakna, bazaltni prah) široko su prisutni u mašinskoj industriji, auto industriji, brodogradnji, građevinarstvu za izradu konstrukcionih delova i opreme gde je potrebna visoka tvrdoća i otpornost na habanje [186-188].

Bazalt se koristi za sintezu savremenih materijala i za proizvodnju različitih proizvoda: bazaltne vune, tankih i super tankih bazaltnih vlakana, livenih proizvoda, bazaltne plastike, antikorozivnih materijala za primenu u izgradnji saobraćajnica, građevinskih objekata [182]. Ovi proizvodi se primenjuju kao toplotno izolacioni i antiakustični materijali u građevinarstvu i industriji, za primenu u širokom temperaturnom intervalu od niskih do visokih temperatura.

Bazaltni proizvodi su netoksični, nezapaljivi i neeksplozivni. Značajni su jer mogu da supstituišu azbest, metalne materijale [167, 177, 180, 181].

2.2.4. Vatrostalni premazi

U praksi livnica, za proizvodnju odlivaka gvožđa, čelika i obojenih metala, široko se primenjuje tehnologija livenja u peščane kalupe. Kaluparske i jezgrene mešavine izrađuju se na bazi kvarcnog peska. Kvarcni pesak je jeftina vatrostalna sirovina, ali poseduje niz nedostataka kao što su niska vatrostalnost, veliki koeficijent toplotnog širenja. Ti nedostaci su uzrok nastajanja površinskih grešaka na odlivcima, a posebno u slučaju livenja čeličnih odlivaka [189, 190]. Mogućnost primene kvalitetnih kaluparskih mešavina na bazi vatrostalnih materijala boljih termofizičkih karakteristika (cirkonski pesak, olivinski, mulitni pesak, sinter-magnezit) je ograničena, s obzirom na njihovu visoku cenu koštanja [161, 190]. Za dobijanje odlivaka visokog kvaliteta češće se primenjuju različiti dodaci kaluparskoj mešavini kojima se poboljšava kvalitet kalupa i jezgara ili se primenjuju vatrostalni premazi za kalupe i jezgra [110, 189, 190]. Primenom premaza postiže se visok kvalitet površine odlivaka (bez grešaka tipa: hrapavost površine; sinterovani slojevi peska; udubljenja; izrasline i slično), eliminišu se skupe livačke operacije čišćenja odlivka i mašinske obrade, što direktno snižava proizvodne troškove livnice [190-196].

Sistematična istraživanja svojstava vatrostalnih premaza pokazala su da postoje opšti uslovi koje premazi moraju da zadovolje: odgovarajuća vatrostalnost; mali koeficijent toplotnog širenja; odgovarajuća propustljivost za gasove; otpornost na struju tečnog metala bez probijanja i penetracije u zid kalupa; inertnost u odnosu na tečni metal; lako nanošenje i sušenje premaza, dobijanje tankog vidljivog filma premaza čvrsto vezanog za površinu na koju se nanosi [118, 158, 159, 192-199].

Savremeni vatrostalni premazi se sastoje iz više različitih komponenata, a najvažnije komponente su: vatrostalni punioc, vezivno sredstvo, sredstvo za održavanje suspenzije i rastvarač [192, 198, 199]. Kao punioc koriste se različiti vatrostalni materijali, a njihov izbor je u skladu sa karakteristikama: relativno visoka temperatura topljenja; mali koeficijent toplotnog širenja; inertnost prema tečnom metalu; nekvašljivost tečnim metalom [198]. U odnosu na morfologiju čestica, vatrostalni punioci mogu da se podele na zrnaste i lamelarne punioce. Zrnasti punioci se koriste pretežno za visoke temperature livenja gde se zahteva visoka vatrostalnost i otpornost na hemijska dejstva. Takvi materijali su: mulit, korund, cirkon, kordijerit, talk. Liskun i grafit se koriste kao lamelarni punioci. Pokazalo se da priprema vatrostalnih punioca mlevenjem i mehaničkom aktivacijom pozitivno utiče na kvalitet livačkih premaza, kao i na kvalitet površine dobijenih odlivaka [118, 197-200]. Mikronizirajućim mlevenjem vatrostalnih punioca povećava se njihova specifična površina,

dolazi do promene svojstava punioca, odnosno povećava se površinska aktivnost zrna punioca, posebno pri veoma finom mlevenju, odnosno aktiviranju [201-204]. Utvrđeno je da na kvalitet vatrostralnog punioca veliki uticaj ima tip primenjenog mehanoaktivatora i parametri procesa mlevenja: kapacitet, snaga uređaja, masa meljućih tela, stepen popunjenosti mlina, vremena mlevenja, prisustvo aditiva u procesu mlevenja i slično [201].

Važna karakteristika premaza je sedimentaciona stabilnost suspenzije premaza. Da bi se postigla zadovoljavajuća sedimentaciona stabilnost premaza, preporučuje se da veličine zrna punioca budu ispod 40 μm i da se u sastavu premaza primene različite vrste i količine aditiva (lucel, $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_3$, bentoniti) [118, 120]. Cilj je da se punioc održi u dispergovanom stanju u suspenziji i da se spreči njegovo taloženje. Za smanjenje brzine taloženja punioca vrši se aktivacija suspenzionog sredstva mešanjem sa različitim vremenima i brzinama mešanja [198]. Izbor vezivnog sredstva u sastavu premaza (kolofonijum- $\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$, bentonit, Bindal H) i rastvarača (voda, alkohol) vrši se u odnosu na vrstu, oblik i veličinu zrna vatrostralnog punioca [199]. Vezivo omogućava povezivanje zrna punioca međusobom, kao i dobru adheziju nanetih slojeva premaza na površinu kalupa ili jezgara. Prema većem broju radova preporučene gustine premaza za pešćane kalupe i jezgra su 1,8-2 g/cm^3 . Pri tome poželjno je da se vatrostralni punilac (veličine čestica do 40 μm), koristi u količini 92-95%; vezivno sredstvo u količini 2,3-3,5%; aditivi do 1,5%; a rastvarač do preporučene gustine suspenzije premaza [118, 198-200].

Za razvoj novih metoda livenja (livenje sa isparljivim modelima- Lost foam proces, livenje sa topivim modelima) važan je razvoj novih vatrostralnih premaza poboljšanih svojstava, a posebno svojstava propustljivosti za gasove, koji se intenzivno razvijaju u toku procesa livenja pri degradaciji polimernih modela u kontaktu sa tečnim metalom [193, 205-214]. Proučavanjem Lost foam vatrostralnih premaza utvrđeno je da pokazuju izolacioni efekat i da utiču na proces očvršćavanja i formiranja krupnozrne strukture odlivaka [205, 206, 212]. U fazi ulivanja tečnog metala odvija se endotermni proces razlaganja i isparavanja polimernih modela koji snižava temperaturu tečnog metala. Nastalo podhlađenje utiče na formiranje sitnozrne strukture odlivaka [193, 212]. U istraživanjima novih Lost foam vatrostralnih premaza posebna pažnja posvećuje se upravljanju procesom razlaganja polimernih modela, optimiziranju produkata razlaganja primenom polimera manje gustine, specijalno projektovanih za ovu metodu livenja [193, 209]. Temperatura livenja je važan parametar, a njen izbor zavisi od vrste i gustine polimernog modela. Ako je polimer veće gustine, biraju se više temperature livenja s obzirom da je razlaganje i isparavanje polimera endoterman proces.

Razvoju materijala za izradu polimernih modela i vatrostalnih premaza posvećena su brojna istraživanja koja sprovode vodeće svetske livnice u kojima se razvija i primenjuje Lost foam proces livenja [123, 207-209, 212]. U radovima [121, 162, 163, 198, 199, 210, 211, 214] istraživana je mogućnost primene punioca na bazi talka, kordijerita, cirkonijum silikata, hromita, liskuna u sastavu Lost foam vatrostalnih premaza. Pažnja je posvećena izboru polimera manje gustine za izradu modela (polistiren, gustine ispod 19 kg/m^3), primeni suvog kvarcnog peska za kalupovanje veće granulacije ($0.36 \times 10^{-3} \text{ m}$), primeni tanjih visokopropustljivih slojeva vatrostalnih premaza sa kontrolisanim reološkim svojstvima (debljine sloja do $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$). Dobijeni vatrostalni premazi su ispitivani u skladu sa standardom za ovu vrstu vatrostalnih proizvoda [158, 159]. Cilj je bio optimizacija Lost foam procesa livenja i dobijanje odlivaka unapred zadatih svojstava.

Za zaštitu delova metalnih konstrukcija koje su izložene rigoroznim uslovima eksploatacije koriste se premazi sa dobrom kombinacijom svojstava otpornosti na habanje, velike tvrdoće i čvrstoće [215-219]. Za povećanje otpornosti hidrauličnih komponenata na dejstvo kavitacije primena različitih premaza i prevlaka je opravdana s obzirom da je razaranje pod dejstvom kavitacije površinski degradacioni mehanizam. Veliki broj istraživanja posvećen je korišćenju nemetalnih materijala (keramičkih i polimernih) u uslovima dejstva kavitacije [1]. Neki nemetalni materijali sa visokom elastičnošću i otpornošću na koroziju primenjuju se kao zaštitne prevlake na metalnim površinama sa ciljem da poboljšaju mehanička svojstva površine izložene dejstvu kavitacije. Visoko fleksibilni materijali kao što su elastomeri pod određenim uslovima pokazuju mnogo bolju otpornost na dejstvo kavitacije u poređenju sa metalima koji imaju znatno veće vrednosti mehaničkih svojstava. Otpornost elastomera na dejstvo kavitacije objašnjava se ponašanjem mikro-mlazeva i udarnih talasa dobijenih implozijom kavitacionih mehura blizu elastomerne površine. Zbog uticaja dinamike implozije mehura blizu elastomerne ili druge fleksibilne površine, mikro-mlazevi i udarni talasi teže da se odbiju od površine i rasipaju svoju energiju većim delom unutar fluida, nego na površini. Deo energije implodiranih mehura elastomeri mogu absorbovati pomoću viskozno elastične deformacije, što im omogućava da se suprotave udarima tečnosti pri niskim hidrodinamičkim intenzitetima. Nedostatak fleksibilnih prevlaka, posebno guma, su teškoće povezivanja sa nekim materijalima ili kompleksnim oblicima pa nisu pogodni za primenu u uslovima intenzivne kavitacije, jer se lako oštećuju [218].

Primer visokofleksibilne prevlake u zaštiti metala je prevlaka koja predstavlja dvokomponentni epoksi sistem (epoksi smola - araldit i umreživač u odnosu 100:35, različite debljine sloja na metalnoj površini) [1, 219].

Zaštitni premazi mogu biti i na bazi različitih vatrostalnih punioca (TiN; TiO₂; NiN; NiTi; NbN; WC; VC; WC-10Co-4Cr;), sa organskim vezivima i rastvaračima i često se koriste za opremu izloženu kavitacionim opterećenjima [30, 40, 54]. Proizvodnja zaštitnih premaza odvija se savremenim procesima sinteze (CVD proces, plazma sreying proces, primena lasera, sol-gel procesi i slično) i time se povećava svojstvo otpornosti na kavitaciona oštećenja metalnih površina [41-47].

2.3. Kompoziti polimerna osnova / keramički ojačivač

Kompoziti su savremeni inženjerski materijali specifičnih svojstva: mala gustina i masa; dobra mehanička svojstva, antikorozivnost; otpornost na habanje; dimenzijska postojanost u radu na ekstremno visokim temperaturama i drugim ekstremnim radnim uslovima; visoka otpornost na uticaj agresivnih hemikalija. Odlikuju se mogućnošću izrade složenih konstrukcija jednostavnim postupcima obrade uz dizajniranje zahtevanih svojstava. U poređenju sa drugim inženjerskim materijalima (metalni materijali, polimeri, keramika) odlikuju se nizom pozitivnih svojstava za primenu u građevinarstvu¹⁰, mašinstvu¹¹, avio-industriji¹², brodogradnji¹³, za potrebe automobilske industrije¹⁴, balističke zaštite¹⁵ i drugim oblastima primene u kojima se traže laki i visokočvrsti konstrukcioni materijali [107, 188, 220-222]. Značajna primena kompozitnih materijala je u oblastima proizvodnje i primene materijala za visokotemperaturske namene. Savremeni vatrostalni materijali često se mogu svrstati i u grupu kompozitnih materijala [107].

Kompozit čine dve osnovne komponente: matrica i ojačivač. Zadatak matrice (izrađene od metala, polimera ili keramike) je da daje spoljni oblik kompozita i drži ojačivače zajedno. Ojačivači su komponente koje daju jačinu i tvrdoću i predstavljaju nosivi element kompozita, osiguravaju visoku otpornost na habanje i otpornost na ostale radne uslove u eksploataciji. Podela kompozita najčešće je u odnosu na vrstu materijala matrice¹⁶ i oblik ojačivača. U odnosu na oblik ojačivača kompoziti mogu biti: kompoziti ojačani sa česticama (disperzne čestice; velike čestice); kompoziti ojačani sa vlaknima (viskeri¹⁷; vlakna¹⁸; žice¹⁹) i slojeviti kompoziti (laminati²⁰; sendvič konstrukcije²¹).

¹⁰ epoksidna smola ojačana ugljeničnim, aramidnim ili staklenim vlaknima za različite konstrukcije

¹¹ konstrukcioni delovi opreme: polimerna osnova/ keramički ojačivač

¹² epoksidna smola ojačana sa ugljeničnim vlaknima za krila aviona, kacige

¹³ delovi brodova, sportska oprema: epoksidna smola/ugljenična vlakna; epoksidna smola/bazaltrna vlakna

¹⁴ poliamid/montmorilonit nanokompozit namenjen za poklopac motora i zupčastog kaiša i branika; kompozit sa osnovom od legura Al; Mg; Ti / ojačivači TiC; Al₂O₃; SiC; za osovine, kočione diskove

¹⁵ fenolna smola ojačana aramidnim vlaknima (šlemovi, oklop vozila i brodova)

¹⁶ Podela kompozita u odnosu na material osnove kompozita je: kompoziti sa metalnom matricom – MMC; kompoziti sa keramičkom matricom – CMC; kompoziti sa polimernom matricom – PMC [220].

¹⁷ viskeri su sitni monokristali, pravilne kristalne građe, izuzetno velike čvrstoće; teško se ugrađuju u matricu; ne primenjuju se često zbog visoke cene.

¹⁸ vlakna su polikristalna ili amorfna, imaju male dimenzije; materijal vlakna može da bude: staklo, polimeri, keramički aramid, ugljenik, bor, aluminijum-oksidi, silicijum-karbid.

¹⁹ žice se najčešće izrađuju od čelika, molibdena, volframa; velike su dužine, primenjuju se pri ojačavanju- armiranju automobilskih guma, namotavanju, ojačavanju košuljica, cevi pod pritiskom.

²⁰ laminat je jednosmerni slojeviti kompozit- plastični slojeviti kompaund proizveden međusobnim vezivanjem tankih ploča ojačanih vlaknima od kojih sve imaju neprekidna vlakna u istom smeru

²¹ sendvič konstrukcije se izrađuju oblaganjem (platiranjem) materijala jezgra sa dva tanka spoljna sloja; obično se upotrebljavaju u tehničkim konstrukcijama; mogu biti sačaste sendvične i platirane sendvične konstrukcije; većina saća se radi od legura aluminijuma ili polimera ojačanim staklenim ili aramidnim vlaknima

Svojstva kompozita ojačanih česticama zavise od oblika i veličine čestica, zapreminskog udela i razmaka između čestica. Čestice veličine 10 do 250 μm , koriste se u uslovima gde se ne zahteva posebno izražena čvrstoća kompozita. Kompoziti sa disperznim česticama, veličine ispod 10 μm poseduju dobra svojstva otpornosti na deformacije, s obzirom da disperzne mikronske čestice (Al_2O_3 , SiC , TiC) blokiraju kretanje dislokacija i na taj način ojačavaju kompozit.

Posebna grupa su nanokompozitni materijali visokih svojstava sa veličinama čestica ojačivača do 100 nm (polimerna osnova/ojačivač SiO_2 , primena u automobilske industriji, medicini).

Ojačavanje kompozita sa vlaknima je usled ugradnje čvrstih i krutih vlakana u mekaniju, duktilnu osnovu. Ojačavanje se postiže prenosom napona sa osnove na vlakna čime se postiže duktilnost i žilavost kompozita. Važne karakteristike vlakana su visoka toplotna otpornost i kontrolisana dimenziona stabilnost pri povišenim temperaturama, visok modul elastičnosti. Koriste se diskontinualna i kontinualna vlakna [207, 220].

U odnosu na materijal osnove funkcija vlakana je povećanje čvrstoće i krutosti (kod PMC); siguran rad pri visokim temperaturama, povećanje žilavosti i sprečavanje krtog loma (kod CMC); siguran rad pri visokim temperaturama, sprečavanje žilavog loma (kod MMC) [111, 186-188, 221-225].

Dve najznačajnije osnove za PMC ojačane vlaknima su nezasićene poliestarske smole i epoksidne smole. Poliestarske smole se lako sintetizuju, imaju nižu cenu, ali obično nisu jake kao epoksidne smole. Kompoziti sa osnovom od poliestarske smole se primenjuju za izradu trupova čamaca, građevinskih ploča, delova za automobile, avione, elektrouređaje u domaćinstvu [186-188, 226-235]. Epoksidne smole imaju višu cenu, ali imaju i posebne prednosti kao što su dobra svojstva čvrstoće, manje skupljanje posle očvršćavanja u odnosu na poliestarske smole. Epoksidne smole se obično upotrebljavaju kao materijali osnove sa ugljeničnim i aramidnim vlaknima. PMC se koriste za izradu konstrukcija od kojih se zahteva da budu čvrste, krute, lagane i koroziorno postoje. Pretežno zamenjuju kompozite na bazi legura aluminijuma i magnezijuma.

Ojačavanje vlaknima postižu se najviše vrednosti čvrstoće i modula elastičnosti. Pokazalo se da su specifična čvrstoća (odnos čvrstoće i gustine) i specifična krutost (odnos modula elastičnosti i gustine) ovih kompozita viši od metalnih materijala.

Za ojačavanje polimera često se koriste i prirodna vlakna, koja su ekološki čiste sirovine (vlakna iz drveta, kaktusa, lan, juta i sl.), čime se postiže veća ekonomičnost proizvodnje,

veća mogućnost njihovog recikliranja i manje zagađenje u proizvodnji, u odnosu na staklena vlakna [226-229].

Postupci proizvodnje polimernih kompozita su raznovrsni: ručno i mehaničko oblikovanje u kalupu prskanjem; postupak sa fleksibilnom vrećom i autoklavom; postupak namotavanja filamenata; postupak oblikovanja u zatvorenom kalupu; kontinuirani postupak izvlačenja i drugi [220]. Nedostaci PMC su niska čvrstoća i pad mehaničkih svojstava pri visokim temperaturama [230-232].

Znatno veće radne temperature pružaju se primenom MMC, sa povišenom dimenzionalnom stabilnošću, visokim svojstvima čvrstoće, krutosti, toplotne provodljivosti, otpornosti na habanje, puzanje, koroziju, nezapaljivi su. Osnova je češće legura nego čist metal, ojačivači su na bazi ugljeničnih, metalnih ili keramičkih vlakana. Postupci izrade MMC: livenje mešanjem; livenje u polu-očvrslom stanju; livenje pod pritiskom; infiltracija čestica pod pritiskom; u vakuumu; neparavanje i druge tehnologije metalurgije praha [188, 231, 232]. Kao nedostatak MMC je relativno visoka gustina, složenost proizvodnog procesa dobijanja, mala mogućnost recikliranja.

CMC su tvrdi kruti materijali, otporni na visoke temperature, koroziju. Sklonost krutosti keramike umanjuje se optimalnim izborom keramičke osnove i ojačivača, najčešće na bazi vlakana, čestica, viskera od druge vrste keramike. Postupci izrade CMC: CVD postupak, CVI postupak, usmerena oksidacija metala i drugi [231, 232].

Iz pregleda literature o rezultatima izrade kompozitnih materijala sa polimernom osnovom i ojačivačem na bazi mikronskih čestica bazalta [187, 188] vidi se povećanje svojstava dobijenih kompozita i proširenje njihove primene u građevinarstvu, mašinstvu. Iz podataka iznetih u radovima [231-236] vidi se da primena ojačivača u vidu nano čestica (nano alumina, nano gline, silicijum-oksida i drugo) doprinosi postizanju boljeg ojačavanja polimera i postizanju većeg kvaliteta kompozita. Primena ojačivača nano dimenzija omogućava ugradnju veće količine punioca u polimernu osnovu bez narušavanja mehaničkih svojstava osnove. Istraživanja kompozita polimerna osnova/bazaltne prah ima prednosti s obzirom da je bazalt jeftina i čista sirovina koja se može upotrebiti bez procesa prečišćavanja. Ovi kompoziti mogu potencijalno da se upotrebe u građevinarstvu i industriji. Važnost primene ojačivača na bazi bazalta vidi se i iz podataka da bazaltno vlakno može da supstituiše staklena i azbestna vlakna [186-188, 231].

3. Eksperimentalni deo

3.1. Metodologija eksperimentalnog rada

Predmet ove disertacije je istraživanje nastajanja i razvoja oštećenja vatrostalnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije u cilju procene mogućnosti njihove primene kao konstrukcionih elemenata opreme u metalurgiji i rudarstvu. Bazalt je jeftina, široko rasprostranjena i lako dostupna sirovina. Za istraživanje je izabran jer poseduje dobre tehničke karakteristike koje ga čine važnom sirovinom za primenu u uslovima habanja, korozije, visokih temperatura [164-169, 174-176].

U prvoj fazi istraživanja urađena je sinteza i karakterizacija vatrostalnih uzoraka na bazi bazalta: rovni bazalt (oznaka serije: RB); liveni bazalt (oznaka serije: LB) i sinterovani bazalt (oznaka serije: SB). Uzorci su ispitani na dejstvo kavitacije primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom (standard ASTM G32) [1, 15, 58, 59].

Kao polazna sirovina za sintezu uzoraka za ispitivanje korišćen je olivin-piroksenski bazalt iz ležišta Vrelo–Kopaonik. U pripremi polaznih komponenti primenjeni su procesi drobljenja, mlevenja i mehaničke aktivacije. Praćen je uticaj ovih procesa na strukturu dobijenih vatrostalnih uzoraka i svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije.

Uzorci rovnog bazalta, dimenzija (15×15×15) mm isecani su iz selektovanih stena bazalta iz ležišta Vrelo–Kopaonik. Uzorci livenog bazalta dobijeni su procesima topljenja drobljenih stena bazalta, livenja i termičkog tretmana ispitnih livenih ploča iz kojih su isecani uzorci dimenzija (15×15×15) mm za dalja ispitivanja. Uzorci sinterovanog bazalta dobijeni su presovanjem praha bazalta veličine zrna 20 μm u kalupu dimenzija (15×15×100) mm pod pritiskom 1 MPa. Proces sinterovanja ispresovanih uzoraka urađen je na 1150°C po unapred određenom režimu sinterovanja. Iz sinterovanih ploča isecani su uzorci za dalja ispitivanja dimenzija (15×15×15) mm.

Na osnovu rezultata ispitivanja strukture i svojstava vatrostalnih uzoraka RB, LB, SB, posebno rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije predložena je optimizacija procesa sinteze u cilju dobijanja poboljšane strukture i svojstava ispitivanih uzoraka. Primenom ultrazvučne vibracione metode prema standardu ASTM G32 uzorci su, pod istim uslovima, bili podvrgnuti ispitivanjima pri čemu je praćena promena mase uzoraka u funkciji vremena delovanja kavitacije. Određene su kavitacione brzine i stepen oštećenja površine ispitivanih uzoraka. U cilju praćenja promena nastalih pod dejstvom kavitacije snimane su površine uzoraka pre i tokom izlaganja dejstvu kavitacije. Morfologija oštećenih površina analizirana je skenirajućim elektronskim mikroskopom. Na osnovu vrednosti kavitacionih

brzina i detaljnom analizom promena površine uzoraka utvrđen je mehanizam oštećenja pod dejstvom kavitacije. Takođe, urađena je softverska analiza slike površine uzoraka u programu Image Pro Plus [61, 62]. Pri tome praćeni su sledeći pokazatelji oštećenja površine tokom vremena delovanja procesa kavitacije: nivo degradacije površine uzoraka, P/P_0 , %, (pri čemu vrednost P_0 se odnosi na referentnu površinu bez pojave oštećenja, a vrednost P predstavlja oštećenja na površini uzorka nastala tokom testiranja), broj formiranih pojedinačnih jamica, N_p , srednja površina formiranih jamica, P_{av} (mm^2), kao i praćenje pojava formiranja novih jamica, njihov rast i/ili njihovo međusobno spajanje. Posebna pažnja posvećena je praćenju promena površine uzoraka u ranom periodu dejstva kavitacije na osnovu kojih može da se prognozira dalji tok oštećenja materijala i da se proceni mogućnost primene za date uslove eksploatacije. S obzirom da su ispitivanja svih uzoraka (rovnog, livenog i sinterovanog uzorka na bazi bazalta) sprovedena pod istim uslovima bilo je moguće porediti njihovo ponašanje pod dejstvom kavitacije u cilju izbora pogodnog materijala za primenu u određenim uslovima eksploatacije, pri dejstvu većih ili manjih kavitacionih opterećenja.

Takođe, istraživani su uzorci Lost foam vatrostralnih premaza na bazi bazalta (oznaka serije: LFPB), mulita (oznaka serije (LFPM), kordijerita (oznaka serije: LFPK), cirkonijum-silikata (oznaka serije (LFPCS) i talka (oznaka serije: LFPT) za primenu u novim tehnologijama livenja, kao i uzorci zaštitnih premaza na bazi bazalta za zaštitu metalnih (PP) i nemetalnih površina (PS). Premaz na bazi bazalta predstavlja novinu i do sada se nije koristio u livarstvu. Zato su, u cilju ocene kvaliteta dobijenih Lost foam premaza na bazi bazalta, uporedo ispitivani i premazi na bazi mulita, kordijerita, talka i cirkonijum-silikata, koji se istražuju i primenjuju u livnicama za pešćane kalupe i jezgra [110, 119, 121, 237, 238]. Pri tome posebna pažnja bila je posvećena pripremi vatrostralnih punioca procesima mlevenja i mehaničke aktivacije i dobijanju punioca određene veličine i oblika zrna. To je omogućilo sintezu premaza visokih reoloških svojstava i njihovu primenu u novim tehnologijama livenja, kao što je prikazano u radovima [239, 240]. Zahtev za razvoj novih tehnologija livenja (Lost foam proces livenja, livenje sa topivim modelima) je dizajniranje visokopropustljivih vatrostralnih premaza sa unapred zadatim svojstvima, homogenih i ujednačenih slojeva na površini modela i/ili kalupa. Vatrostalni premazi tokom procesa livenja, očvršćavanja i formiranja odlivaka stvaraju zaštitni vatrostalni sloj između zida pešćanog kalupa, polimernog modela i struje tečnog metala i na taj način doprinose dobijanju odlivaka visokog kvaliteta [118, 193, 210-214, 241- 244]. Takođe, slojevi Lost foam premaza treba da imaju visoku propustljivost za gasove stvorene razlaganjem polimernih modela. U suprotnom, gasovi bi ostali u kalupu i nakon očvršćavanja stvorili bi veliku poroznost u

odlivcima. Tehnološka svojstva livačkih premaza ispitivana su u skladu sa standardima za ovu vrstu vatrostalnih proizvoda [110, 111, 158, 159, 245]. U cilju proučavanja mogućnosti primene istraživanih zaštitnih vatrostalnih premaza na bazi bazalta, ispitana je njihova otpornost na dejstvo kavitacije. Dobijeni rezultati omogućili su procenu ponašanja zaštitnih vatrostalnih premaza u uslovima kavitacionih opterećenja, proučavanje nastajanja i razvoja oštećenja na površini premaza, procenu rizika nastajanja defekata na površini ispod premaza [242]. Detaljnom analizom promena površine uzoraka premaza utvrđen je mehanizam oštećenja pod dejstvom kavitacije, pre svega praćene su promene u ranom periodu dejstva kavitacije na osnovu kojih može da se prognozira dalji tok oštećenja materijala i da se proceni mogućnost primene za date uslove eksploatacije. Primena ultrazvučne vibracione metode za ocenu kvaliteta zaštitnih vatrostalnih premaza, omogućiće brži izbor različitih vatrostalnih materijala za sintezu premaza, procenu njihove efikasnosti u zaštiti metalnih i nemetalnih površina, kao i njihovog veka trajanja u sličnim eksploatacionim uslovima. Dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima iz predmetne literature [54, 218, 219].

U disertaciji je istražena mogućnost primene bazalnog praha, veličine zrna 40 μm kao ojačivača kompozita sa polimernom osnovom. Istražen je postupak sinteze kompozita i određen je optimalni sastav. Za kompozite sa različitim udelima ojačivača na bazi bazalnog praha određena su mehanička svojstva (tvrdoća, zatezna čvrstoća, čvrstoća na savijanje) i otpornost na dejstvo kavitacije. Oznake serija ispitivanih kompozita prema sadržaju punioca na bazi bazalnog praha (g): K₁ (0,15); K₂ (0,30); K₃ (0,45); K₄ (0,50); oznaka osnove kompozita na bazi nezasićene poliestarske smole (100 % poliestarska smola): S. Za praćenje i utvrđivanje efekata oštećenja površine uzoraka istraživanih kompozita (NPS/B) pod dejstvom kavitacije primenjene su nedestruktivne metode ispitivanja: mikrostrukturna analiza i softverska analiza slike.

Rezultatima istraživanja u ovoj disertaciji stvorena je osnova za proširenje komercijalne primene vatrostalnih uzoraka na bazi bazalta u oblasti izrade delova opreme za rad u metalurgiji i rudarstvu. Jednaki uslovi ispitivanja uzoraka primenom ultrazvučne vibracione metode, omogućili su, da se dobijeni rezultati ispitivanja međusobno porede i da se izvrši selekcija materijala u odnosu na izračunate vrednosti kavitacionih brzina. Kavitacione brzine, koje predstavljaju pokazatelj otpornosti materijala u uslovima kavitacionih opterećenja, prema standardu ASTM G32 izračunate su kao ukupan gubitak mase uzoraka podeljen sa vremenom ispitivanja. Izučene su složene pojave nastajanja i razvoja razaranja materijala pod dejstvom kavitacije, pri kolapsu kavitacionog mehura, formiranju udarnih talasa i mikro-

mlaza, koji udarom na čvrstu površinu materijala, prouzrokuju zamor i oštećenja u lokalnim mikro zapreminama, a posledica toga je gubitak mase materijala. Sprovedena istraživanja dejstva kavitacije na vatrostralnim materijalima primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom (standard ASTM G32), doprinela su sagledavanju odnosa strukture i svojstava vatrostralnih materijala, s jedne strane i pojave razaranja materijala tokom procesa kavitacije, sa druge strane. Praćeno je nastajanje i razvoj oštećenja površine uzoraka pod dejstvom kavitacije (analiza morfologije oštećenja površine uzoraka) i intenziteta razaranja pod dejstvom kavitacije (bazirano na merenju gubitka mase uzoraka u određenom vremenu izlaganja dejstvu kavitacije).

Dobijeni eksperimentalni podaci poslužiće za prognozu otpornosti na dejstvo kavitacije ispitivanih vatrostralnih materijala u uslovima gde je prisutno dejstvo visokih temperatura, habanja, kavitacije. U ovakvim eksploatacionim uslovima često je prisutno i dejstvo korozije. S obzirom da vatrostralni materijali na bazi bazalta poseduju povećanu otpornost na dejstvo korozije, to predstavlja njihovu prednost u odnosu na metalne materijale, koji su često podložni oštećenjima dejstvom korozione sredine.

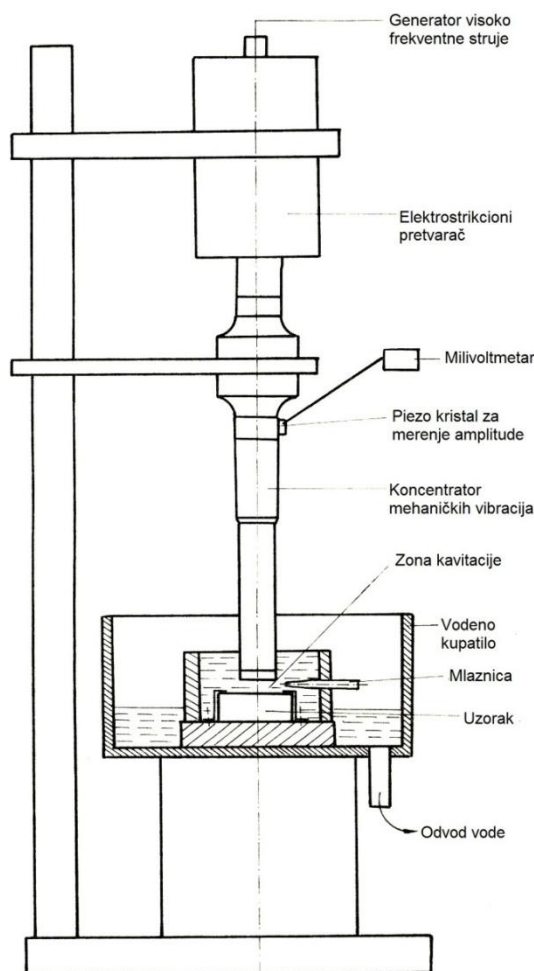
Eksperimentalna ispitivanja urađena su u laboratorijama Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina–Beograd, Geozavoda–Beograd i na Tehnološko–metalurškom fakultetu, Univerziteta u Beogradu.

3.2. Eksperimentalne metode karakterizacije materijala

3.2.1. Destruktivne metode karakterizacije

3.2.1.1. Ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije

Za određivanje otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka serija: RB; LB; SB; PP; PS; NPS/B primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda (sa stacionarnim uzorkom) prema standardu ASTM G32, slika 3.1 [243].



Slika 3.1. Šema aparature za ultrazvučnu vibracionu metodu sa stacionatnim uzorkom [243].

Ultrazvučna vibraciona metoda je bazirana na stvaranju i imploziji kavitacionih mehura na površini uzorka i merenju gubitka mase uzorka u toku vremena izlaganja dejstvu kavitacije. Standard ASTM G32 definiše uslove i proces ispitivanja, pripremanje uzoraka i interpretaciju rezultata [58].

Prema ovom standardu postoje dve mogućnosti ako se u obzir uzme položaj uzorka prilikom ispitivanja: ultrazvučna metoda sa vibracionim uzorkom (direktna metoda ispitivanja kavitacije) i ultrazvučna metoda sa stacionarnim uzorkom (indirektna metoda ispitivanja

kavitacije). U prvoj metodi uzorak je na vrhu koncentratora mehaničkih vibracija postavljen pomoću navoja. Metoda ispitivanja sa stacionarnim uzorkom se koristi za kavitaciono ispitivanje kada se ispituju tvrdi i kruti materijali na kojima se ne može narezivati navoj. U ovom slučaju, uzorak je fiksiran držačima koji se nalaze na dnu vodenog kupatila. Uzorci na bazi bazalta su tvrdi i kruti, kod njih se ne može lako narezivati navoj i ispituju se pomoću metode sa stacionarnim uzorkom [1, 58].

Tokom ispitivanja napajanje električnom energijom vrši se preko generatora visokofrekventne struje izlazne snage 360 W, koji generiše struju čija je frekvenca 20-50 kHz i koja se održava konstantnom tokom ispitivanja. Strujom visoke frekvencije vrši se napajanje elektrostrikcionog pretvarača–konvertora u kome se preko piezo–električnog elementa (cirkonijum–titanat) struja visoke frekvencije pretvara u mehaničke vibracije. Amplituda ovih vibracija se pomoću koncentratora, kruto vezanog za pretvarač povećava u odnosu 1:8. Koncentrator mehaničkih vibracija prečnika \varnothing 16 mm, svojim donjim krajem uronjen je u vodeno kupatilo [243].

Uzorak koji se ispituje se postavlja ispod čeone površine koncentratora vibracija sa zazorom. Ispod čeone površine koncentratora i stacionarnog ispitivanog uzorka, obrazuje se jaka kavitaciona zona. Voda u vodenom kupatilu hladi uzorak i održava njegovu temperaturu konstantnom. Stalnim protokom vode stvara se polje pritiska koje podstiče imploziju kavitacionih mehura na površini ispitivanog uzorka [1, 58].

Imajući u vidu da stepen razaranja materijala zavisi od tipa i karakteristika uređaja za ispitivanje procesa kavitacije posebna pažnja posvećena je izboru karakterističnih parametara ove metode, kao što su veličina amplitude, zazor između uzorka i čeone površine koncentratora, brzine protoka vode, temperature vode u vodenom kupatilu. Izbor karakterističnih parametara za ispitivanje izvršen je u skladu sa standardom [58], predhodnim iskustvima ispitivanja [1, 15, 120, 135, 153, 160] i literaturnim podacima ispitivanja metalnih i nemetalnih materijala [11, 18, 28, 29, 48-53]:

- Frekvencija mehaničkih vibracija 20 ± 0.2 kHz;
- Amplituda mehaničkih vibracija na vrhu koncentratora 50 ± 2 μ m;
- Zazor između probnog uzorka i koncentratora 0.5 mm;
- Protok vode 5–10 ml/s;
- Temperatura vode u kupatilu 25 ± 1 °C.

Navedeni parametri su kontrolisani i održavani na zadatom nivou tokom procesa ispitivanja. Interval izlaganja uzorka i ukupno vreme ispitivanja bili su prilagođeni ponašanju uzoraka u toku eksperimenata.

Vreme ispitivanja:

- uzorci RB, LB, SB (min): 15; 30; 60; 120;
- uzorci zaštitnih vatrostalnih premaza PP i PS (min): 15; 30; 45; 60;
- uzorci kompozita (NPS/B) (min): 15; 30; 45; 60.

Posle svakog intervala ispitivanja uzorci su sušeni na 110°C jedan sat do konstantne mase, a zatim je vršeno merenje mase uzoraka korišćenjem analitičke vage sa preciznošću od $\pm 0,1$ mg. Merenje je vršeno pojedinačno po svakom uzorku nakon svih intervala ispitivanja dejstva kavitacije, za ukupno vreme testiranja od 120 min za RB, LB, SB, odnosno 60 min za uzorke vatrostalnih premaza i kompozita. Rezultati oštećenja su prikazani na dijagramu gubitka mase tako što se na ordinatu nanose vrednosti gubitka mase, dok se na apscisu unose vrednosti za vreme izlaganja materijala dejstvu kavitacije. Metodom najmanjih kvadrata tačke dijagrama aproksimirane su pravom linijom čiji tangens nagiba pokazuje gubitak mase u periodu vremena delovanja kavitacije, što predstavlja brzinu kavitacione erozije²². Tačka na kojoj linearna kriva seče apscisu pokazuje inkubacioni period, tj. vreme koje protekne do nastanka oštećenja materijala [243]. Za svaku seriju ispitivanih uzoraka korišćeno je po tri uzorka i rezultati predstavljaju srednju vrednost ovih merenja za svaki interval ispitivanja.

To predstavlja kvantitativno merenje intenziteta razaranja materijala pod dejstvom kavitacije. Za svaku seriju ispitivanih uzoraka korišćeno je po tri uzorka i rezultati predstavljaju srednju vrednost ovih merenja za svaki interval ispitivanja. Oštećenje površine uzoraka dejstvom kavitacije praćeno je primenom nedestruktivne metode karakterizacije: analizom slike.

Morfologija oštećenja površine uzoraka analizirana je skenirajućim elektronskim mikroskopom. Posebna pažnja posvećena je vizuelnom ispitivanju površine uzoraka korišćenjem lupe u cilju identifikacije površinskih oštećenja. Na osnovu analize i tumačenja ponašanja vatrostalnih materijala tokom vremena izloženosti dejstvu kavitacije vršena je ocena postojanosti i otpornosti ispitivanih uzoraka na date uslove ispitivanja.

Na osnovu vrednosti kavitacione brzine i analize morfologije oštećenja površine uzoraka tumačeno je ponašanje vatrostalnih materijala tokom vremena izloženosti dejstvu kavitacije, vršena je ocena postojanosti i otpornosti ispitivanih uzoraka na date uslove ispitivanja. Ocena ponašanja ispitivanih vatrostalnih uzoraka na dejstvo kavitacije analizirana je na osnovu korelacije ovih rezultata ispitivanja sa strukturom i svojstvima materijala, pre svega tvrdoćom.

²² Prema standardu ASTM G32 kavitaciona brzina se računa kao ukupan gubitak mase podeljen sa vremenom ispitivanja [58].

Na osnovu dobijenih rezultata izvršena je procena otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka na bazi bazalta serija: RB; LB; SB; PP; PS; NPS/B i relativno poređenje u smislu njihove otpornosti na oštećenja usled kavitacije u protoku fluida, kao što je voda sa česme. Praćene su promene na uzorcima u početnom periodu dejstva kavitacije (inkubacioni period, kada još nije došlo do masovnog gubitka materijala, a materijal prolazi samo elastično/plastičnu degradaciju površine) i tokom razvijanja procesa kavitacije.

3.2.1.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita poliestarska smola/bazalni prah

Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita poliestarska smola/bazalni prah i uzoraka poliestarske smole kao osnove kompozita (100% nezasićena poliestarska smola) urađeno je na uzorcima u obliku epruveta standardnih dimenzija za ispitivanje zatezne i savojne čvrstoće. Testirana su po tri uzorka od svakog kompozita i poliestarske smole a rezultati ispitivanja predstavljaju prosečne vrednosti merenja. Ispitivanje zatezanjem urađeno je na uređaju za ispitivanje zatezanjem prema standardnoj metodi ASTM D882. Svi testovi su izvedeni na sobnoj temperaturi brzinom istezanja 0,5 mm/min. Savojna čvrstoća određena je savijanjem uzoraka u tri tačke na Instron 1332 mašini brzinom 1,5 mm/min, prema standardnoj metodi ASTM D 790-15e2. Tvrdoća uzoraka svih serija kompozita i nezasićene poliestarske smole kao osnove kompozita ispitivana je po Šor analizi na instrumentu za merenje Zorn Stendal DDR. Prosečna vrednost tvrdoće uzoraka izračunata je kao srednja vrednost tvrdoće dobijene iz tri ubodna mesta. Merenja je vršeno na sobnoj temperaturi.

3.2.1.3. Ispitivanje kvaliteta Lost foam vatrostralnih premaza na bazi bazalta

Premazi su ispitivani u skladu sa standardima za ovu vrstu vatrostralnih proizvoda nanošenjem premaza na površine vatrostralnih uzoraka za ispitivanje (ispitna tela) izrađenih od kaluparske mešavine [158, 159]. Važna karakteristika premaza je sedimentaciona stabilnost suspenzije premaza. Prema standardu [158], sedimentaciona stabilnost suspenzija premaza ispitivana je odstožavanjem pripremljenih uzoraka premaza 24 h u cilindričnom sudu zapremine $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ i visine $2.8 \times 10^{-1} \text{ m}$. Rezultati ispitivanja izražavani su u procentima, tako, što je broj očitanih mililitara providnog sloja jednak taloženju u procentima.

Određivanje penetracije premaza ispitivano je korišćenjem epruveta izrađenih od kaluparske mešavine koje su nakon nanošenja premaza i sušenja polomljene i na prelomu je izmerena dubina penetracije premaza u milimetrima, shodno standardu [158].

3.2.1.4. Ispitivanje kvaliteta zaštitnih vatostalnih premaza na bazi bazalta

Zaštitni vatostalni premazi na bazi bazalta ispitivani su primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom prema standardu ASTM G 32 [58]. Određivana je otpornost na dejstvo kavitacije uzoraka premaza nanetih u dva sloja na pripremljenu metalnu i polimernu površinu podloge. Vreme izlaganja dejstvu kavitacije (min): 15; 30; 45; 60.

3.2.2. Nedestruktivne metode karakterizacije

Za karakterizaciju ispitivanih vatostalnih uzoraka na bazi bazalta svih serija korišćene su sledeće metode:

- rendgenska difrakciona analiza,
- kvalitativna mineraloška analiza,
- skenirajuća elektronska mikroskopija.

Za praćenje i utvrđivanje efekata oštećenja površine uzoraka usled dejstva kavitacije primenjena je savremena kompjuterska metoda za analizu slike Image Pro Plus [61].

Analiza oblika i veličine zrna punioca za vatostalne premaze urađena je pomoću programskog paketa OZARIA 2.5 [244].

3.2.2.1. Rendgenska difrakciona analiza

Rendgenska difrakciona analiza korišćena je za određivanje i praćenje faznog sastava rovnog, livenog i sinterovanog uzorka. Uzorci su analizirani na rendgenskom difraktometru marke “PHILIPS”, model PW-1710 (proizvođač Philips Analytical, Almelo, The Netherlands), sa zakrivljenim grafitnim monohromatorom i scintilacionim brojačem. Inteziteti difraktovanog $\text{CuK}\alpha$ rendgenskog zračenja ($\lambda=1.54178\text{\AA}$) mereni su na sobnoj temperaturi u intervalima $0.02^\circ 2\theta$ i vremenu od 0,25 s, a u opsegu od 4° do $65^\circ 2\theta$. Rendgenska cev je bila opterećena sa naponom od 40 kV i strujom 30 mA, dok su prorezi za usmeravanje primarnog i difraktovanog snopa bili 1° i 0.1 mm. Svi uzorci su ispitivani metodom rendgenske difrakcije na polikristalnom uzorku (prahu) [245-247].

3.2.2.2. Kvalitativna mineraloška analiza

Kvalitativna mineraloška analize uzoraka bazalta urađena je pod polarizacionim mikroskopom za odbijenu i propuštenu svetlost, model JENAPOL-U sa uvećanjem objektivna

10×, 20×, 50×, 100× firme Carl Zeiss–Jena. Za kvalitativnu identifikaciju prisutnih minerala korišćena je imerziona metoda (imerzija ksilol). Sistem za mikrofotografiju "Axiocam 105 color" camera i "Carl Zeiss Axio Vision SE64 Rel. 4.0.1," softverski paket sa "Multiphase" modulom.

Merenje veličine i faktora obilika zrna vatrostalnih punioca na bazi bazalta urađeno je na 3500-4000 zrna. Analiza oblika i veličine zrna je urađena pomoću programskog paketa OZARIA 2.5 [244] za interval od 0 – 1, gde se faktor oblika određuje na sledeći način: za 0 - presek odgovara obliku igle, za 1 - presek odgovara krugu, dok je veličina zrna data u mikrometrima (μm). Podela prema faktoru oblika zrna je: od 0,0-0,2 – uglast; od 0,2-0,4 – subuglast; od 0,4-0,6 – subzaobljen; od 0,6-0,8 zaobljen i od 0,8-1,0 – dobro zaobljen oblik zrna. Pri snimanju je korišćen sistem za mikrofotografiju Studio PCTV (Pinnacle Systems).

3.2.2.3. Skenirajuća elektronska mikroskopija

Morfološka i kvantitativna hemijska analiza uzoraka urađena je na skenirajućem elektronskom mikroskopu marke "JEOL" model JSM 6610 LV (JEOL, Tokyo, Japan). Skenirajuća elektronska mikroskopija je metoda kod koje snop elektrona visoke energije interaguje sa površinom uzorka, krećući se duž međusobno vrlo bliskih linija. Pri tome dolazi do sekundarne emisije elektrona i rendgenskog zračenja. Kod skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM) osnovne informacije su morfološke, a takođe mogu se dobiti informacije o elementarnom hemijskom sastavu (EDS analiza– zasniva se na karakterističnim ekscitacijama talasnih dužina elemenata koji se nalaze unutar datog uzorka). SEM pruža značajne prednosti u odnosu na konvencionalne tehnike i karakteriše ga relativno laka priprema uzoraka i mogućnost neposrednog posmatranja strukture uzorka u tri dimenzije [113, 245- 247]. Za analizu skenirajućim elektronskim mikroskopom neophodno je da uzorak bude električno provodljiv, odnosno da se ostvari interakcija između površine uzorka i snopa elektrona. Pošto uzorci bazalta nisu provodnici pre snimanja su neparavani zlatom. Praćena je promena mikrostrukture površine uzoraka tokom ispitivanja pod dejstvom kavitacije, a posebno nastajanje i razvoj kavitacionih oštećenja površine pod različitim uvećanjima (30×, 100×, 500×, 1000×, 2000×) i različitim vremenima ispitivanja (min): 15; 30; 60; 120, kod uzoraka rovnog, livenog i sinterovanog bazalta, odnosno, vremenima (min); 15; 30; 45; 60, kod uzoraka zaštitnih premaza na bazi bazalta i kompozita polimerna osnova/bazalt.

3.2.2.4. Analiza slike

Za praćenje nivoa oštećenja površine uzoraka usled dejstva kavitacije korišćena je savremena kompjuterska metoda za analizu slike Image Pro Plus (The Proven Solution for Image Analysis, Media Cybernetics: Rockville, MD, USA, 1993) [61]. Primena ove nedestruktivne metode karakterizacije za praćenje nastajanja i razvoja oštećenja površine uzoraka tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije, omogućila je dobijanje rezultata procene otpornosti materijala u veoma kratkom vremenskom periodu [60, 62]. Analizi slike su podvrgnute makroskopske fotografije površine uzoraka snimljene u različitim vremenima dejstva kavitacije. Program je direktno povezan sa Excelom, što omogućava statističku i kvantitativnu obradu i prikazivanje dobijenih podataka.

Na osnovu ranijih istraživanja primene kompjuterske analize slike za praćenje nastajanja i razvoja oštećenja površine uzoraka pod dejstvom kavitacije [120, 135, 153, 160], određeni su sledeći pokazatelji oštećenja površine uzoraka na bazi bazalta: nivo degradacije površine uzoraka P/P_0 , %, (pri čemu vrednost P_0 se odnosi na referentnu površinu bez pojave oštećenja, a vrednost P predstavlja oštećenja na površini uzorka nastala tokom ispitivanja); broj formiranih jamica, N_p i srednja površina formiranih jamica, P_{av} , mm^2 . Rezultati oštećenja površine uzorka u vremenu dejstva kavitacije su ilustrovani dijagramima. Ispitivanjima su dobijeni podaci za procenu i prognozu otpornosti na dejstvo kavitacije ispitivanih vatrostalnih materijala na bazi bazalta svih serije. To je značajno jer je utvrđeno koji od ovih vatrostalnih materijala mogu da se primene u uslovima kavitacionih opterećenja.

3.3. Sinteza i karakterizacija vatrostalnih materijala za ispitivanje otpornosti pod dejstvom kavitacije

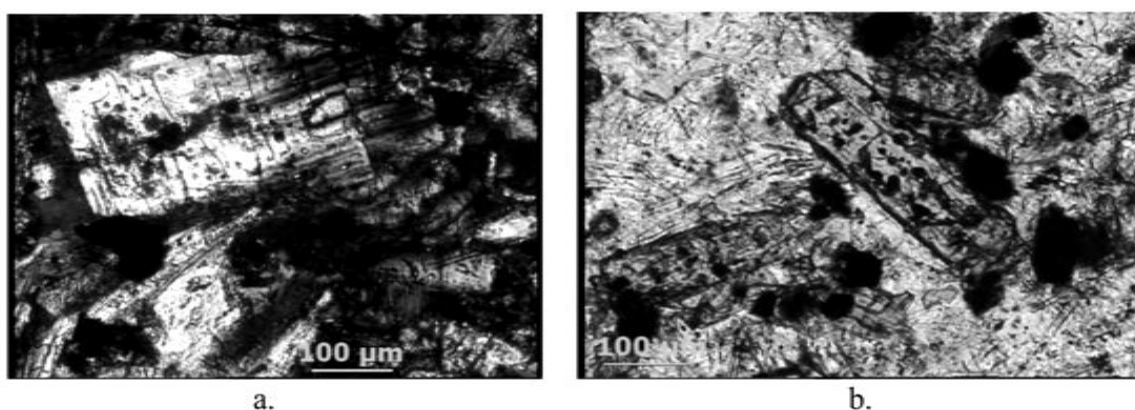
3.3.1. Priprema i karakterizacija uzoraka rovnog bazalta (RB)

Kao polazni materijal za izradu uzoraka za ispitivanje korišćene su bazaltne stene iz ležišta Vrelo–Kopaonik. Uzorci rovnog bazalta (oznaka uzoraka: RB) dimenzija (15×15×15) mm sečeni su iz odabranih kompaktnih stena bazalta. Osnovne karakteristike bazalta koje su uticale na njegov izbor za istraživanje kavitacione otpornosti i procenu mogućnosti primene u inženjerskoj praksi bile su: temperatura topljenja 1300–1400 °C; visoka tvrdoća 6,5–7 po Mohs skali; gustina 2460-2960 kg/m³; visoka zatezna čvrstoća i čvrstoća na pritisak; poroznost manja od 3,78%; visoka otpornost na toplotu, kiseline i alkalije; visoka toplotna provodljivost; nije toksičan [114, 164, 167-169, 174-176]. Hemijski sastav polaznog uzorka bazalta prikazan je u tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Hemijski sastav polaznog uzorka bazalta (RB), (%) [241]

Uzorak	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Rovni bazalt	56.21	18.61	1.15	2.97	3.40	7,78	4.73	3.37	1.11

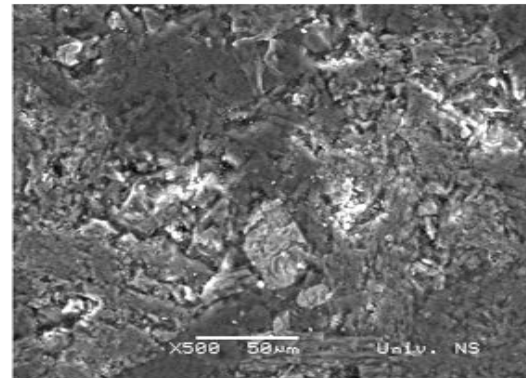
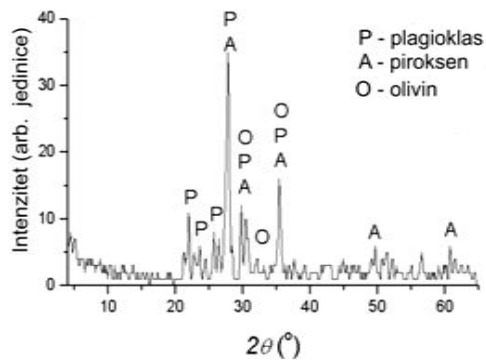
Ispitivanjem petrografskih preparata pod polarizacionim mikroskopom za propuštenu svetlost identifikovani su minerali u sastavu bazaltne stene, slika 3.2.



Slika 3.2. Mikrofotografije strukture olivin-piroksenskog bazalta: a) izduženi fenokristali plagioklasa; b) kristal olivina i izduženi fenokristal rombičnog piroksena. Snimljeno na polarizacionom mikroskopu. Propuštena svetlost, IIN [248].

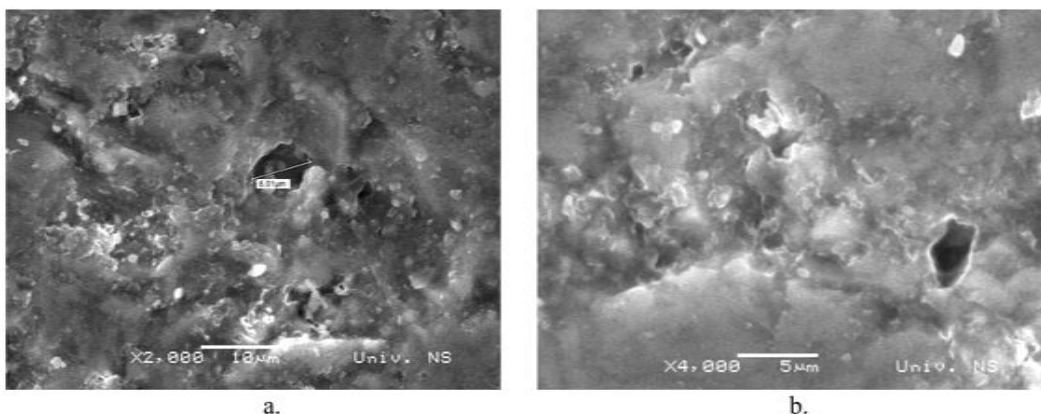
Na slici 3.2.a prikazan je veliki fenokristal plagioklasa. Kristal olivina je uklopljen u osnovnu masu plagioklasa, fenokristali bazičnog piroksena su izduženi, slika 3.2.b.

Na slikama 3.3 i 3.4 prikazan je XRD difraktogram i SEM mikrofotografija uzorka RB. Pokazano je da je mineralni sastav uzorka bazalta sledeći: plagioklasi, pirokseni, olivini, slika 3.3. Bazični plagioklasi su najzastupljeniji minerali u uzorku RB, dok su pirokseni (augit) i olivini manje prisutni.



Slika 3.3. XRD difraktogram uzorka RB [248]. Slika 3.4. SEM mikrofotografija uzorka RB [248].

Na slici 3.4 prikazana je SEM mikrofotografija polaznog uzoraka RB, pre procesa kavitacije. Struktura rovnog bazalta je izgrađena od mikrokristalastog plagioklasa. Od fenokristala utvrđeni su olivini, rombični pirokseni i ređe bazični plagioklasi. Struktura stene bazalta je predstavljena olivin-piroksenskim bazaltom. U strukturi uzoraka RB sadržani su mehuri različitih veličina, koji su ispunjeni vazduhom ili staklom, slika 3.5. Prisutan je veći broj sitnih mehurova koji na površini uzoraka izazivaju hrapavost površine i pojavu jamica.

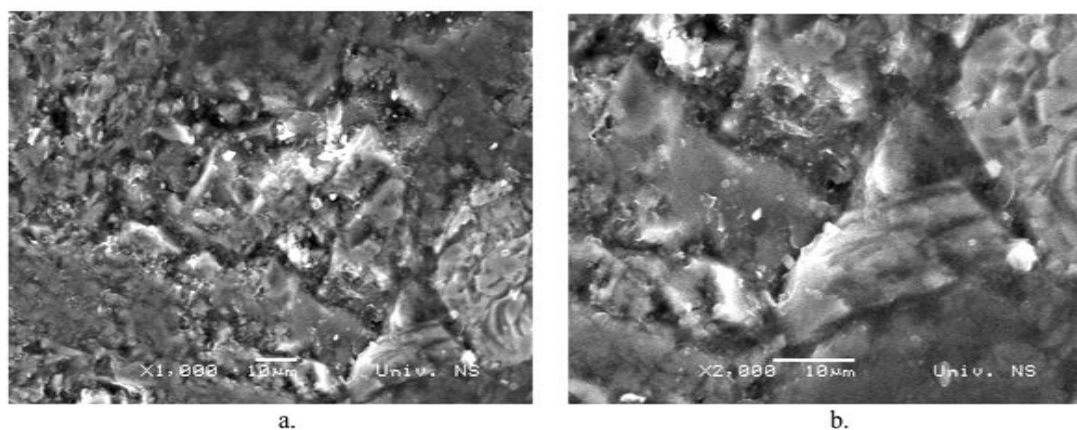


Slika 3.5. Prisutni sitni mehuri u strukturi rovnog bazalta (početno stanje) [248].

Tokom kavitacionog ispitivanja praćena je promena prisutnih mehura sadržanih u osnovi bazalta, kao i prisutnih jamica na površini uzorka. SEM mikrofotografije uzoraka rovnog

bazalta prikazane su na slici 3.6. Struktura je nehomogena, sa jasno izraženim granicama između faza. Vide se sitni mehuri uklopljeni u osnovu bazalta.

Selektovane bazaltne stene su drobljene i mlevene na veličinu zrna 20 μm (za dobijanje punioca za sintezu uzoraka sinterovanog bazalta (uzorci SB) i premaza na bazi bazalta (uzorci: LFPB, PP, PS), kao i veličinu zrna 40 μm za sintezu uzorka kompozita polimerna osnova/ bazalt (uzorci NPS/B).



Slika 3.6. SEM mikrofotografije uzorka RB sa različitim uvećanjima: vide se jasne granice faza [248].

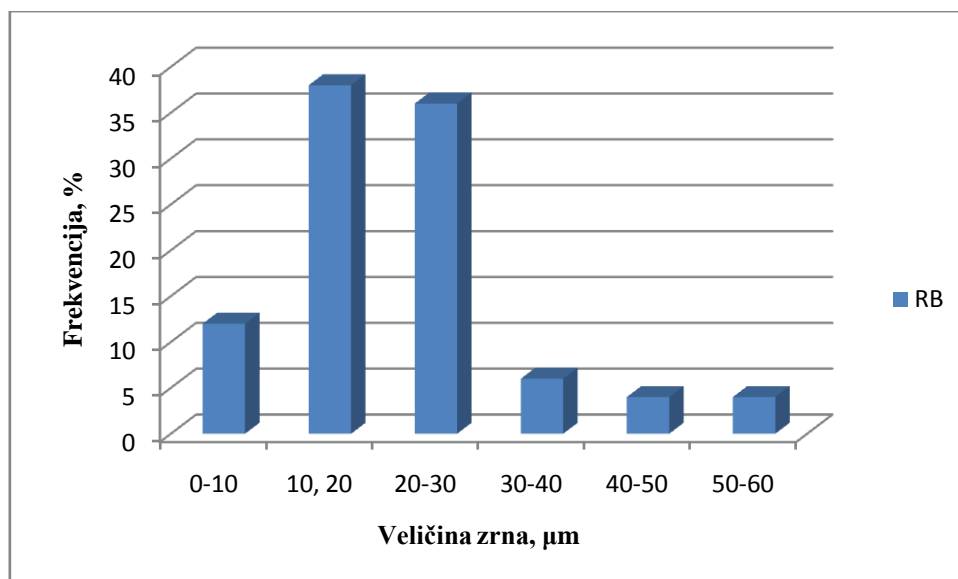
Izmerene vrednosti za veličinu zrna punioca na bazi bazalta za izradu uzoraka sinterovanog bazalta i vatrostalnih premaza prikazani su u tabeli 3.2 i na slici 3.7.

Tabela 3.2. Veličina zrna punioca za izradu uzoraka SB i vatrostalnih premaza

Veličina zrna [μm]	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
Frekvencija [%]	11,0	38,1	36,5	5,0	2,2	2,5

Srednja veličina zrna punioca za izradu uzoraka sinterovaog bazalta i vatrostalnih premaza je 21,45 μm ; minimalna veličina zrna je 9,90 μm ; maksimalna veličina zrna je 84,30 μm , a standardna devijacija $\sigma = 15,44$, tabela 3.2 i slika 3.7.

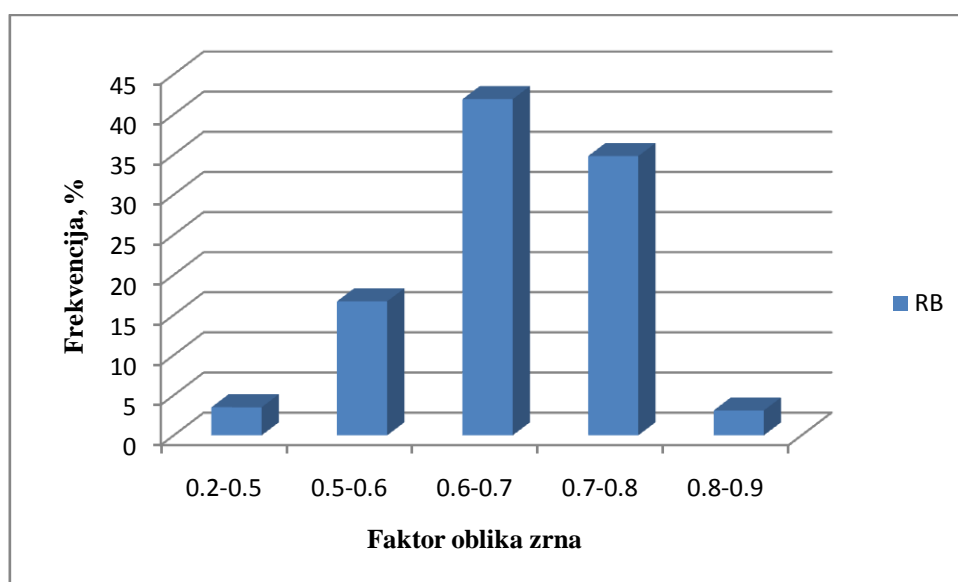
Srednji faktor oblika zrna punioca je 0,65; minimalni faktor oblika zrna je 0,39; maksimalni faktor oblika zrna je 0,85; a standardna devijacija $\sigma = 0,45$, prikazano u tabeli 3.3 i na slici 3.8.



Slika 3.7. Histogram raspodele veličine zrna punioca na bazi bazalta za sintezu uzoraka SB i vatrostalnih premaza LFPB, PP i PS.

Tabela 3.3. Faktor oblika zrna punioca za izradu uzoraka SB i vatrostalnih premaza

Faktor oblika zrna	0,2-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9
Frekvencija [%]	3,5	16,7	41,9	34,8	3,1



Slika 3.8. Histogram raspodele faktora oblika zrna punioca za sintezu uzoraka sinterovanog bazalta i vatrostalnih premaza na bazi bazalta.

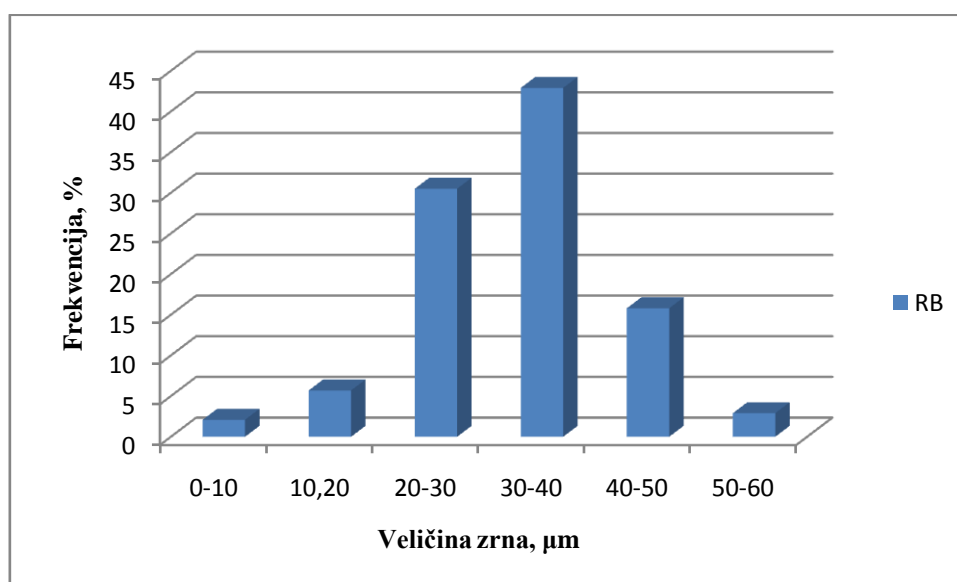
Na osnovu podatka o faktoru oblika zrna, može se konstatovati da zrna ovog uzorka pripadaju kategoriji zaobljenih zrna. Ovo je pogodno za dobijanje otpresaka velike gustine pri presovanju, odnosno dobijanje kompaktne sinterovane strukture niske poroznosti, za uzorke

SB prema radu [249]. Takođe, ovi punioci su pogodni za dobijanje kontinuiranih slojeva premaza na kalupima ili polimernim modelima, odnosno pri nanošenju zaštitnih premaza na metalne i nemetalne površine, shodno rezultatima rada [242].

Za sintezu uzoraka kompozita NPS/B korišćen je punioci na bazi bazalta veličine zrna 40 μm . Podaci dobijeni merenjem veličine i faktora oblika zrna prikazani su u tabelama 3.4 i 3.5 i slikama 3.9 i 3.10.

Tabela 3.4. Veličina zrna punioca na bazi bazalta za izradu uzoraka NPS/B

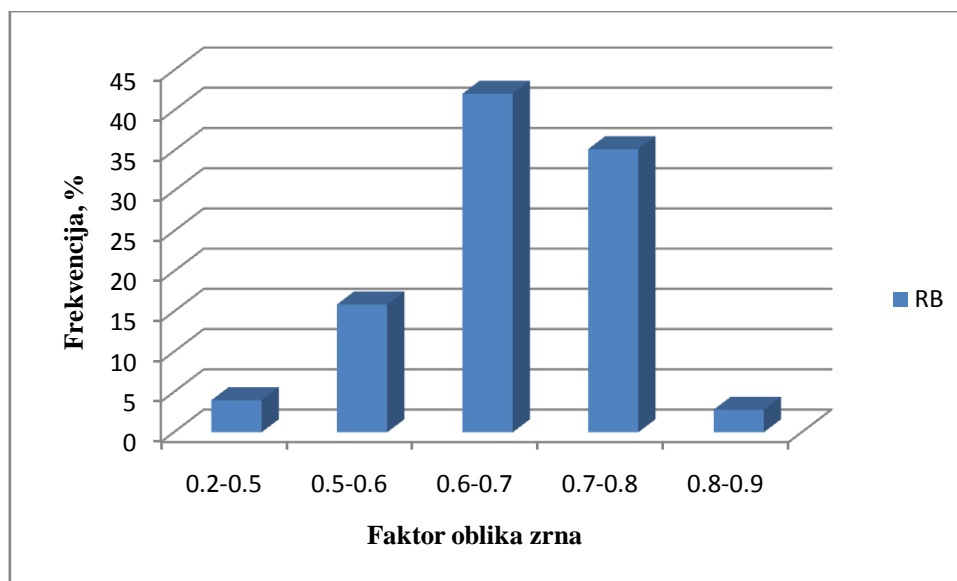
Veličina zrna [μm]	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
Frekvencija [%]	2,09	5,9	30,5	42,9	15,8	2,95



Slika 3.9. Histogram raspodele veličine zrna punioca na bazi bazalta za sintezu uzoraka kompozita NPS/B.

Tabela 3.5. Faktor oblika zrna punioca za izradu uzoraka NPS/B

Faktor oblika zrna	0,2-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9
Frekvencija [%]	4,0	15,9	42,3	35,1	2,81



Slika 3.10. Histogram raspodele faktora oblika zrna punioca na bazi bazalta za sintezu uzoraka kompozita NPS/bazalt.

Srednja veličina zrna punioca za sintezu uzoraka NPS/B je 41,97 μm ; minimalna veličina zrna je 10,77 μm ; maksimalna veličina zrna je 131,32 μm , a standardna devijacija $\sigma = 20,51$, tabela 3.4 i slika 3.9. Srednji faktor oblika zrna je 0,61; minimalni faktor oblika zrna je 0,09; maksimalni faktor oblika zrna je 0,82, a standardna devijacija $\sigma = 0,14$, tabela 3.5 i slika 3.10. Na osnovu podatka o faktoru oblika zrna, može se konstatovati da zrna ovog uzorka pripadaju kategoriji zaobljenih zrna.

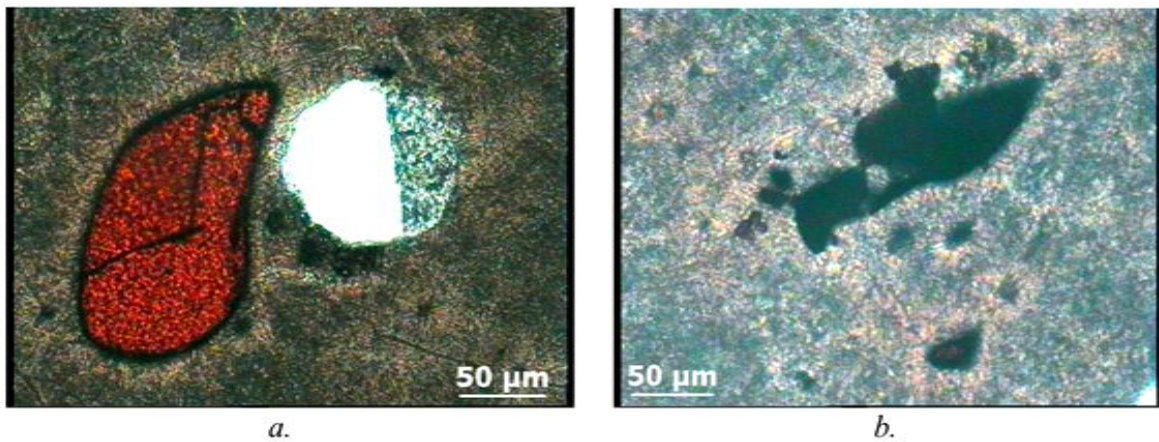
3.3.2 Sinteza i karakterizacija uzoraka livenog bazalta (uzorci LB)

Uzorci livenog bazalta (LB) dobijeni su procesima topljenja drobljenih stena rovnog bazalta na temperaturi 1250°C i livenja ispitnih ploča dimenzija (200×150×15) mm u peščane kalupe. U cilju smanjenja unutrašnjih naprezanja livene probne ploče su odgrevane na temperaturi 850°C/2h, a zatim su postupno hladene u peći do sobne temperature.

Makroopis uzorka LB: kompaktan, izuzetno tvrd materijal. Uzorak se teško seče.

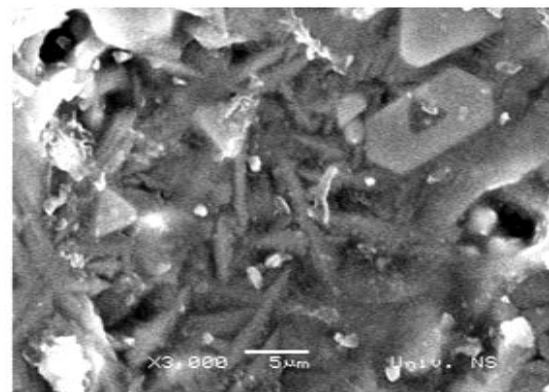
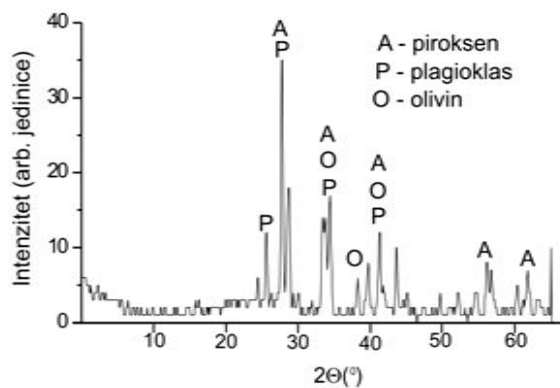
Na slici 3.11 prikazane su mikrofotografije struktura uzorka LB snimljene pod polarizacionim mikroskopom za propuštenu svetlost na petrografskim preparatima. Osnova ispitivanog uzorka LB je kriptokristalasta- staklasta sa pojavom sitnih kristala. Struktura uzorka je nehomogena, sastavljena od različitih agregata između kojih se vidi jasna granica. U staklastoj osnovi prisutni su mehuri koji su ispunjeni vazduhom ili staklom, slika 3.11.a.

Pojedini kristali u staklastoj osnovi bazalta su termički izmenjeni, (izmenjeni spinel, slika 3.11.a i izmenjeni neprovidni mineral, slika 3.11.b).



Slika 3.11. Mikrofotografije struktura livenog bazalta: a) staklasta osnova sa izmenjenim spinelima, mehur delimično ispunjen staklom; b) staklasta osnova i termički izmenjen neprovidni mineral. Snimljeno na plarizacionom mikroskopu. Propuštena svetlost, IIN [248].

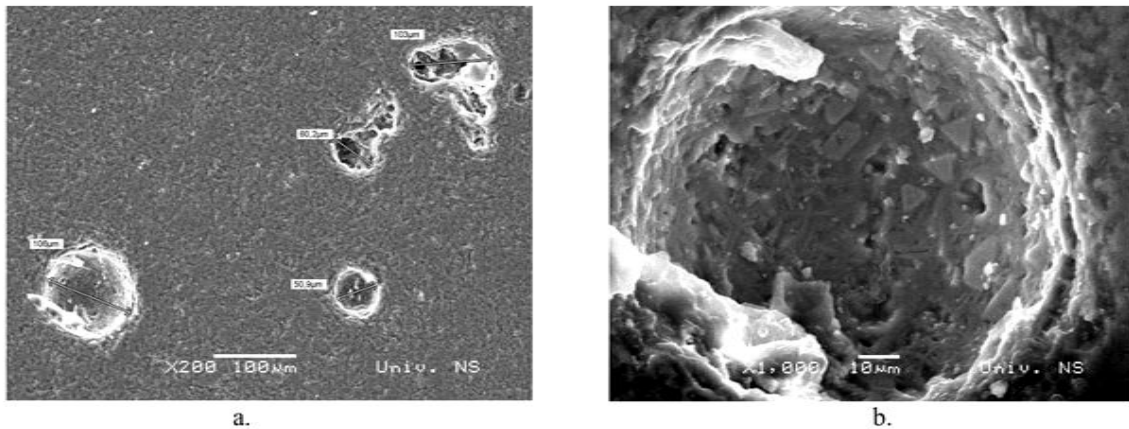
XRD difraktogram i SEM mikrofotografija uzorka LB prikazani su na slikama 3.12 i 3.13.



Slika 3.12. XRD difraktogram uzorka LB [248]. Slika 3.13. SEM mikrofotografija uzorka LB [248].

U LB uzorku najzastupljeniji su minerali: pirokseni, zatim plagioklasi, a manje olivini, slika 3.12. U uzorku LB pojedini kristali su termički izmenjeni, slika 3.13.

Prisutan je manji broj mehura uklopljenih u osnovu bazalta, slika 3.14. Mehuri su većih dimenzija u odnosu na mehure u strukturi rovnog bazalta. Mehuri na površini uzoraka izazivaju hrapavost površine i pojavu jamica. To sve smanjuje svojstva otpornosti uzoraka na dejstvo kavitacije.

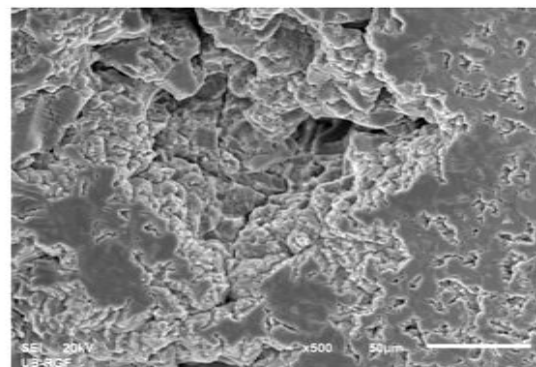
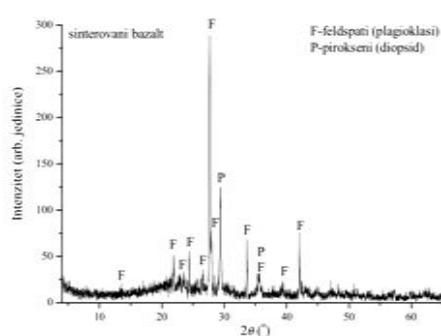


Slika 3.14. Prisutni mehuri u strukturi livenog bazalta: a) mehuri različitih dimenzija na površini uzorka; b) mehur uklopljen u osnovu bazalta [248].

3.3.3 Sinteza i karakterizacija uzoraka sinterovanog bazalta (uzorci SB)

Drobljenjem i mlevenjem bazaltnih stena dobijen je bazaltni agregat veličine zrna ispod 1mm. Bazaltni agregat je samleven u vibracionom mlinu sa ahatnim kuglama na veličinu zrna 20 μm. Dobijeni bazaltni prah pomešan je sa aditivima za presovanje (0,6% bentonit; 0,5% celuloza). Uzorci za ispitivanje su presovani u ploče dimenzija (100×50×15) mm korišćenjem Leitz prese pod pritiskom 10^6 Pa. Proces sinterovanja urađen je na temperaturi 1150°C, a odvijao se po sledećem režimu: podizanje temperature do 1000 °C brzinom 5 °C/min u trajanju od 200 min; zatim zagrevanje do 1150 °C brzinom zagrevanja 2 °C/min u trajanju 100 min; sinterovanje na 1150 °C u trajanju 1 h, shodno rezultatima u radu [249]. Oznaka uzoraka sinterovanog bazalta: SB.

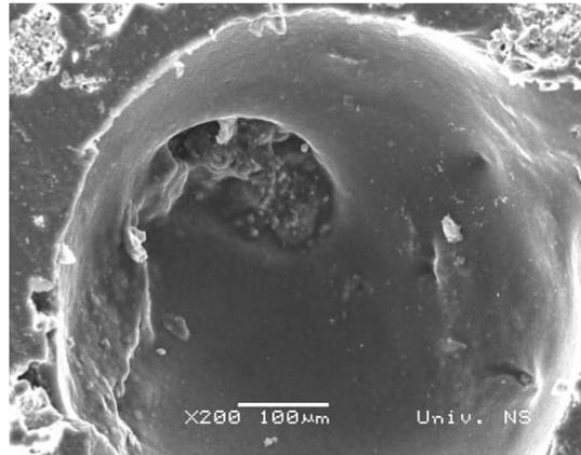
Na slikama 3.15 i 3.16 prikazan je XRD difraktogram i SEM mikrofotografija uzorka SB.



Slika 3.15. XRD difraktogram uzorka SB [249]. Slika 3.16. SEM mikrofotografija uzorka SB, vide se prisutni mehuri uklopljeni u strukturi.

U uzorku SB prisutni su feldspati i pirokseni, slika 3.15. Feldspati (bazični plagioklasi) su značajnije zastupljeni od piroksena (diopsid) [249].

U strukturi sinterovanog bazalta prisutni su ravnomerno raspoređeni kristali plagioklasi i piroksena u osnovnoj masi uzorka, slika 3.16. Takođe, prisutni su gasni mehurovi različitih veličina, slika 3.17.



Slika 3.17. Veliki mehur uklopljen u staklastu osnovu uzorka SB (početno stanje).

Mehurovi su većih dimenzija u odnosu na mehurove u uzorcima RB, ispunjeni su vazduhom ili staklom i uklopljeni su u staklasu osnovu bazalta.

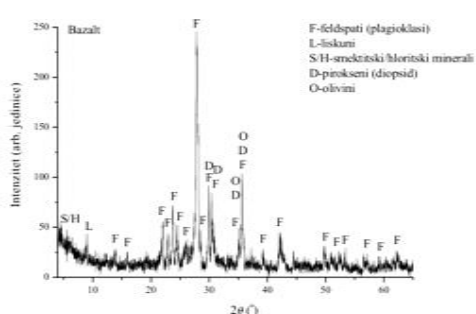
Tokom ispitivanja uzoraka SB pod dejstvom kavitacije praćene su promene prisutnih mehurova i jamica na površini uzoraka.

3.3.4 Sinteza i karakterizacija vatrostralnih premaza

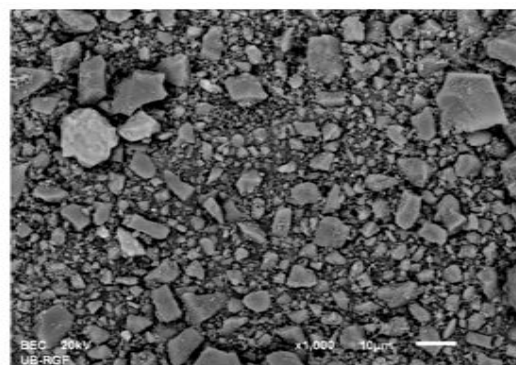
3.3.4.1 Priprema polaznih vatrostralnih prahova, sinteza i karakterizacija Lost foam vatrostralnih premaza (uzorci: LFPB; LFPM; LFPK; LFPCS; LFPT)

Sinteza i karakterizacija novih vatrostralnih premaza na bazi bazalta može da doprinese razvoju i primeni novih tehnologija livenja odlivaka primenom isparljivih modela (Lost foam proces livenja) i topivih modela (precizni liv). Premazi na bazi bazalta predstavljaju novinu i do sada se nisu koristili u livarstvu. Na slici 3.18 prikazani su XRD difraktogram i SEM mikrofotografija korišćenog punioca na bazi bazalta, veličine zrna punioca 20 µm [242].

U tabeli 3.6 prikazani su rezultati istraživanja sinteze vatrostralnih premaza na bazi bazalta, mulita, kordijerita, cirkonijum-silikata, talka. Prikazani su sastavi primenjenih vatrostralnih punioca, sastavi pripremljenih vatrostralnih premaza i parametri sinteze premaza, prema rezultatima istraživanja prikazanih u radovima [237 - 240, 242].



a.



b.

Slika 3.18. Punioc na bazi bazalta: a) XRD difraktogram punioca; b) SEM mikrofotografija punioca [242].

Tabela 3.6. Sastavi vatrostralnih punioca, Lost foam vatrostralnih premaza i parametri sinteze premaza: LFPB, LFPM, LFPK, LFPCS, LFPT [237 - 240, 242]

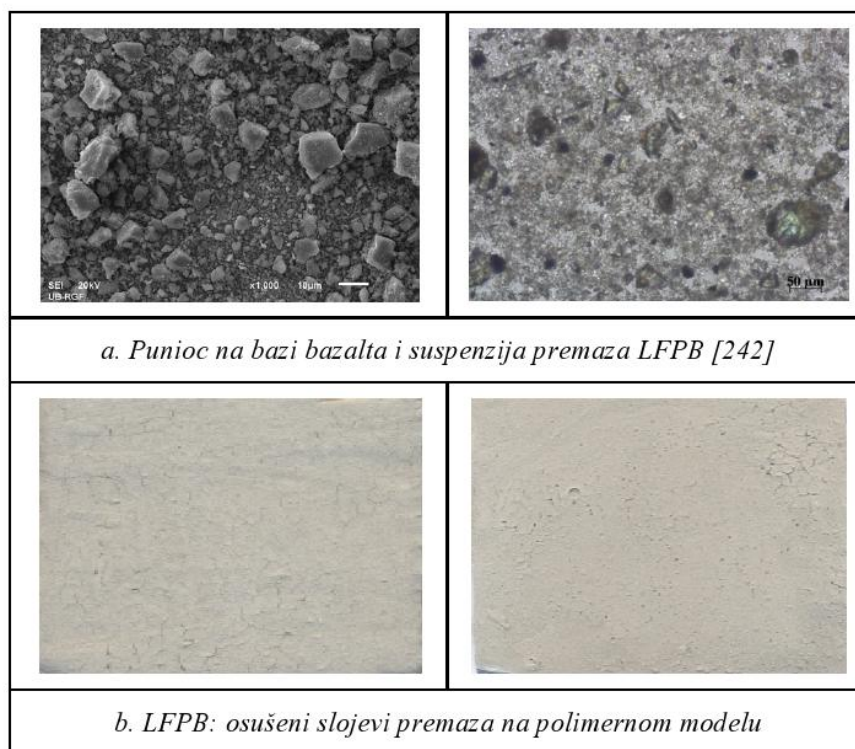
Oksidi	Sastav vatrostralnih punioca					Sastav vatrostralnih premaza
	B	M	K	CS	T	
						-vatrostralni punioc: 92-94 %, veličina zrna 20μm
SiO ₂	56,22	25,18	51,15	33,04	60,15	-vezivo (Bentone; Bindal H; C ₂₀ H ₃₀ O ₂): 2,3-3,5%
Al ₂ O ₃	18,62	70,33	30,91	-	1,18	-aditivi (lucel, Na ₃ P ₃ O ₃ , bentoniti): 1,2-1,5%
MgO	3,40	0,99	13,55	-	31,40	-rastvarač: voda
CaO	7,78	0,62	3,20	-	1,50	Parametri sinteze vatrostralnih premaza
FeO	2,97	0,10	0,90	-	0,11	-gustina suspenzije: 2 g/cm ³
Fe ₂ O ₃	1,15	0,98	1,20	-	0,28	-temperatura: 25 °C
ZrO ₂	-	-	-	66,69	-	-brzina mešanja suspenzije: 1 o/min
Na ₂ O	4,73	1,10	0,01	-	0,10	-debljine osušenih slojeva premaza: 0,2-0,5mm
K ₂ O	3,37	0,80	0,01	-	0,19	-nanošenje premaza: potapanjem, četkom

Premazi su ispitivani u skladu sa standardima za ovu vrstu vatrostralnih proizvoda [158, 159]. Važna karakteristika premaza je sedimentaciona stabilnost suspenzije premaza. Da bi se postigla zadovoljavajuća stabilnost suspenzije premaza, korišćen je punioc na bazi bazalta manjeg prečnika (20 μm) s obzirom da se sitnija zrna sporije talože. Priprema vatrostralnog

punioca procesima finog mlevenja i mehaničke aktivacije, primena različitih aditiva u sastavu premaza omogućili su sintezu premaza visokih reoloških svojstava [239, 240].

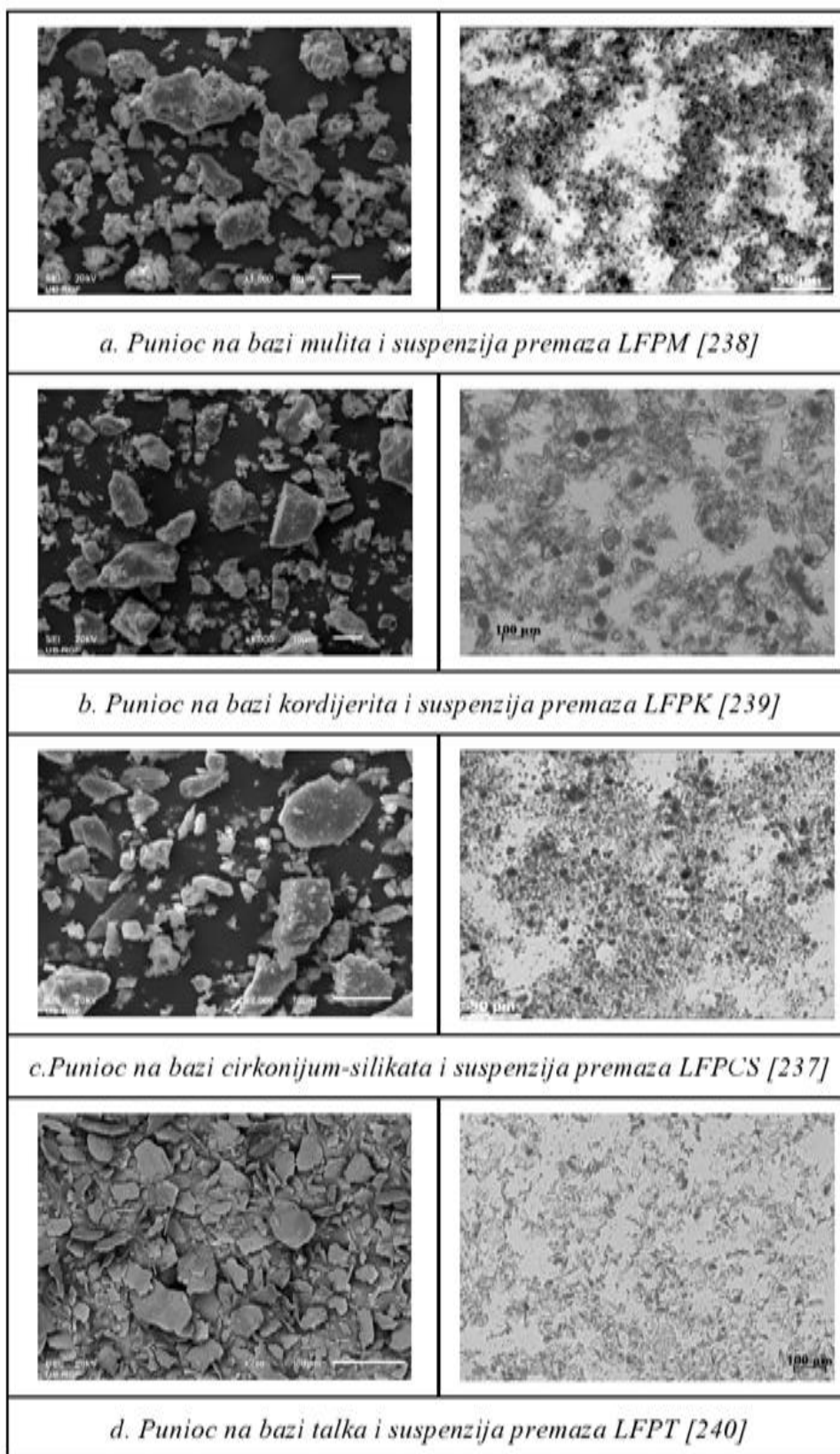
Određivanje penetracije premaza ispitivano je korišćenjem epruveta izrađenih od kaluparske mešavine koje su nakon nanošenja premaza i sušenja polomljene i na prelomu je izmerena dubina penetracije premaza u milimetrima, shodno standardu [158].

Na slici 3.19 prikazan je istraživani Lost foam vatrostralni premaz na bazi bazalta, sa prikazom vatrostalnog punioca, suspenzije premaza i osušenih slojeva premaza na polimernom modelu.



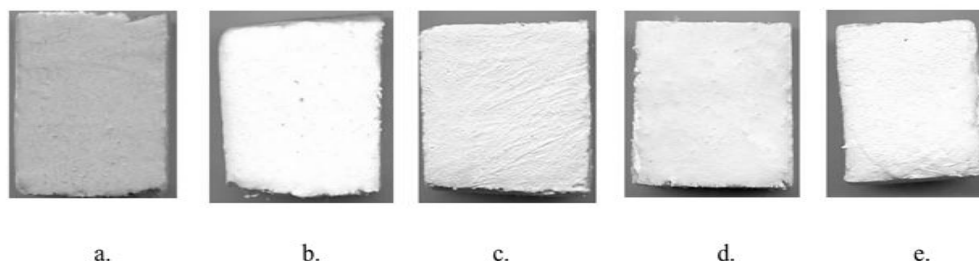
Slika 3.19. Lost foam vatrostralni premaz na bazi bazalta: a. mikrofotografije punioca i suspenzije premaza; b. osušeni slojevi premaza na polimernom modelu (tanji sloj, levo; deblji sloj, desno).

Za ocenu kvaliteta dobijenog vatrostalnog premaza na bazi bazalta (LFPB) vršeno je poređenje sa premazima na bazi mulita (LFPM), kordijerita (LFPK), cirkonijum silikata (LFPCS), talka (LFPT), koji se istražuju i već delimično koriste u livačkoj praksi. Dizajniranje sastava livačkih premaza urađeno je u skladu sa ranijim radovima [237, 238], novim radovima [239, 242] i zahtevom za visokom sedimentacionom stabilnošću suspenzije premaza [118, 196]. Na slici 3.20 prikazani su punioci i suspenzije Lost foam vatrostalnih premaza na bazi mulita, kordijerita, cirkonijum-silikata i talka.



Slika 3.20. Mikrofotografije punioca i suspenzija Lost foam vatrostalnih premaza na bazi: a. mulita; b. kordijerita; c. cirkonijum-silikata; d. talka.

Na slici 3.21 prikazani su osušeni slojevi istraživanih Lost foam vatrostralnih premaza serije LFPB; LFPM; LFPK; LFPCS i LFPT nanetih na polimerne pločice.



Slika 3.21. Osušeni slojevi Lost foam vatrostralnih premaza na polimernoj pločici: a) LFPB; b) LFPM; c) LFPK; d) LFPCS; e) LFPT.

Rezultati ispitivanja tehnoloških svojstava istraživanih vatrostralnih premaza na bazi bazalta prema standardu za vatrostralne premaze [158, 159] prikazani su u tabeli 3.7 [242]. Na dobijenim vatrostralnim premazima ispitivana je sedimentaciona stabilnost premaza (%), dubina penetracije (10^{-4} m), debljina osušenih slojeva premaza (10^{-3} m). U tabeli su prikazane srednje vrednosti dobijenih rezultata ispitivanja za tri merenja.

Pri ispitivanju kvaliteta premaza pokazalo se da se premazi lako nanose na površine uzoraka za ispitivanje; dobro prijanjaju na površine kalupa; lako se podešava debljina slojeva premaza; slojevi su vidljivi na površinama kalupa ili modela; brzo se suše, bez pucanja ili otiranja osušenih površina premaza.

Tabela 3.7. Tehnološka svojstva ispitivanih Lost foam vatrostralnih premaza na bazi bazalta [242]

Oznaka	Sedimentacija (24h, %)	Penetracija (10^{-4} m)	Sušenje / vreme (h)	Otpornost na požar	Vatrostalnost	Debljina sloja (10^{-3} m)
LFPB	4,4	5	na vazduhu /16h	Nezapaljiv	16 SK/1470°C	0,2 - 0,3

Dobijeni rezultati tehnoloških ispitivanja vatrostralnih premaza na bazi bazalta, prikazani u tabeli 3.3 u saglasnosti su sa rezultatima ispitivanja premaza na bazi mulita, kordijerita, cirkonijum silikata i talka, prikazano u radovima [237 - 238].

Prema uslovima standarda [158, 159] ispitivani premazi na bazi bazalta pokazuju zadovoljavajuća svojstva za primenu kod livenja odlivaka obojenih metla i legura. S obzirom da je bazalt jeftina i lako dostupna mineralna sirovina, da procesima drobljenja i mlevenja

bazaltnih stena mogu da se dobiju kvalitetni vatrostalni punioci zahtevane veličine zrna (ispod 20 μm) i oblika zrna (faktor oblika zrna 0,6–0,7), postoji mogućnost izrade vatrostalnih premaza na bazi bazalta i primene u livnicama. To bi doprinelo sniženju proizvodnih troškova livnica. Takođe, bazalt nije toksična sirovina, a premazi na vodenoj osnovi nisu zapaljivi [242].

Pri izradi livačkih vatrostalnih premaza sa puniocima veličine zrna 20 μm (tabele 3.2 i 3.3, slike 3.7 i 3.8), zapaženo je da su se suspenzije premaza gustine 2 g/cm^3 lako i brzo homogenizovale, što je od značaja pri primeni premaza u pogonima livnica. Korišćenjem čestica punioca različitih veličina i oblika zrna, ostvareno je bolje međusobno pakovanje čestica u slojevima premaza i postignuti su kontinuirani filmovi premaza na nanetim površinama kalupa i jezgara [242].

3.3.4.2 Sinteza i karakterizacija zaštitnih vatrostalnih premaza (uzorci: PP; PS)

Druga vrsta vatrostalnih premaza koja je istraživana u okviru ove disertacije odnosi se na vatrostalne premaze za zaštitu delova metalnih i nemetalnih konstrukcija. Kao vatrostalni punioc primenjen je bazaltni prah, prečnika zrna 20 μm . U literaturi nema podataka o primeni bazalta kao vatrostalnog punioca u sastavu zaštitnih premaza.

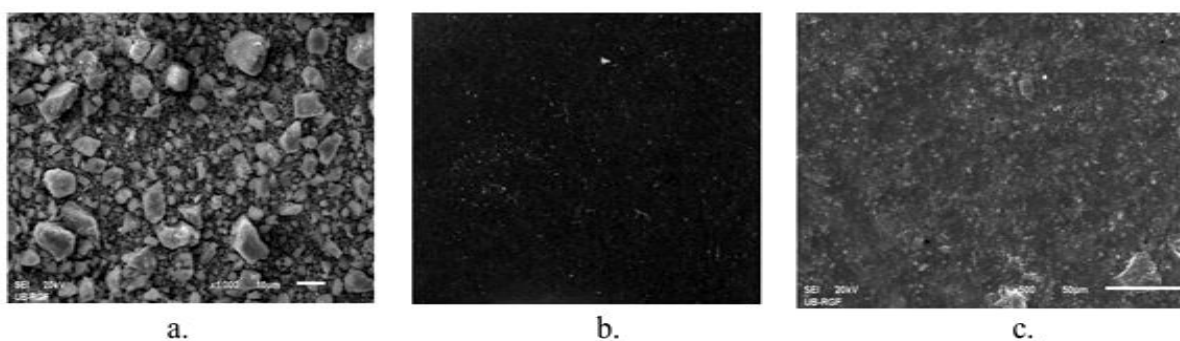
Tokom istraživanja određen je sastav zaštitnih premaza koji se kretao u granicama: 80-85%; vatrostalni punioc na bazi bazalta; 12-17% vezivo na bazi epoksi smole; organski aditivi u cilju poboljšanja reoloških svojstava premaza i organski rastvarač (toluol). U tabeli 3.8 prikazani su sastavi zaštitnih vatrostalnih premaza i paramtri sinteze.

Tabela 3.8. Sastav i parametri sinteze zaštitnih vatrostalnih premaza (PP; PS) [242]

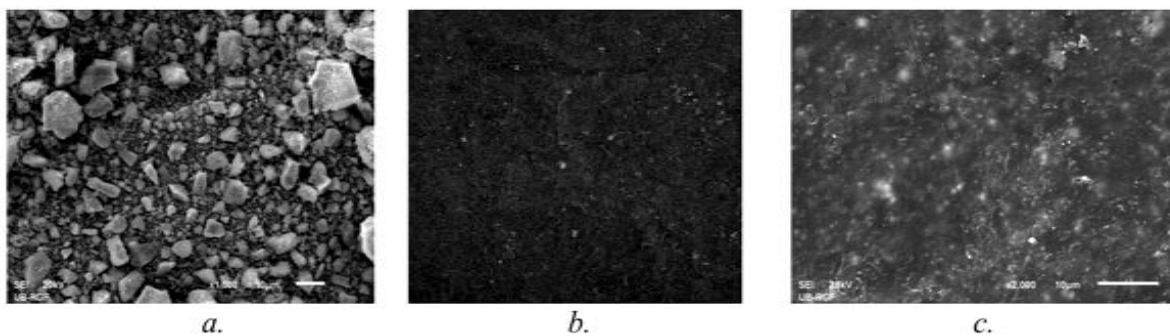
<i>Sastav zaštitnih vatrostalnih premaza</i>	
punioc	bazalt, 20 μm : 80 - 85 %
vezivo	epoksidna smola: 14 -19%
aditivi	organski aditivi: 1-1,2%
rastvarač	organski rastvarač (toluol) do $\rho=2,5\text{g}/\text{cm}^3$
<i>Parametri sinteze vatrostalnih premaza</i>	
gustina suspenzije (g/cm^3)	2,2 - 2,5
temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	22 - 25;
vreme sušenja (min)	5-15; ukupno 60
debljine osušenih slojeva premaza (10^{-3}m)	0,3 -0,5
brzina mešanja suspenzije	brzo mešanje, 10 $^{\circ}/\text{min}$
postupak nanošenje premaza	četkom

Pri izradi premaza sve komponente iz sastava premaza su postupno dodavane uz stalno mešanje (miksiranje). Za ispitivanje dobijeni zaštitni premazi su nanoseni u dva sloja na metalnu pločicu (oznaka uzorka: PP) i na pločicu od stiropora (oznaka uzorka: PS).

Premazi su na površine uzoraka nanošeni četkom u dva sloja. Sušenje premaza bilo je na vazduhu u trajanju do 1h. Na slikama 3.22 i 3.23 prikazani su zaštitni premazi na bazi bazalta nanoseni na metalne i polimerne pločice.



Slika 3.22. Zaštitni premaz na bazi bazalta nanet na metalnu pločicu (uzorak PP): a) punioc na bazi bazalta; b) fotografija premaza PP na metalnoj pločici; c) SEM mikrofotografija osušenih slojeva premaza PP [242].



Slika 3.23. Zaštitni premaz na bazi bazalta nanet na polimernu pločicu (uzorak PS): a) punioc na bazi bazalta; b) fotografija premaza na polimernoj pločici; c) SEM mikrofotografija osušenih slojeva premaza PS [242].

Za dalja istraživanja svojstava otpornosti dobijenih zaštitnih vatrostalnih premaza primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda sa stacionarnim uzorkom prema standardu ASTM G32. Cilj ispitivanja bio je određivanje kvaliteta premaza i mogućnosti primene za zaštitu metalnih i nemetalnih površina različitih konstrukcija.

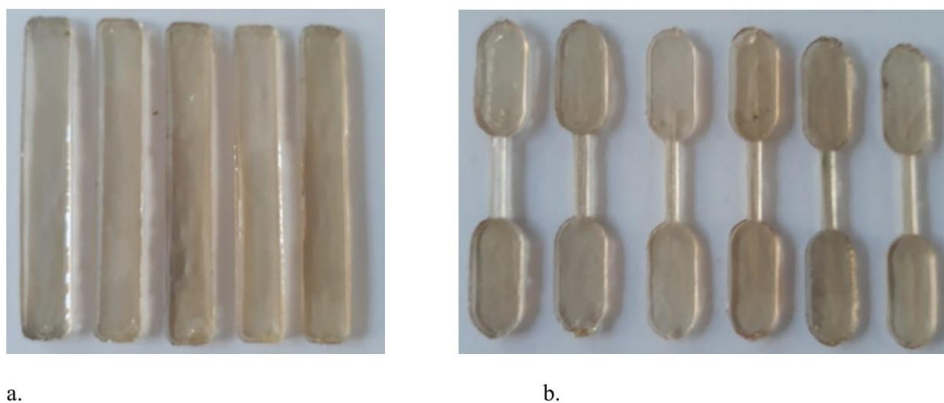
U istraživanjima je sagledana mogućnost primene bazalnog praha kao ojačivača u sastavu kompozita polimerna osnova/bazalt (uzorci oznaka: NPS/B). Istražen je uticaj udela ojačivača na bazi bazalta na mehanička svojstva dobijenih kompozita (tvrdoća, zatezna čvrstoća i čvrstoća na savijanje) i otpornost na dejstvo kavitacije [1-7]

3.3.5 Sinteza i karakterizacija kompozita sa polimernom osnovom i ojačivačem na bazi bazalta (uzorci: S; K₁; K₂; K₃; K₄)

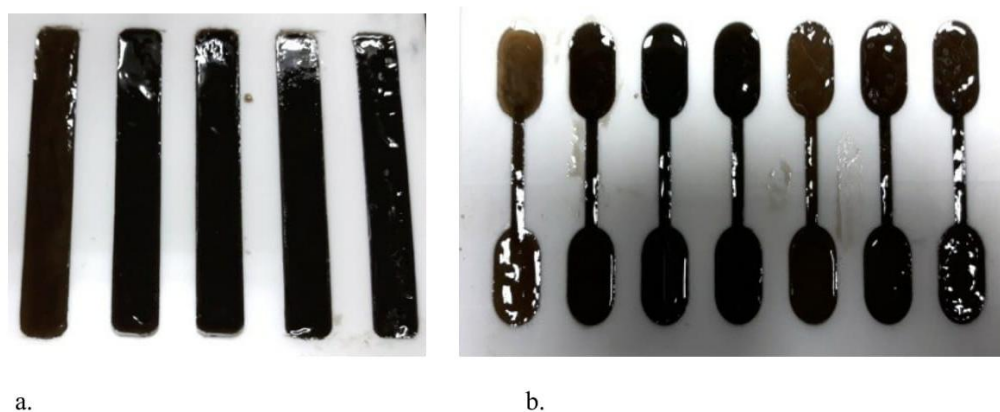
U cilju ocene mogućnosti primene bazalnog praha kao ojačivača u sastavu kompozita polimerna osnova/bazalt (uzorci oznaka: NPS/B) istražene su četiti serije sinteze uzoraka kompozita. Osnova kompozita je nezasićena poliestarska smola (sa 40% stirena). Ojačivač je prah bazalta veličine zrna 40 μm, faktora oblika zrna 0,6-0,7 (raspodela veličine i faktora oblika zrna ojačivača na bazi bazalta, tabele 3.3 i 3.4, slike 3.9 i 3.10,). Ispitivan je uticaj udela ojačivača na bazi bazalta na mehanička svojstva dobijenih kompozita (tvrdoća, zatezna čvrstoća i čvrstoća na savijanje) i otpornost na dejstvo kavitacije [250].

Tokom ispitivanja primenjen je sledeći postupak izrade kompozita: smola je merena na analitičkoj vagi u količini od 3 g; za izradu kompozita izmerene su određene količine bazalta kao ojačivača i to: uzorak K₁ (0,15g); uzorak K₂ (0,30g); uzorak K₃ (0,45g); uzorak K₄ (0,50g). Smeše smole i bazalnog praha za svaki kompozit stavljanje su u mikser i mešane 1 do 2 min. Tokom mešanja u posudu je postavljen magnet kako bi se sprečilo da se mešavina zalepi za zidove suda. Smeša je zatim stavljena na ultrazvučno kupatilo 5 min da se uklone mehurići iz smeše; dodato je 2 % inicijatora (peroksida metil-etil ketona, količina 0,15 ml) u smešu; vršeno mešanje smeše na ultrazvučnom kupatilu u trajanju 15 s; dobijena smeša je ulivena u teflonske kalupe za dobijanje uzoraka za mehanička ispitivanja. Izliveni uzorci smole i kompozita ostavljeni su u kalupu 30-45 min na sobnoj temperaturi da očvrstnu (unakrsno očvršćavanje); zatim su kalupi stavljeni u laboratorijsku sušnicu na 70°C / 2h; nakon toga kalupi su izvađeni iz sušnice i ostavljeni 48 h na sobnoj temperaturi; posle tog vremena dobijeni uzorci su izvađeni iz kalupa.

Na slikama 3.24 i 3.25 prikazani su dobijeni uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava: osnova kompozita (uzorci S) i uzorci kompozita, respektivno.

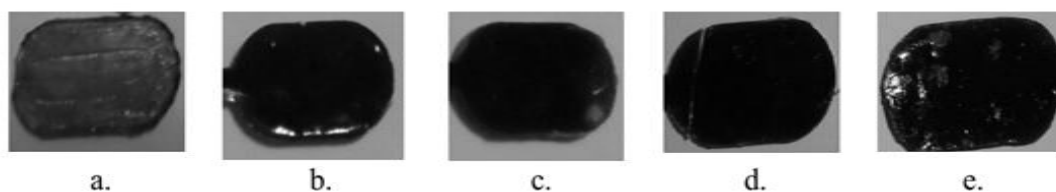


Slika 3.24. Pripremljeni uzorci osnovne kompozita (nezasićena poliestarska smola) za ispitivanje mehaničkih svojstava: a) savojne čvrstoće; b) zatezne čvrstoće [250].



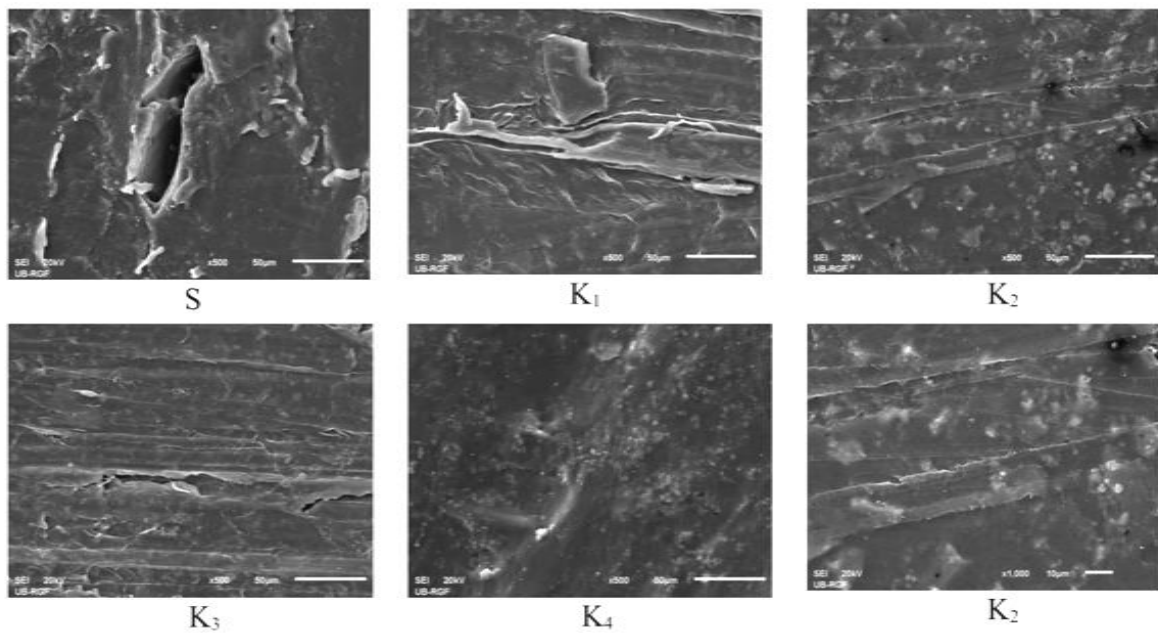
Slika 3.25. Pripremljeni uzorci kompozita za ispitivanje mehaničkih svojstava: a) savojne čvrstoće; b) zatezne čvrstoće [250].

Svi dobijeni uzorci su podvrgnuti su ispitivanju na dejstvo kavitacije primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom. Uzorci za određivanje otpornosti na dejstvo kavitacije su isečeni iz epruveta za ispitivanje zatezne čvrstoće. Isečene su glave polomljenih epruveta nakon ispitivanja zatezanjem, slika 3.26.



Slika 3.26. Uzorci smole i kompozita (glave epruveta za ispitivanje zatezne čvrstoće) pripremljeni za kavitaciono ispitivanje: a) S; b) K₁; c) K₂; d) K₃; e) K₄ [250].

Na slici 3.27 prikazane su SEM mikrofotografije uzoraka poliestarske smole i dobijenih kompozita pre ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.



Slika 3.27. SEM mikrofotografije uzoraka nezasićene poliestarske smole (S) i kompozita NPS/B pre ispitivanja pod dejstvom kavitacije (uvećanje 500 ×).

Cilj ispitivanja uzoraka na dejstvo kavitacije bio je procena mogućnosti primene dobijenih kompozita u uslovima kavitacionih opterećenja.

4. Rezultati i diskusija

Tokom određivanja otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka vatrostalnih materijala na bazi bazalta praćena je promena mase uzoraka u funkciji vremena delovanja kavitacije. Određene su kavitacione brzine i stepen oštećenja površine ispitivanih uzoraka. Morfologija oštećenja površine uzoraka pod dejstvom kavitacije praćena je skening elektronskim mikroskopom, a nivo degradacije površine uzoraka kvantifikovan je primenom analize slike.

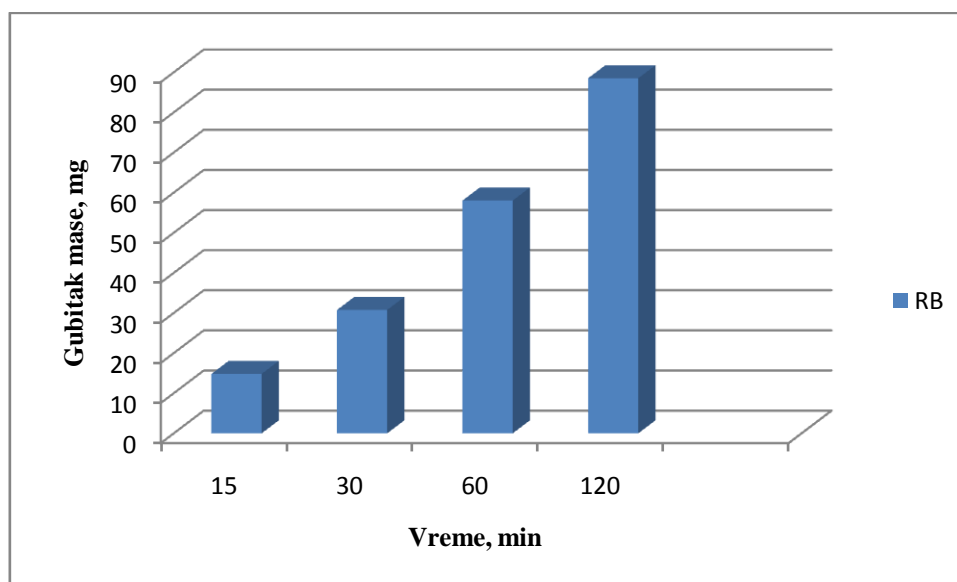
4.1. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka rovnog bazalta (serija: RB)

4.1.1. Promena mase uzorka RB i određivanje kavitacione brzine

Rezultati merenja gubitka mase uzoraka pod dejstvom kavitacije u toku vremena ispitivanja prikazani su u tabeli 4.1 i na slici 4.1.

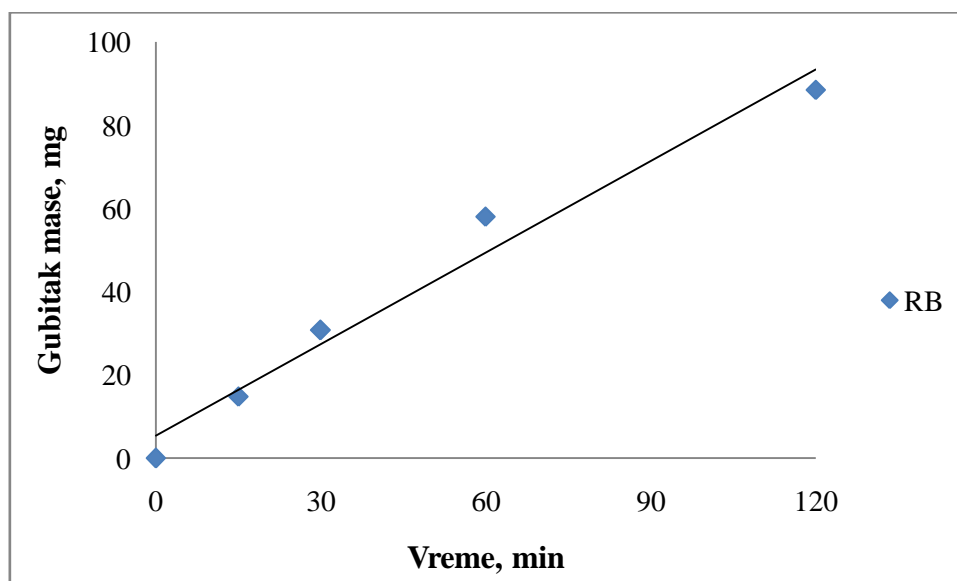
Tabela 4.1. Rezultati merenja gubitka mase uzoraka RB pod dejstvom kavitacije (g)

Vreme (min)	15	30	60	120
Gubitak mase uzorka RB, (g)	14,81	29,75	55,08	88,51



Slika 4.1. Gubitak mase uzorka RB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Kod uzorka RB evidentiran je mali stepen otpornosti na dejstvo kavitacije sa kavitacionom brzinom 0,74 mg/min, slika 4.2 [248].



Slika 4.2. Kavitaciona brzina uzorka RB u funkciji vremena ispitivanja.

Inkubacioni period u ranoj fazi oštećenja je kratak, jer je period bez gubitka mase gotovo zanemarljiv. Prema odabranim uslovima testiranja u prvih 15 min gubitak mase uzorka RB je do 15 mg, i kako se vreme ekspozicije povećava, kumulativni gubitak mase uzorka postepeno se povećava, skoro linearno do 88.51 mg za 120 min ekspozicije.

Pokazana veća kavitaciona brzina kod uzorka RB može da se tumači grubljom strukturom olivin-piroksenskog bazalta i postojanjem sitnih mehurova na površini uzoraka koji povećavaju hrapavost površine i doprinose povećanju kavitacionih oštećenja uzoraka.

4.1.2 Analiza slike

Na slici 4.3 prikazane su fotografije uzoraka RB, odgovarajuće linije profila dobijene analizom slike i SEM mikrofotografije erodiranih površina uzoraka RB.

Pri ispitivanju uzoraka RB na dejstvo kavitacije primenom ultrazvučne vibracione metode prema standardnu ASTM G32, uzorci su snimani pre i tokom vremena izlaganja. Promena oštećenja uzoraka praćena je primenom analize slike na dobijenim fotografijama i pri tome su određivani parametri: nivo oštećenja površine uzoraka, P/P_0 , %, broj formiranih jamica, N_p i prosečna površina formiranih jamica, P_{av} , mm^2 .

T, min	Fotografije uzoraka LB	Linije profila	SEM mikrofotografije erodiranih površina uzoraka RB (500x levo; 2000x desno)
0			
15			
30			
60			
120			

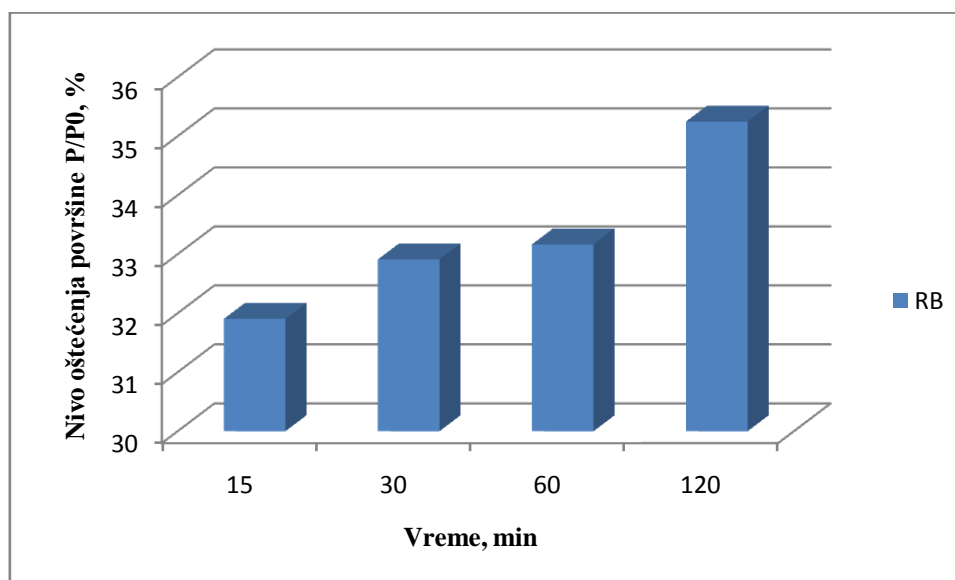
Slika 4.3. Fotografije uzoraka RB pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike i SEM mikrofotografije erodiranih površina uzoraka.

Kod uzorka RB početne jamice na površini i prisutna hrapavnost (za vreme $t=0$ min) se menjaju i povećavaju dimenzije tokom vremena izlaganja kavitaciji, što se može videti na većim promenama linija profila uzoraka RB tokom ispitivanja. Linije profila pokazuju da je degradacija u središtu površine uzorka, s obzirom na intenzitete vrhova linija profila. Vrhovi linija profila se smanjuju ili povećavaju, počev od 15 min ekspozicije do 120 min, kada su prisutna znatna oštećenja površine uzoraka RB, što se vidi i na SEM mikrofotografijama erodiranih površina uzoraka, slika 4.3.

Rezultati prikazani u tabeli 4.2 i na slici 4.4 odgovaraju rezultatima oštećenja površine uzoraka RB određenih primenom analize slike na fotografijama površina uzoraka tokom vremena delovanja kavitacije. To takođe, odgovara broju formiranih jamica, N_p (prikazano u tabeli 4.3 i na slici 4.5) i srednjoj površini formiranih jamica, P_{av} , (prikazano u tabeli 4.4 i na slici 4.6).

Tabela 4.2. Nivo oštećenja površine uzoraka RB pod dejstvom kavitacije

Vreme (min)	15	30	60	120
Oštećenje površine uzoraka RB, P/P_0 (%)	28,904226	31,21244	34,91125	35,01611

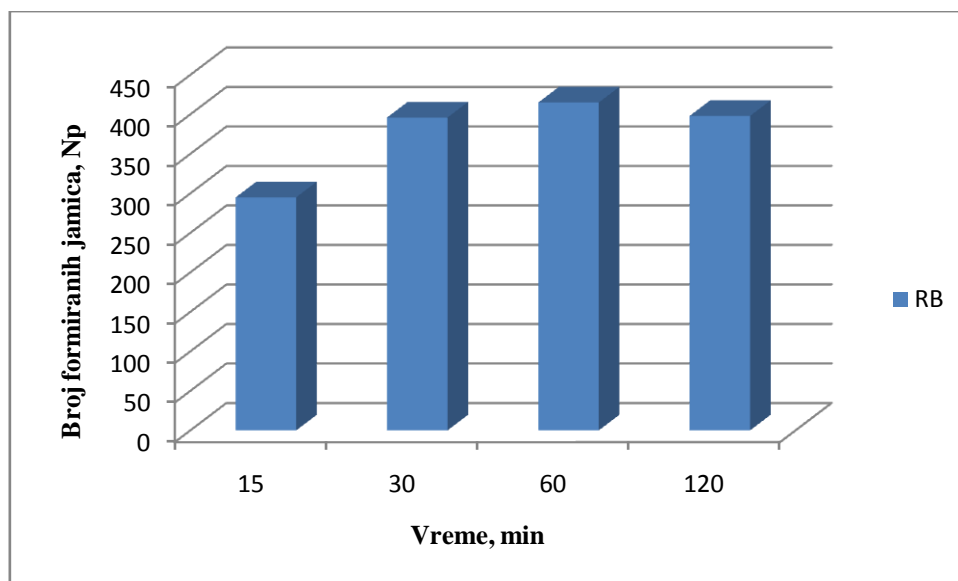


Slika 4.4. Nivo oštećenja površine uzoraka RB tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.

Na kraju vremena ispitivanja od 120 min delovanja kavitacije kod uzoraka RB uočeno je veće oštećenje površine sa pojavom mnoštva jamica koje se na pojedinim mestima međusobno spajaju u veće i dublje jamice. Nivo oštećenja površine uzoraka bilo je 35%, prikazano u tabeli 4.2 i na slici 4.4. To odgovara i rezultatima većeg gubitka mase uzorka tokom ispitivanja, slika 4.1.

Tabela 4.3. Broj formiranih jamica pod dejstvom kavitacije za uzorak RB

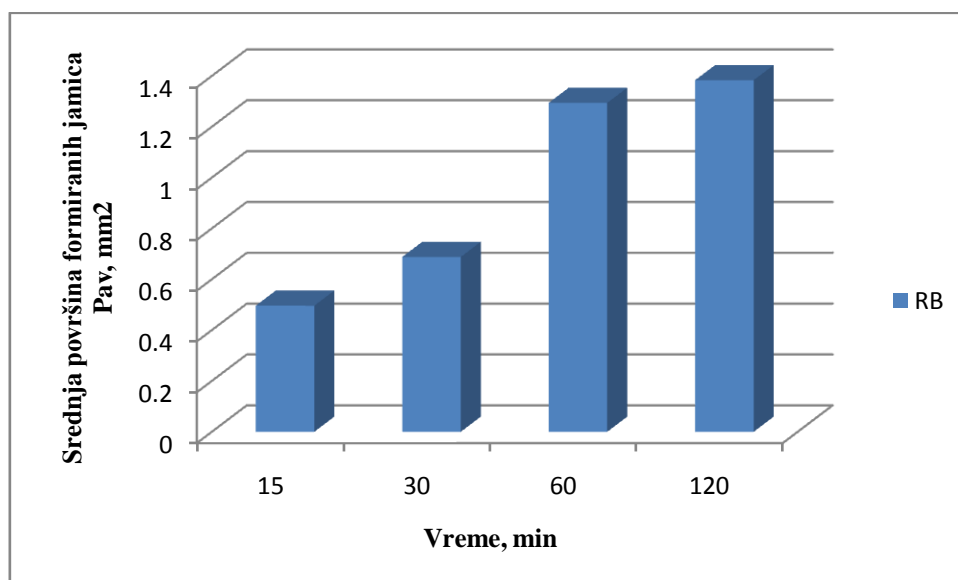
Vreme (min)	15	30	60	120
Broj formiranih jamica, N_p za uzorak RB	295	376	401	375



Slika 4.5. Broj formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak RB.

Tabela 4.4. Srednja površina formiranih jamica pod dejstvom kavitacije, P_{av} (mm^2) za uzorke RB

Vreme (min)	15	30	60	120
Srednja površina formiranih jamica, P_{av} , mm^2 za uzorak RB	0,496156	0,687787	1,294029	1,383378



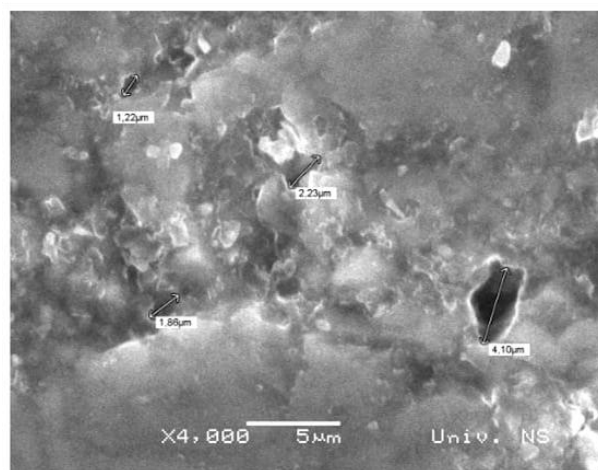
Slika 4.6. Srednja površina formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak RB.

Delovanjem procesa kavitacije broj formiranih novih jamica se postepeno povečava do 60 min ekspozicije, zatim od 60 min do 120 min broj jamica blago opada, što ukazuje da se

jamice međusobno spajaju, tabela 4.3 i slika 4.5. Porast broja i veličine jamica, pa njihovo međusobno spajanje u veće i dublje jamice, utiče na povećanje nivoa oštećenja površine uzoraka, tabela 4.2 i slika 4.4. Fokusiranjem energije udarnih talasa nastalih implozijom kavitacionih mehura na veće i dublje jamice na oštećenoj površini uzoraka RB uslovljava se intenziviranje efekata dejstva kavitacije. Analiza slike uzoraka RB pokazala je da stvaranje većeg broja manjih jamica na površini uzorka i njihovo spajanje u veće i dublje jamice doprinosi većem oštećenju površine uzorka, tako da je nakon 120 min delovanja kavitacije oštećenje površine 35%, slika 4.4. Rezultati ukazuju da se u svim vremenskim periodima procesa kavitacije mehanizam oštećenja uzoraka rovnog bazalta odvija kroz mehanizam stalnog formiranja novih jamica i povećavanja njihove prosečne površine. Imajući u vidu rezultate ispitivanja može se reći da se ovaj mehanizam odvija većom brzinom, što ukazuje na malu otpornost rovnog bazalta na oštećenja pod dejstvom kavitacije [241, 248, 249].

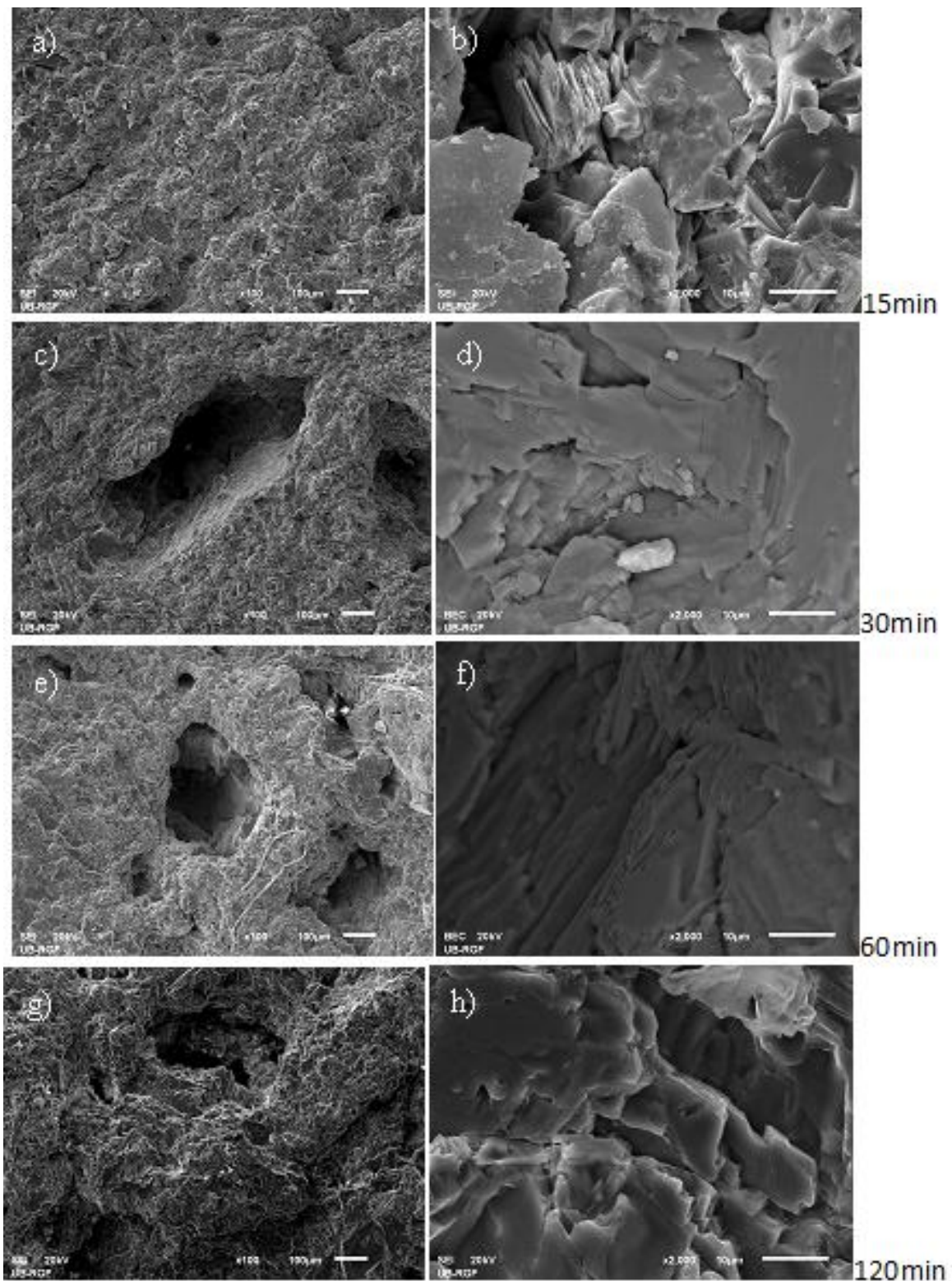
4.1.3 Promena morfologije oštećenja površine uzoraka

U uzorku RB prisutni su brojni sitni mehuri u strukturi, koji formiraju mnoštvo sitnih jamica na površini uzorka, slika 4.7. Prisustvo sitnih mehura uklopljenih u strukturu bazalta utiče na povećanje hrapavosti površine uzorka, prikazano na slici 4.3 za vreme $t=0$ min i liniji profila koja ukazuje na prisutna oštećenja površine uzorka pre izlaganja procesu kavitacije. Tokom ispitivanja pod dejstvom kavitacije posebna pažnja posvećena je praćenju promena prisutnih mehura sadržanih u osnovi bazalta, kao i prisutnih jamica na površini uzorka RB.



Slika 4.7. Prisutni mehuri manjih dimenzija u strukturi uzorka RB (početno stanje).

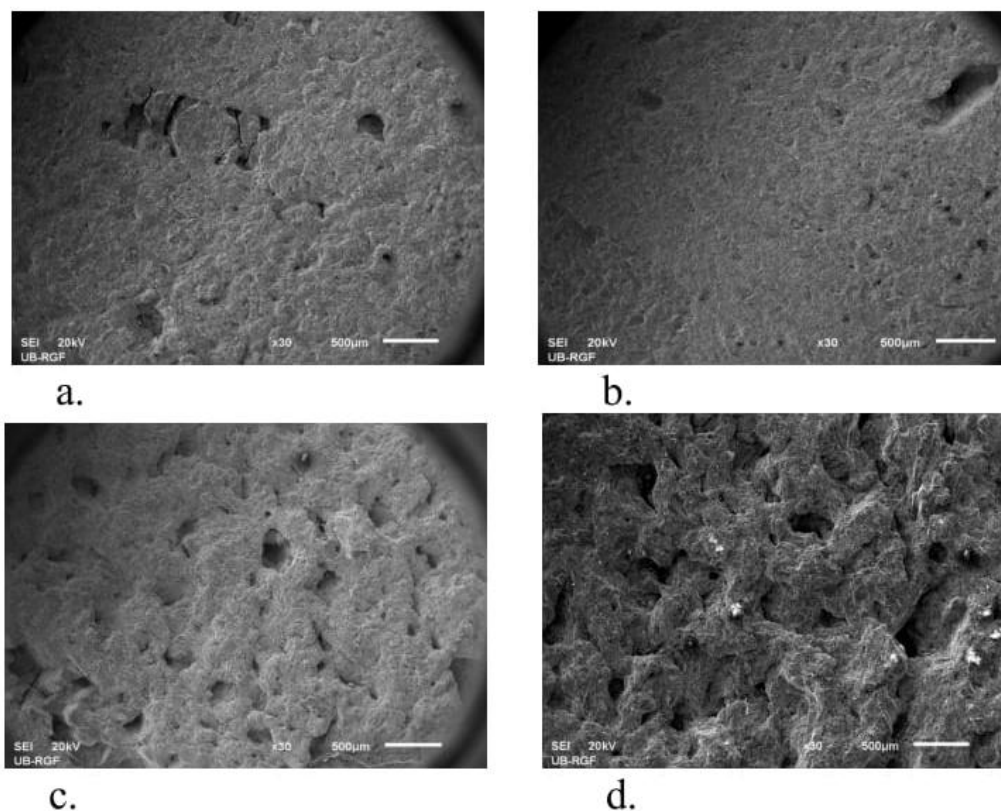
Promena morfologije oštećenja površine uzorka RB sa vremenom ispitivanja praćena je primenom skenirajuće elektronske mikroskopije, slike 4.8.



Slika 4.8. SEM mikrofotografije erodiranih površina uzorka RB sa različitim uvećanjima (100× levo, 2000× desno) i vremenima dejstva kavitacije: (a, b) 15 min; (c, d) 30 min; (e, f) 60 min; (g, h) 120 min [248].

Delovanjem procesa kavitacije u trajanju 15 min povećava se postojeća hrapavost površine i formiraju se plitke jamice (slika 4.8a,b). Jamica u olivin- piroksenskoj strukturi bazalta je oštih ivica, najverovatnije je nastala erodiranjem ivica kristala oko postojećeg mehura (slika 4.8.b). Ekspozicija 30 min uticala je na povećanje dimenzija formiranih jamica (slika 4.8.c.d). Izgled jamice sa erodiranim površinama, nastalih povećanjem gubitka mase uzorka pod dejstvom kavitacije, prikazan je na slici 4.8.d. Delovanje kavitacije u trajanju 60 min uticalo je na dalju degradaciju površine uzorka. Formirano je mnoštvo novih jamica. Postojeće jamice su se povećale daljim erodiranjem površine i daljim gubitkom mase uzorka (slika 4.8. e,f). Na kraju ispitivanja pod dejstvom kavitacije u trajanju 120 min površina uzorka RB je dosta oštećena (slika 4.8.g). Prisutni kristali minerala olivina i piroksena različito su erodirali (slika 4.8.h).

Nastajanje i razvoj oštećenja rovnog bazalta pod dejstvom kavitacije sa izgledom jamica nastalih na površini uzorka tokom ispitivanja, prikazano je na slici 4.9.



Slika 4.9. Nastajanje i razvoj oštećenja rovnog bazalta pod dejstvom kavitacije: a) hrapava površina sa plitkim jamicama, 15 min; b) povećanje postojeće jamice i formiranje novih jamica, 30 min; c) povećanje broja jamica, 60 min; d) mnoštvo većih jamica na kraju ispitivanja, 120 min, (uvećanje 30×).

Praćenje promena prisutnih mehura sadržanih u osnovi bazalta, pre izlaganja dejstvu kavitacije, pokazalo je da oštećenja površine uzorka RB započinju pojavom mnoštva sitnih jamica u blizini već postojećih mehura, slika 4.9.a.

Daljom ekspozicijom, veličina i broj jamica se povećavaju i na pojedinim mestima jamice se međusobno spajaju i formiraju veće i dublje jamice koje oštećuju površinu uzorka, 4.9.b. Oštećenje površine nastaje povećanjem brzine gubitka mase rovnog bazalta sa površine bez pojave deformacije površine, slika 4.9.c. Za 120 min delovanja kavitacije gubitak mase rovnog uzorka bio je 88,5 mg, kao što je prikazano u tabeli 4.1 i na slici 4.1. Uklanjanje mase sa površine uzoraka izazvalo je produbljenje već postojećih jamica, formiranje novih jamica, njihovo širenje i/ili spajanje u veće i dublje jamice, slika 4.9.d.

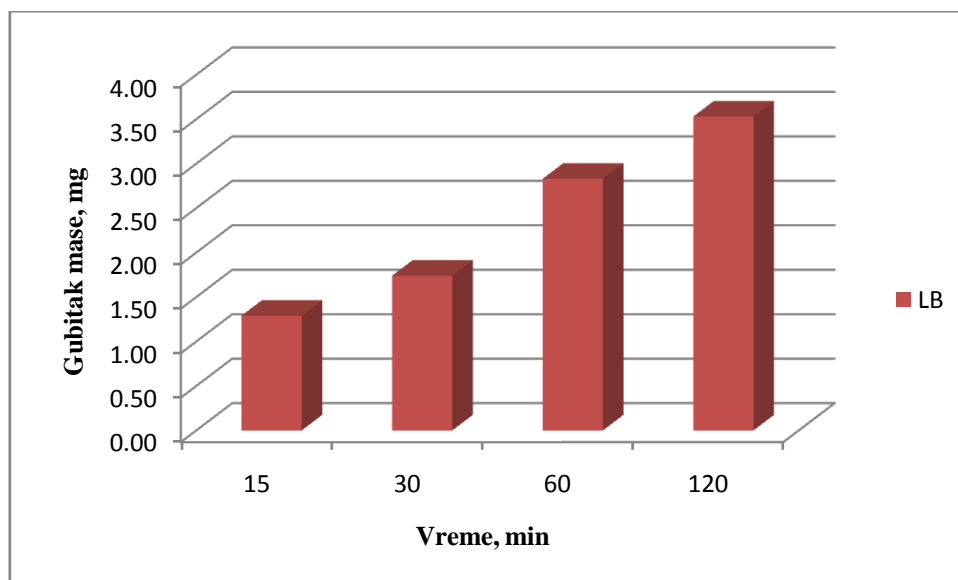
4.2. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka livenog bazalta (serija: LB)

4.2.1 Promena mase uzorka LB i određivanje kavitacione brzine

Rezultati merenja gubitka mase uzoraka LB pod dejstvom kavitacije u toku vremena ispitivanja prikazani su u tabeli 4.5 i na slici 4.10.

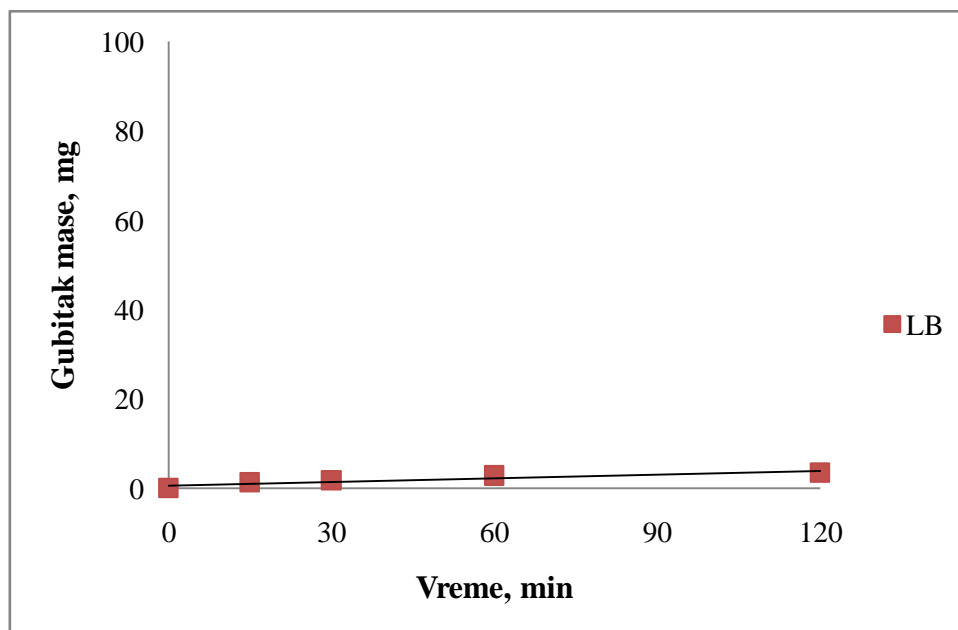
Tabela 4.5. Rezultati merenja gubitka mase uzoraka LB pod dejstvom kavitacije, (g)

Vreme (min)	15	30	60	120
Gubitak mase uzorka LB, (g)	1,29	1,74	2,83	3,53



Slika 4.10. Gubitak mase uzoraka LB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Procesi topljenja bazalnog agregata, livenja u peščane kalupe sa termičkim tretmanom u cilju dobijanja željene strukture i smanjenja unutrašnjih naprezanja, pokazali su se efikasnim za dobijanje uzoraka LB povišenih svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije. Osnovni oksidi koji pri topljenju određuju kvalitet rastopa bazalta (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO) prisutni su u ispitivanim bazaltnim stenama, a promena režima toplotne obrade, dovela je do pojave različitih kristalnih faza, različitog udela i sastava staklaste faze, različitih mikrostruktura, pri čemu su dobijeni i uzorci staklo-keramike različitih svojstava. Zahvaljujući kompaktnoj strukturi staklo-keramike na bazi bazalta (uzorci LB, slika 3.13, poglavlje 3) evidentiran je visok stepen otpornosti na dejstvo kavitacije sa kavitacionom brzinom 0,03 mg/min, slika 4.11.



Slika 4.11. Kavitaciona brzina uzorka LB u funkciji vremena ispitivanja.

Analizom progresije erozije uzoraka LB može se zaključiti da je gubitak mase mali, u prvih 15 min gubitak mase je 1.29 mg i blago se povećava do gubitka mase od 3.53 mg za 120 min ekspozicije.

4.2.2 Analiza slike

Na slici 4.12 prikazane su makrofotografije uzoraka LB sa odgovarajućim linijama profila dobijenim analizom slike, kao i SEM mikrofotografije karakterističnih erodiranih površina uzoraka nastalih tokom ispitivanja pod dejstvom kavitacije. Konstatovano je da se kod uzorka LB javlja malo oštećenje površine. Jamice koje su postojale na površini uzorka pre ispitivanja gotovo da ne menjaju dimenzije.

T, min	Fotografije uzoraka LB	Linije profila	SEM mikrofotografije erodiranih površina uzoraka LB (500x levo; 2000x desno)	
0				
15				
30				
60				
120				

Slika 4.12. Fotografije uzoraka LB pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike i SEM mikrofotografije erodiranih površina [248].

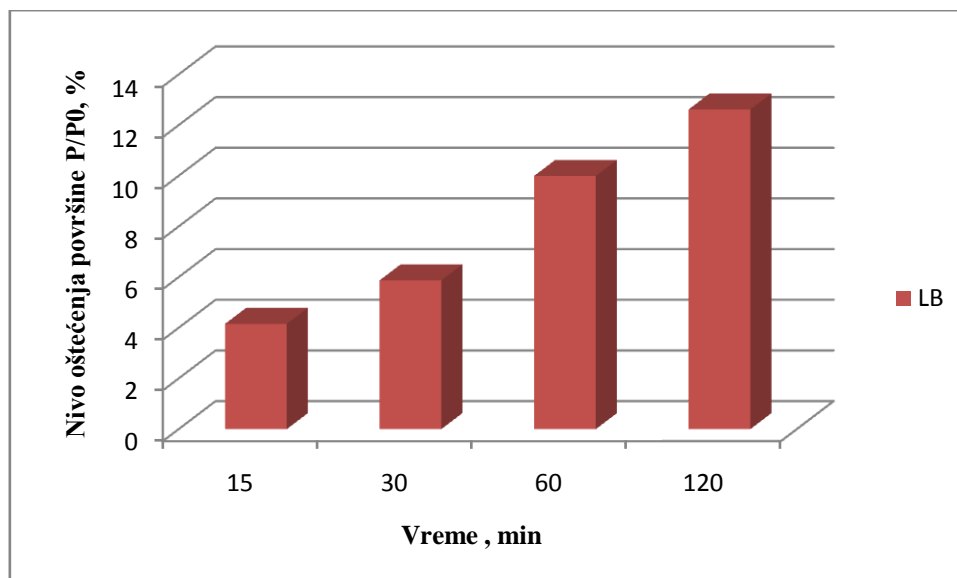
Linije profila uzoraka LB su ravnomerne. Pojedinačni pikovi, koji su prisutni na istim mestima, odnose se na prisutne pojedinačne jamice na površini uzorka, uzrokovane prisustvom mehura u strukturi, koje su identifikovane pre početka ispitivanja [248].

Rezultati prezentovani na slici 4.12 odgovaraju rezultatima oštećenja površine uzoraka LB određenih analizom slike makrofotografija površina uzoraka LB tokom vremena delovanja kavitacije i to:

- nivo degradacije površine uzoraka P/P_0 , %, prikazano u tabeli 4.6 i na slici 4.13;
- broj formiranih jamica N_p , prikazano u tabeli 4.7 i na slici 4.14;
- srednja površina formiranih jamica P_{av} , mm^2 , prikazano u tabeli 4.8 i na slici 4.15.

Tabela 4.6. Nivo oštećenja površine uzoraka LB pod dejstvom kavitacije

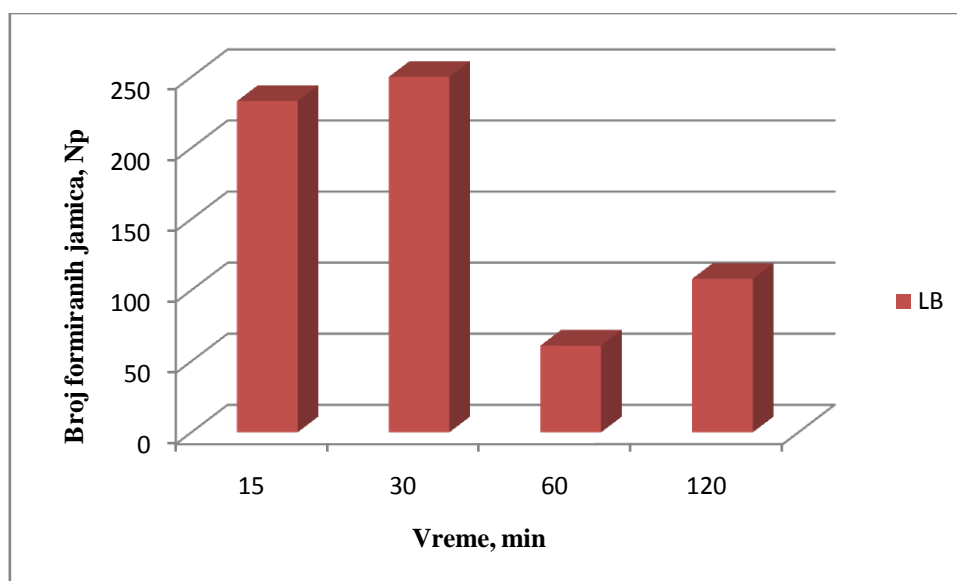
Vreme (min)	15	30	60	120
Oštećenje površine uzoraka LB, P/P_0 (%)	4,154858	5,871058	9,992779	12,017999



Slika 4.13. Nivo oštećenja površine uzoraka LB tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.

Tabela 4.7. Broj formiranih jamica N_p za uzorke LP pod dejstvom kavitacije

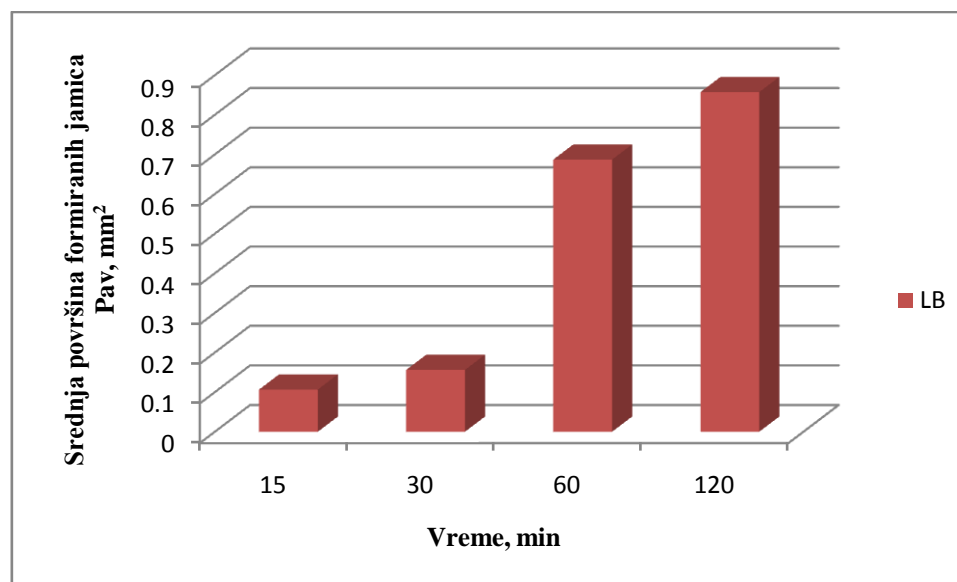
Vreme (min)	15	30	60	120
Broj formiranih jamica, N_p za uzorak LB	233	250	51	100



Slika 4.14. Broj formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak LB.

Tabela 4.8. Srednja površina formiranih jamica P_{av} (mm^2) za uzorke LB

Vreme (min)	15	30	60	120
Srednja površina formiranih jamica, P_{av} , mm^2 za uzorak LB	0,067121	0,145945	0,6871832	0,856925



Slika 4.15. Srednja površina formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak LB.

Na kraju vremena ispitivanja od 120 min kod uzoraka LB uočene su male promene na površini uzorka, sa malim brojem sitnih jamica, slika 4.12. To odgovara i rezultatima postepenog gubitka mase uzorka tokom ispitivanja, tabela 4.5 i slika 4.10. Na kraju ispitivanja pod dejstvom kavitacije oštećenje površine uzoraka LB je 12%, tabela 4.6 i slika 4.13. To odgovara rezultatima određivanja broja formiranih jamica, N_p i srednje površine formiranih jamica, P_{av} , prikazano u tabelama 4.7 i 4.8, kao i na slikama 4.14 i 4.15, respektivno.

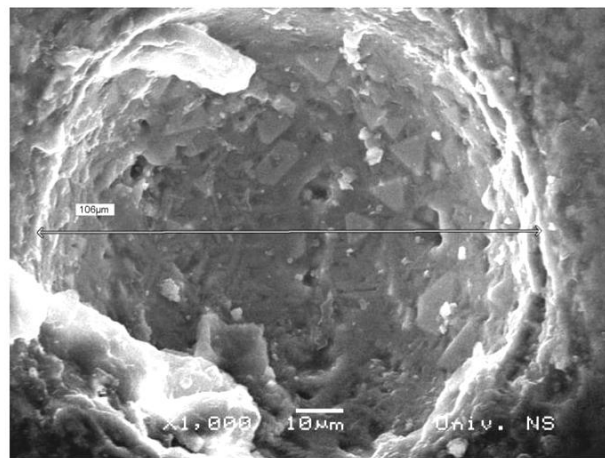
Kod uzoraka LB prisutne su pojedinačne veće i manje jamice na površini uzorka pre početka delovanja kavitacije, (slika 4.12, za vreme $t=0$ min). Na uzorcima LB ne uočavaju se veće promene površine posle 30 i 60 min delovanja procesa kavitacije. U početku delovanja kavitacije, do 30 min, formira se veoma mali broj sitnih novih jamica, do 60 min broj jamica naglo opada, usled njihovog međusobnog spajanja, od 60-120 min ekspozicije blago se povećava broj formiranih jamica, prikazano u tabeli 4.7 i slika 4.14. Pri tome postepeno raste srednja površina formiranih jamica, tabela 4.8 i slika 4.15. Analiza slike uzoraka LB pokazala je da se početne jamice na površini uzorka, nastale najverovatnije usled prisustva mehura u

strukturi, ne menjaju tokom ekspozicije, što se vidi i na fotografijama površina uzoraka LB tokom ispitivanja, slika 4.12. Stvaranje manjeg broja sitnih jamica manje oštećuje površinu, tako da je nakon 120 min delovanja kavitacije oštećenje površine uzoraka LB ispod 12%, slika 4.13.

4.2.3 Promena morfologije oštećenja površine uzoraka

Na slici 4.16 prikazani su mehuri prisutni u strukturi uzoraka LB. Prisutan je manji broj mehura uklopljenih u kriptokristalastu-staklastu strukturu bazalta, a ispunjeni su staklom ili vazduhom.

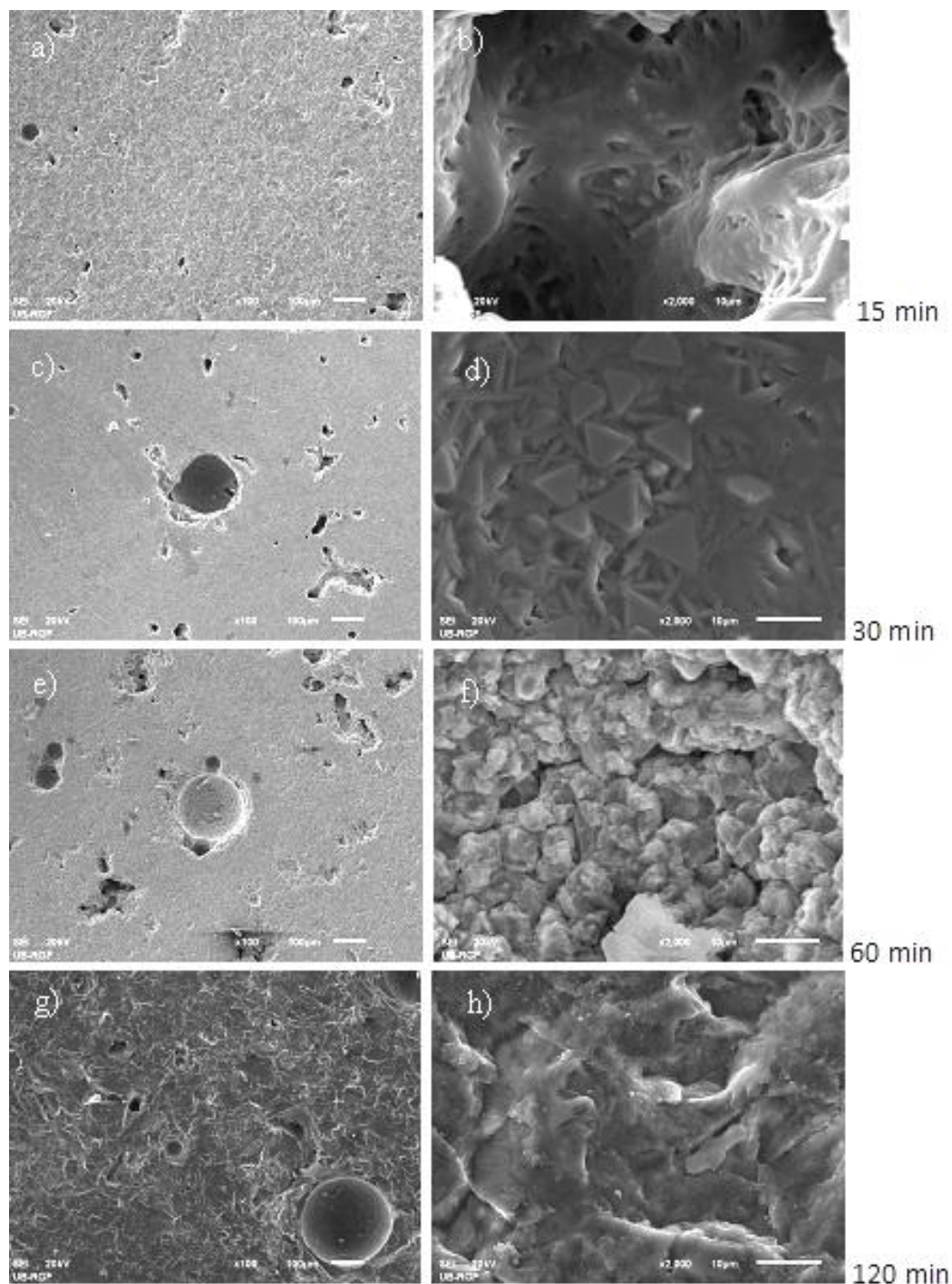
Tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije praćen je uticaj prisutnih mehura u strukturi na svojstva otpornosti uzoraka LB. Kompaktna struktura livenog bazalta sa termički izmenjenim kristalima prisutnih minerala plagioklasa, piroksena i neprovidnih minerala, kao i velika tvrdoća bazalta [114, 169, 174-176, 256], doprineli su povećanju otpornosti uzoraka LB prema dejstvu kavitacije.



Slika 4.16. Prisutni mehuri u strukturi uzorka LB većih dimenzija (početno stanje)[248].

Posebna pažnja tokom ispitivanja posvećena je praćenju promena prisutnih jamica na površini uzorka LB lociranih u blizini mehura.

Kod uzoraka LB sitne jamice formirane na površini uzoraka nakon 15-30 min delovanja kavitacije veoma malo su menjale oblik i dimenzije do kraja ispitivanja. Promena morfologije površine uzoraka LB sa vremenom ispitivanja praćena je primenom skenirajuće elektronske mikroskopije, slika 4.17.

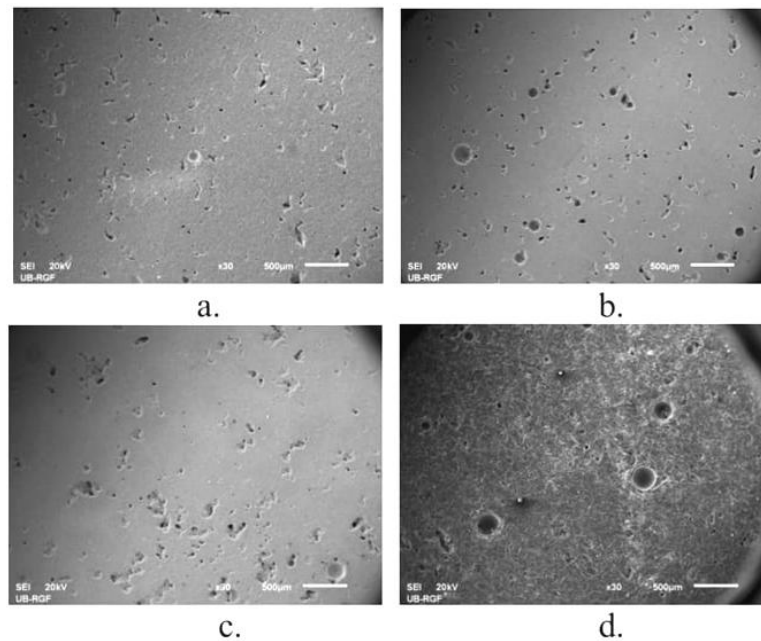


Slika 4.17. SEM mikrofotografije erodiranih površina uzorka LB sa različitim uvećanjima (100× levo, 2000× desno) i vremenima dejstva kavitacije: (a, b) 15 min; (c, d) 30 min; (e, f) 60 min; (g, h) 120 min [248].

Na početku ispitivanja, za 15 min delovanja kavitacije nije došlo do značajnijih promena površine uzorka. Postojeće jamice na površini su uzrokovane mehurima u osnovi bazalta (slika 4.17.a,b). Delovanjem kavitacije u toku 30 min došlo je do malih promena površine uzoraka, slika 4.17.c. Postojeći mehuri u kriptokristalastoj strukturi uzorka LB ispunjeni su

staklastom masom (slika 4.17.d). Delovanjem kavitacije 60 min javlja se promena površine jamica ispunjenih sa staklastom masom, slika 4.17.e,f. Na kraju ispitivanja, vreme 120 min, pojavila se erozija jamice u blizini postojećeg mehura u osnovi bazalta, slika 4.17.g, h.

Tokom istraživanja nastajanja i razvoja oštećenja livenog bazalta pod dejstvom kavitacije posebna pažnja posvećena je proučavanju mehanizma formiranja jamica, njihovog rasta i/ili spajanja u veće i dublje jamice, slika 4.18.



Slika 4.18. Nastajanje i razvoj oštećenja livenog bazalta pod dejstvom kavitacije (uvećanje 30×) [252].

Na površini uzorka u prvih 15 min delovanja kavitacije stvaraju se sitne, plitke jamice u blizini već postojećih mehurova u osnovi bazalta, slika 4.18.a. Za 30 min delovanja kavitacije formiraju se nove sitne jamice, povećavaju se već postojeće jamice u blizini mehurova, slika 4.18.b. Za 60 min delovanja kavitacije povećava se broj novih formiranih jamica; već formirane jamice malo menjaju oblik i dimenzije, slika 4.18.c. Na kraju ispitivanja, nakon 120 min delovanja kavitacije, i dalje se formiraju male jamice u blizini postojećih mehura, slika 4.18.d. Vide se tri veća mehura na površini uzorka, najverovatnije nastala u fazi očvršćavanja livenog bazalta i mnoštvo malih jamica nastalih tokom izlaganja uzorka dejstvu kavitacije, koje, kako se pokazalo, ne oštećuju mnogo površinu. Ukupan nivo oštećenja površine uzoraka LB na kraju ispitivanja je 12%. Na osnovu vednosti kavitacione brzine (0,03 mg/min) i analize morfologije oštećenja površine može se zaključiti da uzorci LB imaju veliku otpornost na dejstvo kavitacije.

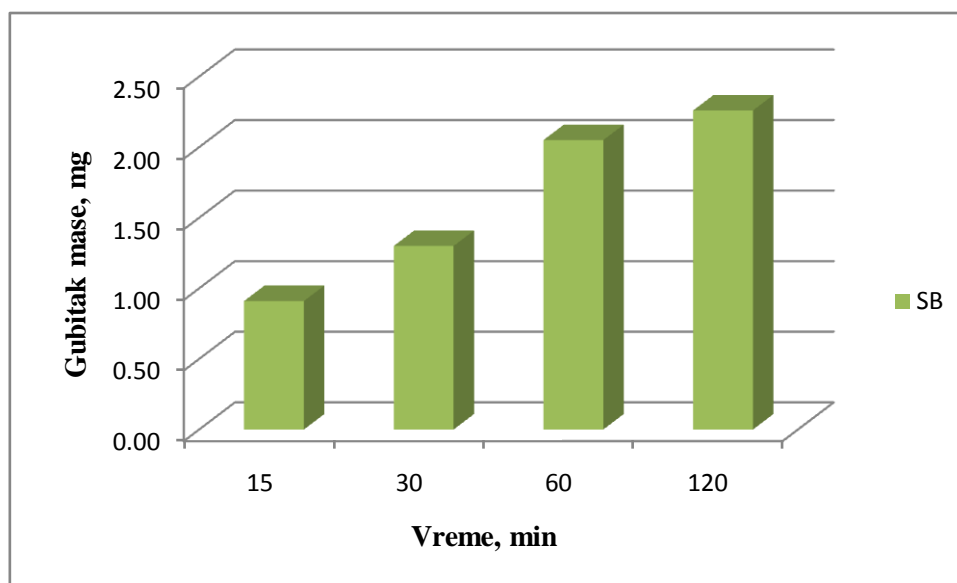
4.3. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka sinterovanog bazalta (serija: SB)

4.3.1. Promena mase uzorka SB i određivanje kavitacione brzine

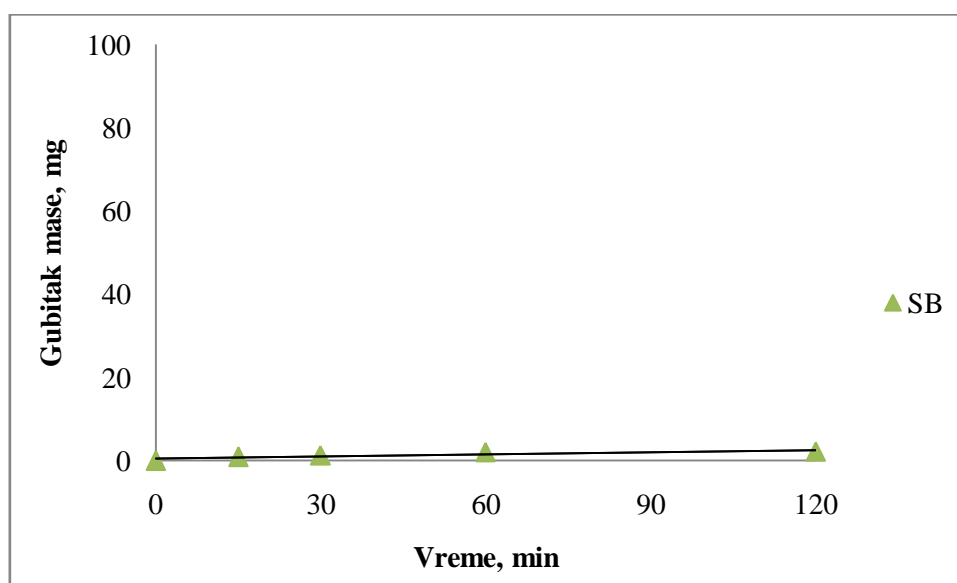
Gubitak mase uzorka SB pod dejstvom kavitacije u toku vremena ispitivanja prikazan je u tabeli 4.9 i na slici 4.19. Evidentiran je visok stepen otpornosti na dejstvo kavitacije sa kavitacionom brzinom 0,02 mg/min, slika 4.20.

Tabela 4.9. Rezultati merenja gubitka mase pod dejstvom kavitacije za uzorke SB, (g)

Vreme (min)	15	30	60	120
Gubitak mase uzorka SB, (g)	0,91	1,30	1,95	2,26



Slika 4.19. Gubitak mase uzorka SB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.



Slika 4.20. Kavitaciona brzina uzorka SB u funkciji vremena ispitivanja.

Analizirajući progresiju erozije uzoraka SB može se zaključiti da je gubitak mase mali: u prvih 15 min delovanja kavitacije gubitak mase je 0,19 mg i blago se povećava do gubitka mase od 2.26 mg tokom 120 min izlaganja.

4.3.2. Analiza slike

U cilju praćenja promena površine uzoraka pod dejstvom kavitacije, uzorci SB su fotografisani pre, tokom i na kraju izlaganja dejstvu kavitacije, slika 4.21.

T, min	Fotografije uzoraka SB	Linije profila	SEM mikrofotografije erodiranih površina uzoraka SB (500x left; 2000x right)	
0				
15				
30				
60				
120				

Slika 4.21. Fotografije uzoraka SB pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike i SEM mikrofotografije erodiranih površina [249].

U uzorcima SB, pre početka ispitivanja na dejstvo kavitacije, prisutni su pojedinačni mehuri u osnovi bazalta, kao i manji broj sitnih jamica na površini uzoraka (uzorak SB za vreme $t=0$

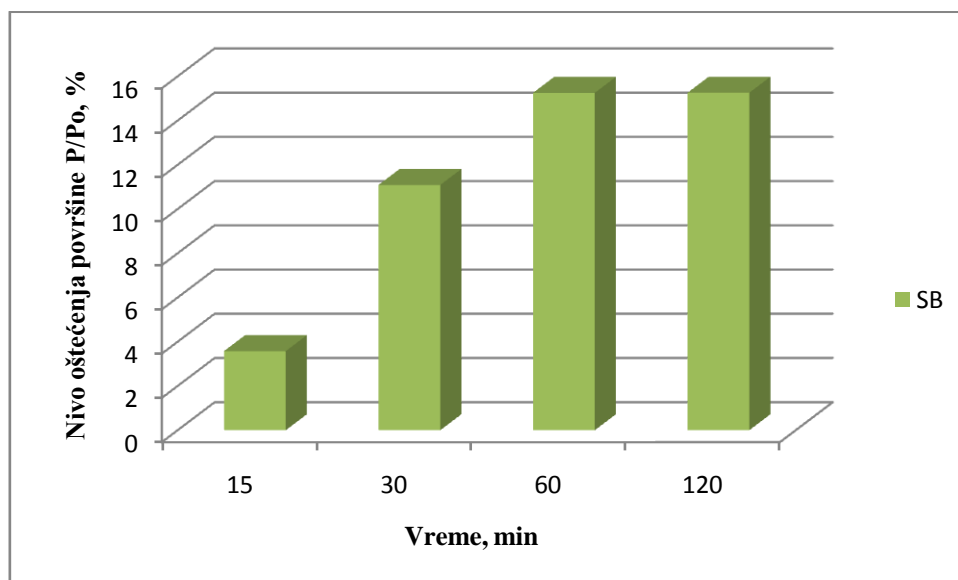
min, slika 4.21). Mali gubitak mase uzoraka SB, slika 4.19 i mali nivo oštećenja površine pod dejstvom kavitacije može se tumačiti homogenom i kompaktnom strukturom uzoraka. U strukturi sinterovanog bazalta prisutni su ravnomerno raspoređeni kristali plagioklasa i piroksena u osnovnoj masi uzorka, slika 3.16, poglavlje 3. Takođe, prisutan je manji broj pojedinačnih mehura većih dimenzija koji su ugrađeni u kriptokristalastu osnovu uzorka, slika 3.17. Tokom ispitivanja pod dejstvom kavitacije praćena je promena prisutnih mehura sadržanih u osnovi uzorka SB, kao i ponašanje postojećih jamica na površini uzoraka. Početne jamice na površini uzorka najverovatnije su uzrokovane prisustvom mehura u strukturi i one se ne menjaju tokom ispitivanja. Linije profila uzoraka SB su ravnomerne, a pojedinačni pikovi, koji se pojavljuju na istim mestima, odnose se na prisustvo jamica i mehura prisutnih u strukturi pre ispitivanja, slika 4.21.

Rezultati intenziteta razaranja materijala, prikazani na slici 4.19, odgovaraju rezultatima dobijenim analizom slike fotografija uzoraka SB tokom vremena delovanja kavitacije i to:

- nivo degradacije površine uzoraka P/P_0 , %, prikazani u tabeli 4.10 i na slici 4.22;
- broj formiranih jamica N_p , prikazani u tabeli 4.11 i na slici 4.23;
- srednja površina formiranih jamica P_{av} , mm^2 , prikazani u tabeli 4.12 i na slici 4.24.

Tabela 4.10. Nivo oštećenja površine uzorka SB, P/P_0 , (%)

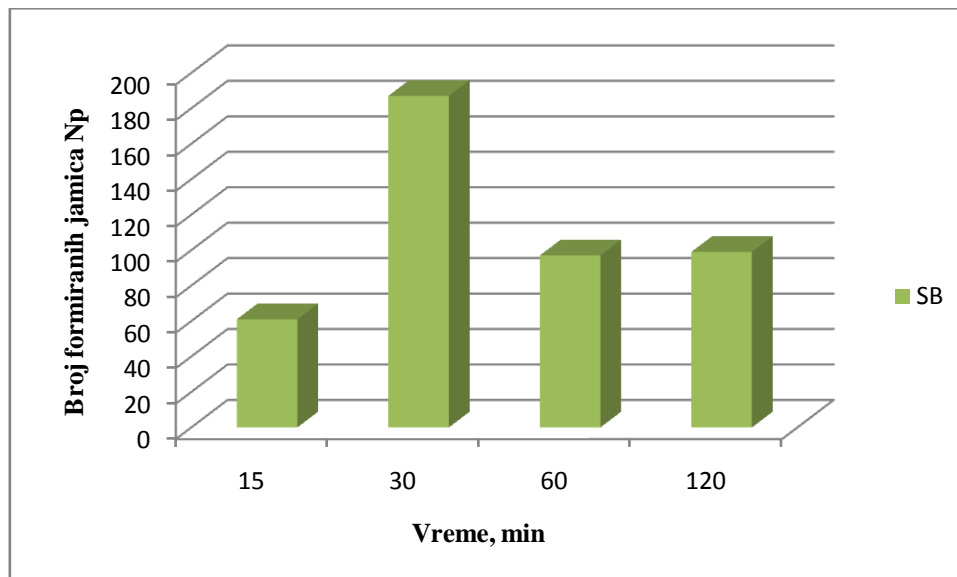
Vreme (min)	15	30	60	120
Oštećenje površine uzoraka SB, P/P_0 , (%)	3,575778	10,98998	13,925373	15,060959



Slika 4.22. Nivo oštećenja površine uzoraka SB tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.

Tabela 4.11. Broj formiranih jamica N_p pod dejstvom kavitacije za uzorak SB

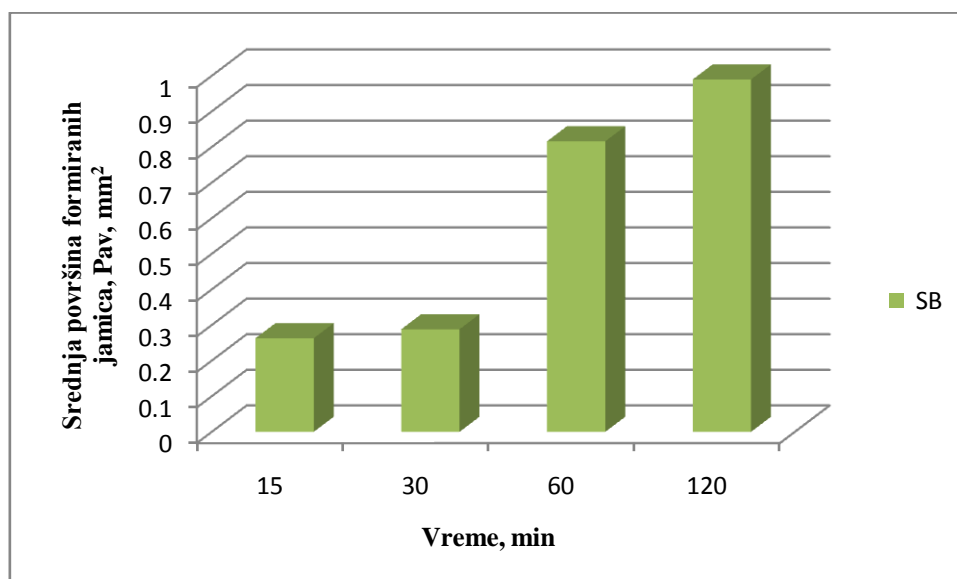
Vreme (min)	15	30	60	120
Broj formiranih jamica, N_p za uzorak SB	61	187	97	99



Slika 4.23. Broj formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak SB.

Tabela 4.12. Srednja površina formiranih jamica P_{av} (mm^2) za uzorak SB

Vreme (min)	15	30	60	120
Srednja površina formiranih jamica, P_{av} , mm^2 za uzorak SB	0,262943	0,289056	0,815965	0,918391

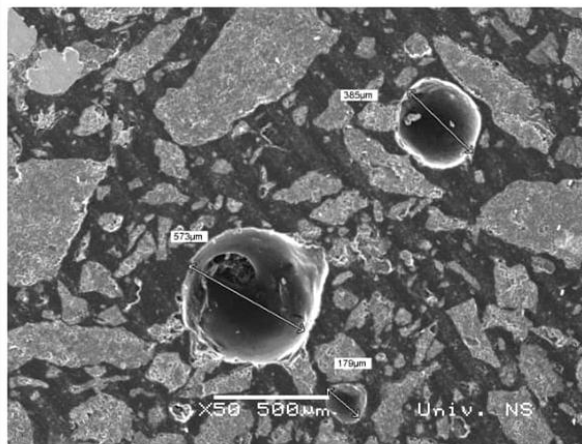


Slika 4.24. Srednja površina formiranih jamica tokom procesa kavitacije za uzorak SB.

Na kraju ispitivanja, posle 120 min, uočene su male promene na površini uzoraka SB u odnosu na početno stanje, sa malim brojem sitnih jamica. Ovo odgovara rezultatima postepenog gubitka mase uzoraka, prikazano u tabeli 4.9 i na slici 4.19. Ukupno oštećenje površine uzoraka SB je 15 %; broj formiranih jamica, N_p , je ispod 100; srednja površina formiranih jamica, P_{av} je $0,9 \text{ mm}^2$, prikazano u tabelama 4.10 - 4.12 i na slikama 4.22-4.24, respektivno.

4.3.3 Promena morfologije oštećenja površine uzoraka

Na slici 4.25 prikazani su mehuri prisutni u strukturi uzoraka SB. Prisutan je manji broj mehura uklopljenih u kriptokristalastu-staklastu strukturu bazalta, a ispunjeni su staklom ili vazduhom.

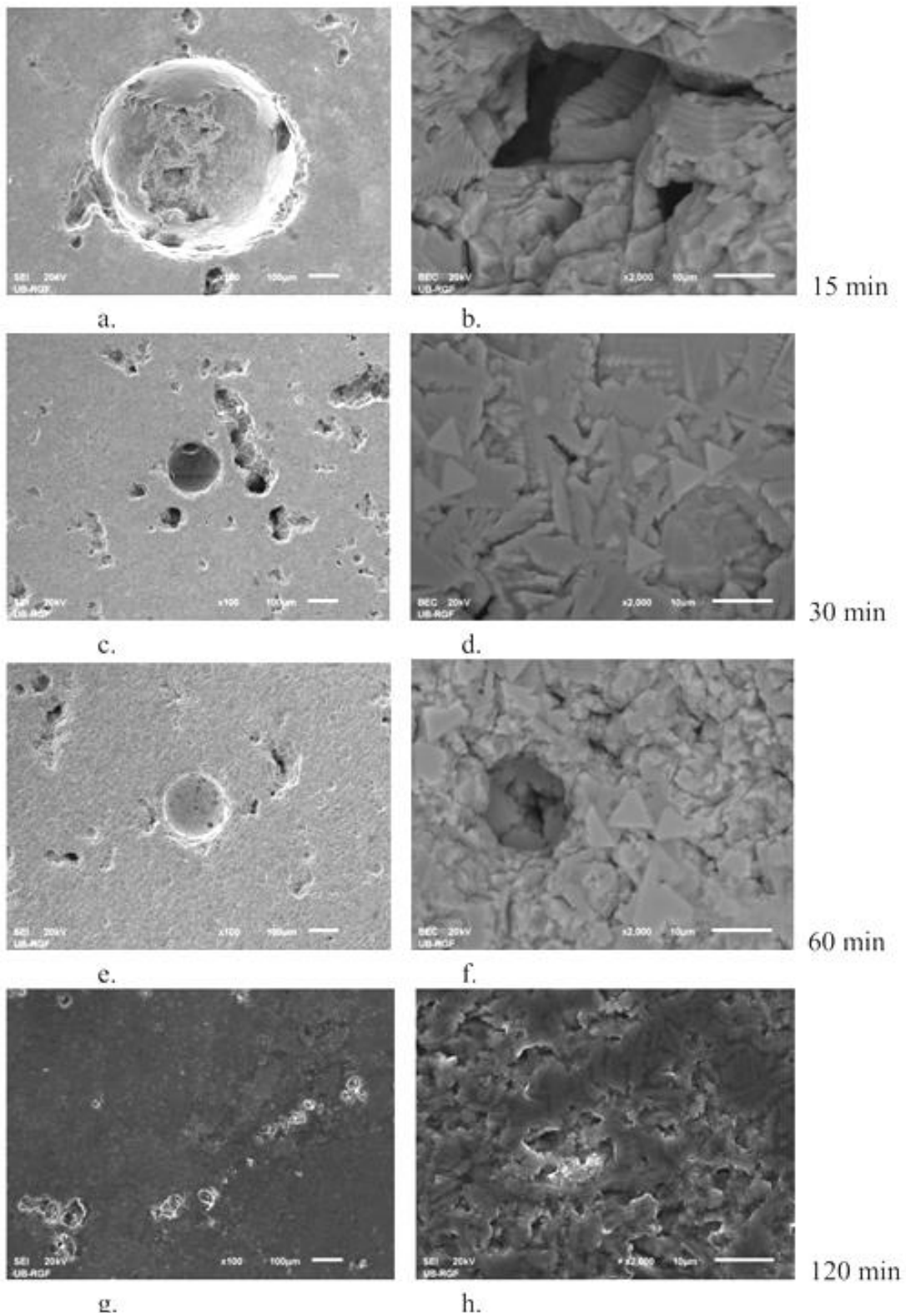


Slika 4.25. Prisutni mehuri u strukturi uzorka SB većih dimenzija (početno stanje).

Tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije praćen je uticaj prisutnih mehura u strukturi na svojstva otpornosti uzoraka SB. Kompaktna struktura sinterovanog bazalta sa ravnomerno raspoređenim kristalima prisutnih minerala plagioklasa i piroksena, kao i velika tvrdoća bazalta [164, 174-176, 256], doprineli su povećanju otpornosti uzoraka SB prema dejstvu kavitacije.

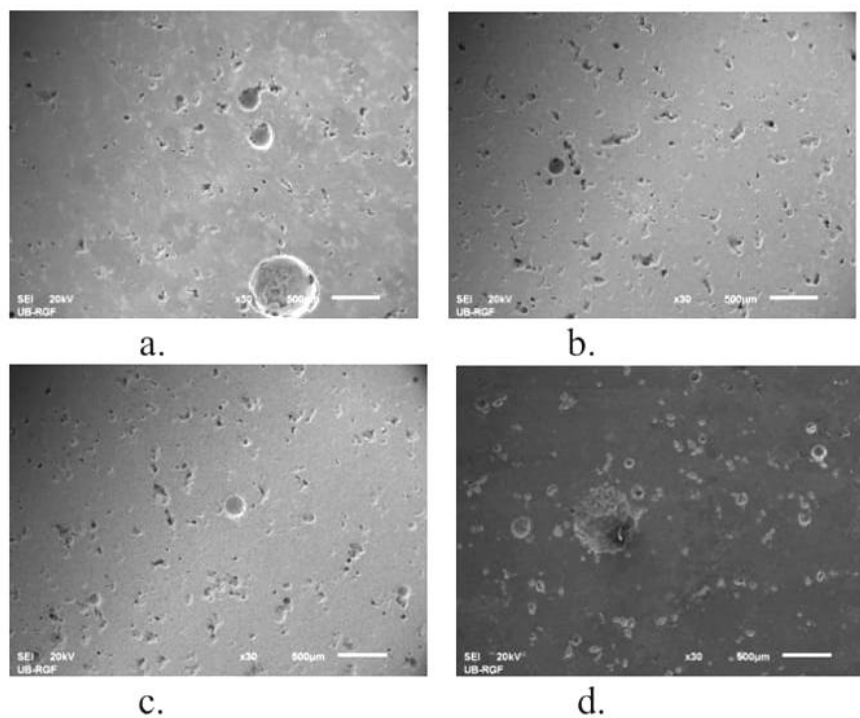
Promena morfologije površine uzoraka SB sa vremenom ispitivanja praćena je primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa, slika 4.26 [249].

Slika 4.26.a,b prikazuje veoma malo nastajanje oštećenja na površini uzorka SB za prvih 15 min. Mehuri prisutni u strukturi bazalta pre kavitacije imaju reljefnu površinu, slika 4.26.a. Za prvih 15 min konstatovan je i veoma mali gubitak mase uzorka, slika 4.19.



Slika 4.26. SEM mikrofotografije erodiranih površina uzorka SB sa različitim uvećanjima (100x levo, 2000x desno) i vremenima dejstva kavitacije: (a, b) 15 min; (c, d) 30 min; (e, f) 60 min; (g, h) 120 min [249].

Za 30 min ekspozicije razvija se malo oštećenje površine, slike 4.26.c,d. Formiranje jamica se odvija u blizini postojećih mehura, (slika 4.26.c), kao i unutar mehura (slika 4.26.d). Unutrašnja površina mehura malo je promenjena, slika 4.26.d. Daljim delovanjem kavitacije do 60 min postepeno se razvija oštećenje formiranih jamica na površini uzorka i unutar mehura, slika 4.26.e,f. Broj jamica na površini je povećan, slika 4.26.e, a povećano je i oštećenje površine unutar mehura, slika 4.26.f. Nakon 120 min delovanja kavitacije broj jamica je smanjen usled njihovog spajanja u veće jamice, slika 4.26.g,h. To se vidi i iz rezultata povećanja srednje površine formiranih jamica (slika 4.24). Manja oštećenja površine mehura se nastavljaju, što odgovara i rezultatima manjeg gubitka mase i nivoa oštećenja površine, prikazanim u tabelama 4.9 i 4.10 i na slikama 4.19 i 4.22, respektivno. Nastajanje i razvoj oštećenja sinterovanog bazalta pod dejstvom kavitacije sa izgledom gasnih mehurova i jamica na površini uzoraka, prikazano je na slici 4.27.



Slika 4.27. Nastajanje i razvoj oštećenja površine uzorka SB: promena jamica i površine mehurova pod dejstvom kavitacije [249].

Na slici 4.27a,b vidi se da pojava jamica nastaje u blizini postojećih mehura na površini uzorka i da se razvoj oštećenja površine uzorka odvija postepenim gubitkom mase uzorka, formiranjem sitnih jamica i njihovim spajanjem u veće i dublje jamice. Formirane jamice tokom izlaganja dejstvu kavitacije postepeno se spajaju u veće i dublje jamice, slika 4.27.c.

Na površini već postojećih mehura javljaju se male promene usled formiranja novih manjih jamica pod dejstvoma kavitacije, pri 120 min ekspozicije, slika 4.27.d [249]. Na osnovu vednosti kavitacione brzine (0,02 mg/min) i analize morfologije oštećenja površine uzoraka može se zaključiti da uzorci SB imaju veliku otpornost na dejstvo kavitacije.

4.4. Poređenje svojstava otpornosti na oštećenja vatrostalnih uzoraka na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije (uzorci: RB; LB; SB)

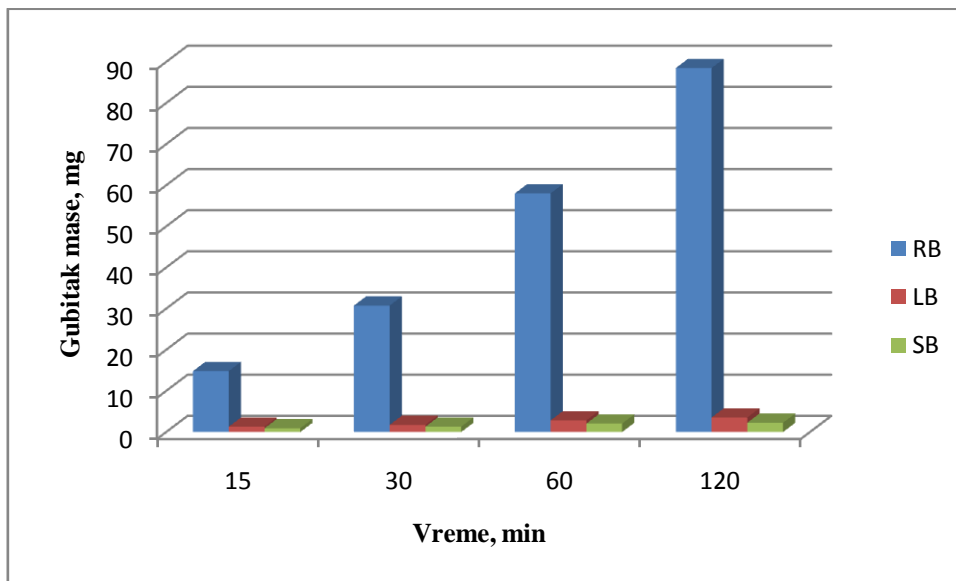
Poređenje je obavljeno prema kriterijumima: vrednost kavitacionih brzina (gubitak mase uzoraka u vremenu ekspozicije) i analize morfologije oštećenja površine uzoraka (nastajanje i razvoja oštećenja površine uzoraka formiranjem jamica, njihovim povećanjem i/ili spajanjem u veće i dublje jamice; promena srednje površine formiranih jamica; povećanje hrapavosti površine). Pri tome istraživanja su vođena pri istim geometrijskim karakteristikama uzoraka; istom načinu njihove pripreme, kao i istim uslovima testiranja primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom.

Posebna pažnja posvećena je pregledu površina uzoraka pre izlaganja procesu kavitacije i identifikaciji oštećenja površine uzrokovanih prisustvom mehurova uklopljenih u strukturu uzoraka bazalta. Takođe, pažnja je posvećena otkrivanju jamica nastalih tokom ispitivanja, njihovom razvoju i određivanju njihovih karakteristika. Nastajanje i razvoj oštećenja površine tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije praćeno je primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa.

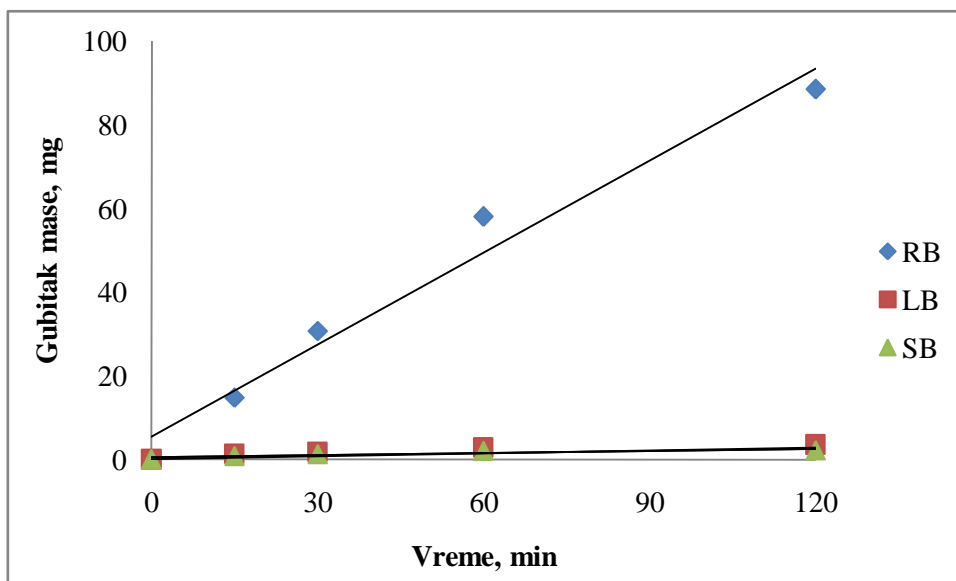
Pregledom površine uzoraka RB, LB, SB pre izlaganja dejstvu kavitacije, primećena su različita oštećenja na ograničenim oblastima, najčešće oko postojećih mehurova u strukturi. Kod uzoraka RB konstatovana su veća oštećenja, sa većim brojem jamica, slika 4.3. Na uzorcima LB i SB, pre početka testiranja, konstatovana su mala oštećenja površine u blizini mehurova, slike 4.12 i 4.21, respektivno.

Prema podacima o gubitku mase uzoraka RB, LB, SB prikazanim u tabelama 4.1; 4.5.; 4.9., dijagrama na slici 4.28, zatim dijagrama kavitacionih brzina uzoraka, prikazano na slici 4.29 (sa vrednostima kavitacionih brzina: 0,74 mg/min RB; 0,03 mg/min LB i 0,02mg/min SB), kao i analizi morfologije oštećenja površine uzoraka prikazanim na slikama 4.8, 4.17 i 4.26, respektivno, vidi se da najmanju otpornost na oštećenja pod dejstvom kavitacije pokazuju uzorci RB. Znatno veću otpornost na oštećenja pod dejstvom kavitacije pokazuju uzorci LB i

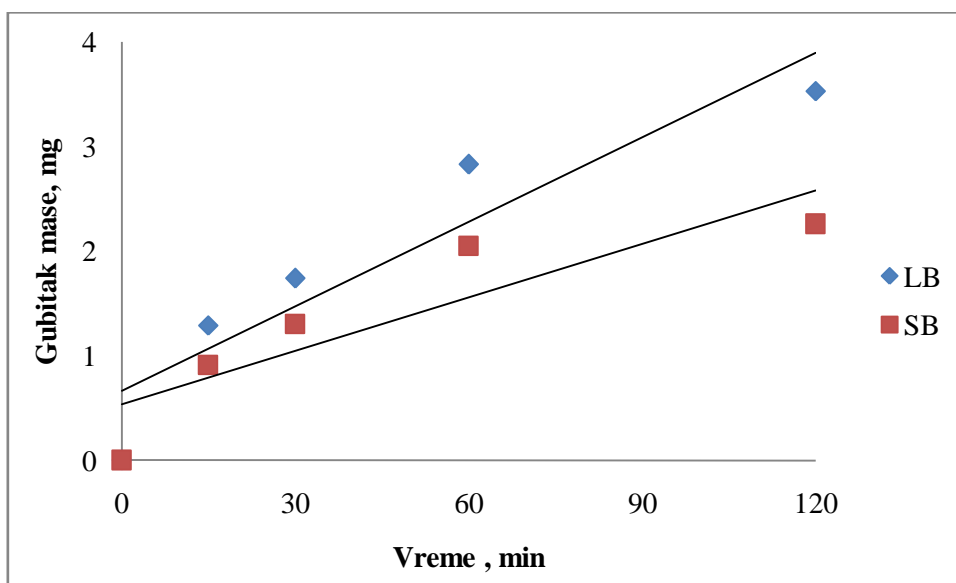
SB, slika 4.30. To je u saglasnosti sa rezultatima određivanja nivoa oštećenja površine uzoraka prikazanih u tabelama 4.2; 4.6; 4.10 i dijagramu na slici 4.31.



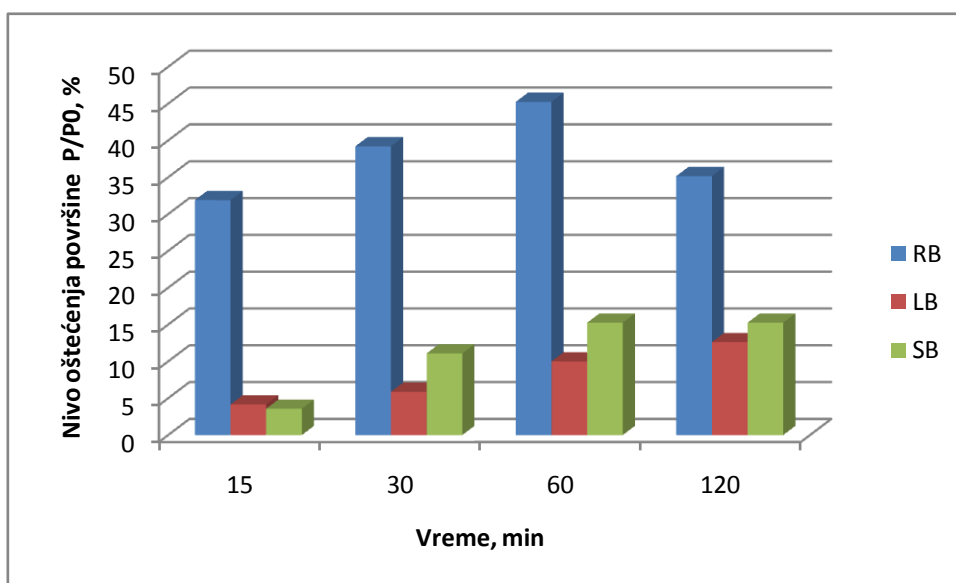
Slika 4.28. Gubitak mase uzoraka RB, LB, SB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.



Slika 4.29. Kavitacione brzine uzoraka na bazi bazalta: rovni bazalt; liveni bazalt i sinterovani bazalt.



Slika 4.30. Kavitacione brzine uzoraka livenog i sinterovanog bazalta.



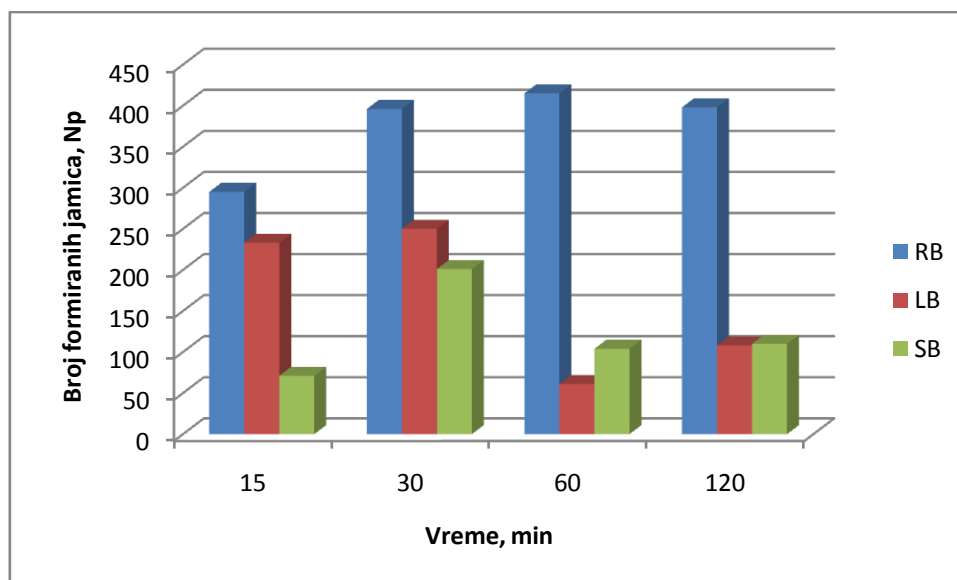
Slika 4.31 Nivo oštećenja površine uzoraka RB, LB, SB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.

Na samom početku izlaganja javlja se gubitak mase uzoraka RB, preko 10 mg, a na kraju ispitivanja, za 120 min ekspozicije, gubitak iznosi 88,5 mg; oštećenje površine je 35%; kavitaciona brzina je 0,74 mg/min. Dominantan mehanizam oštećenja uzoraka RB je uklanjanje mase uzoraka sa površine bez deformacije ili promene strukture, slika 4.8.

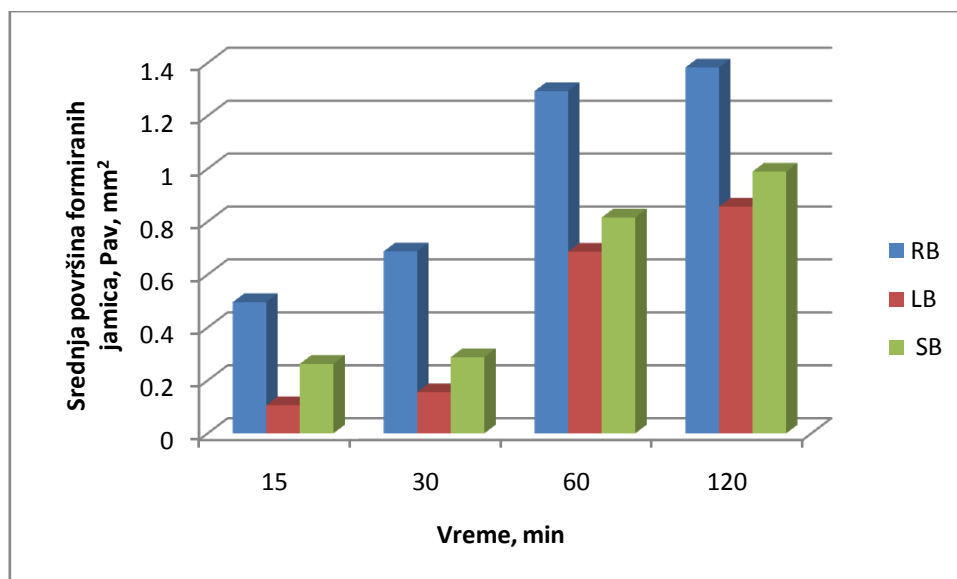
Kod uzoraka LB gubitak mase za 120 min ekspozicije je 3,53 mg, kavitaciona brzina je 0,03 mg/min, a oštećenje površine je 12 %. Jamice formirane na površini uzorka veoma malo su menjale oblik i dimenzije tokom ekspozicije, slika 4.17. Dominantan mehanizam oštećenja površine uzoraka LB je postepeno uklanjanje mase uzorka sa površine, bez deformacije ili promene strukture.

Gubitak mase uzoraka SB za 120 min ekspozicije je 2,26 mg, kavitaciona brzina je 0,02 mg/min, a nivo oštećenja površine je 15%. Oštećenja površine uzorka nastala formiranjem jamica u blizini postojećih mehurova u strukturi lagano se razvijaju. Dominantan mehanizam oštećenja uzoraka SB je gubitak mase uzorka sa površine jamica, koji se odvija malom brzinom, bez deformacije i promene strukture uzorka, slika 4.26. Zapažena je pojava jamica na površini gasnih mehura, koje se postepeno menjaju tokom ekspozicije, slika 4.26.d (30 min) i 4.26.h (120 min).

Sprovedena istraživanja su bila fokusirana na analizu nastajanja jamica u početnom periodu dejstva kavitacije, N_p (rezultati prikazani u tabelama 4.3.; 4.7.; 4.11) i promeni srednje površine formiranih jamica P_{av} , mm^2 , (rezultati prikazani u tabelama 4.4.; 4.8.; 4.12.), zajedno sa praćenjem gubitka mase uzorka do kraja ispitivanja u trajanju od 120 min. Broj formiranih jamica, N_p i promena srednje površine formiranih jamica, P_{av} , mm^2 tokom ekspozicije za uzorke RB, LB i SB prikazani su slikama 4.32 i 4.33, respektivno.



Slika 4.32. Broj formiranih jamica za uzorke RB, LB, SB tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije.



Slika 4.33. Srednja površina formiranih jamica, P_{av} za uzorke RB, LB, SB pod dejstvom kavitacije.

Uslovi ispitivanja primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom bili su isti za sve uzorke. Kod uzoraka RB gubitak mase se javlja na početku delovanja kavitacije tako da period inkubacije nije izražen. Na površini se javlja veći broj jamica već u prvih 15 min ekspozicije i njihov broj raste do kraja ispitivanja zajedno sa porastom srednje površine formiranih jamica, slike 4.32 i 4.33, respektivno. Površina RB uzoraka pre početka kavitacije bila je oštećena usled prisustva mnoštva jamica koncentrisanih oko postojećih mehura u strukturi bazalta. To je takođe doprinelo bržem nastajanju i razvoju oštećenja površine tokom ekspozicije. Povećan nivo oštećenja površine i izmereni gubitak mase pokazuju da uzorci RB imaju malu otpornost na dejstvo kavitacije.

Uzorci na bazi bazalta dobijeni procesima topljenja, livenja i termičkog tretmana (uzorci LB) pokazali su visoku otpornost na dejstvo kavitacije. U ranoj fazi procesa kavitacije stvara se veći broj sitnih jamica, često koncentrisanih u okolini postojećih mehura u strukturi bazalta [252]. Posle 30 min smanjuje se broj formiranih jamica, najverovatnije njihovim spajanjem u veće jamice, slika 4.32. Pri tome se lagano povećava srednja površina formiranih jamica, slika 4.33. Kao što je pokazano u radovima [241, 248, 253] sitne i plitke jamice manje oštećuju površine uzorka, i u ovom slučaju, kod uzoraka LB nivo degradacije površine uzorka je mali (12%), slika 4.31. Dobijeni rezultati ispitivanja pokazuju da uzorci LB imaju visoka svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije i da se mogu primeniti u uslovima visokih kavitacionih opterećenja, prikazano u radovima [248, 252, 253, 255].

Uzorci na bazi bazalta dobijeni procesom sinterovanja (uzorci SB) pokazali su, takođe visoku otpornost na dejstvo kavitacije. U ranoj fazi procesa kavitacije veoma je teško otkriti jamice

na površini uzorka. Tek posle dužeg vremena kavitacije pojedinačne male jamice se pojavljuju i taj broj se povećava proporcionalno sa vremenom, (prikazano na slici 4.32); lagano raste srednja površina formiranih jamica, (vidi se sa slike 4.33); i pri tome proces gubitka mase se odvija malom brzinom, sa malim oštećenjima na površini uzoraka, (slike 4.28 i 4.31, respektivno). Ovi uzorci pokazuju visoka svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije i mogu da se u praksi primene u uslovima gde se očekuju visoka kavitaciona opterećenja.

Prema rezultatima istraživanja uzorci LB i SB poseduju visoke vrednosti čvrstoće i tvrdoće [164, 167, 180, 225], imaju visoku otpornost na dejstvo kavitacije, sa znatno manjim oštećenjima i gubitkom mase u odnosu na uzorke RB. Ispitivani uzorci mogu da se porede i prema izmerenoj kavitacionoj brzini, koja predstavlja odnos ukupnog gubitka mase uzoraka i vremena ispitivanja prema redosledu: 0,02 mg/min uzorci SB; 0,03 mg/min uzorci LB; 0,74 mg/min uzorci RB, slike 4.29 i 4.30.

4.5. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka zaštitnih vatrostalnih premaza na bazi bazalta (serija: PP i PS)

Priprema vatrostalnih punioca na bazi bazalta za sintezu zaštitnih vatrostalnih premaza urađena je procesima mlevenja i mehaničke aktivacije bazaltnog agregata na veličinu zrna punioca prečnika 20 μm , faktora oblika zrna 0,6–0,7, prikazano u tabeli 3.2, slici 3.7 i tabeli 3.3, slici 3.8, respektivno. Tokom ispitivanja svojstava otpornosti zaštitnih premaza, praćen je gubitak mase premaza PP i PS. Za ispitivanja su korišćena po tri uzorka i prikazana je srednja vrednost gubitaka mase za svaki interval ispitivanja. Izračunate su kavitacione brzine: za uzorke PP, $v = 0,11 \text{ mg/min}$; za uzorke PS, $v = 0,04 \text{ mg/min}$.

Primenom analize slike na fotografijama površina uzoraka premaza snimljenim pre, tokom i posle ispitivanja na dejstvo kavitacije, određeni su pokazatelji otpornosti premaza na dejstvo kavitacije: nivo degradacije površine ($P/P_0, \%$), broj formiranih jamica na površini premaza (N_p); srednja površina formiranih jamica (P_{av}, mm^2).

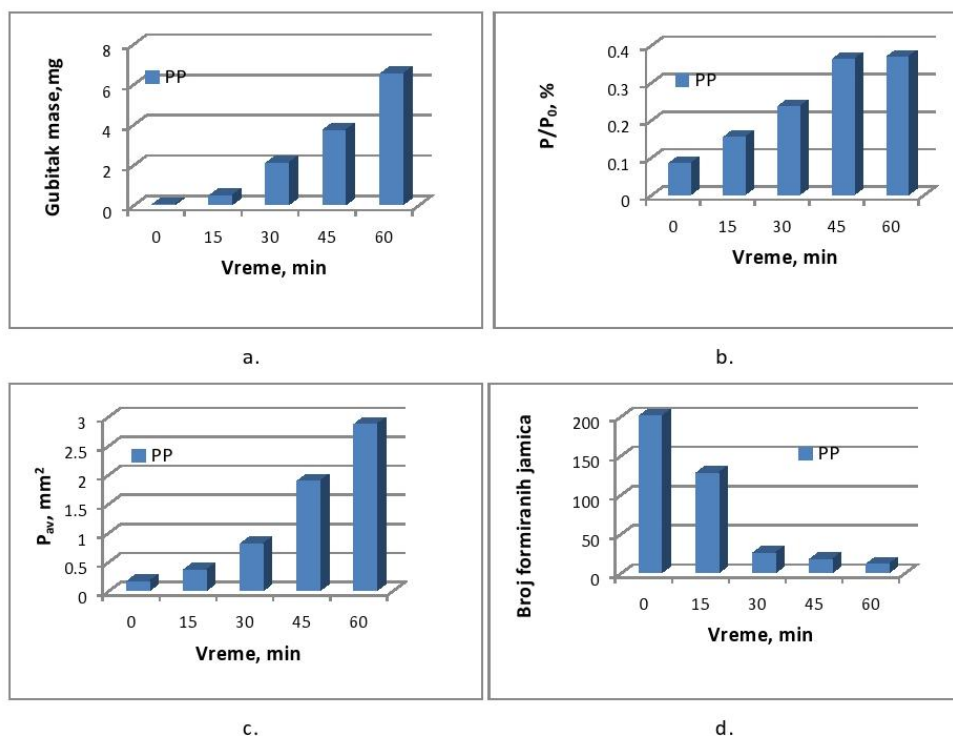
Svi dobijeni rezultati merenja gubitka mase tokom ekspozicije i rezultati kompjuterske analize slike površine uzoraka premaza serije PP u vremenu dejstva kavitacije prikazani su u tabeli 4.13 i ilustrovani su dijagramima na slici 4.34.a,b,c,d.

Svi dobijeni rezultati merenja gubitka mase tokom ekspozicije i rezultati kompjuterske analize slike površine uzoraka premaza serije PS u vremenu dejstva kavitacije prikazani su u tabeli 4.14 i ilustrovani su dijagramima na slici 4.35.a,b,c,d.

Kavitacione brzine premaza PP i PS prikazane su na dijagramu, koji pokazuje pravolinijsku zavisnost između gubitka mase i vremena ispitivanja, slika 4.36.

Tabela 4.13. Rezultati merenja gubitka mase i parametri oštećenja površine uzoraka premaza PP određeni analizom slike [242]

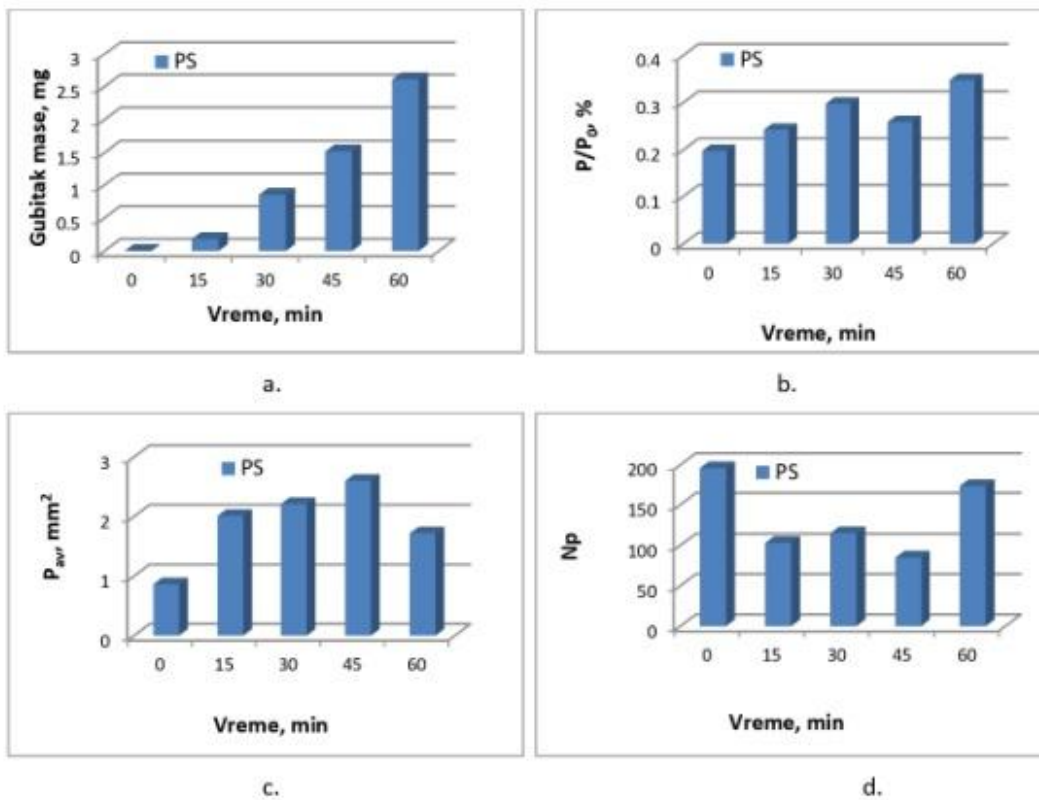
Vreme (min)	0	15	30	45	60
Gubitak mase, (mg)	-	0,44	2,06	3,70	6,48
Nivo oštećenja površine, P/P_0 (%)	0,083149	0,152652	0,234716	0,361031	0,3581175
Broj formiranih jamica, N_p	198	125	25	17	11
Srednja površina formiranih jamica, P_{av} , mm^2	0,355079	0,152652	0,801863	1,813815	2,858644



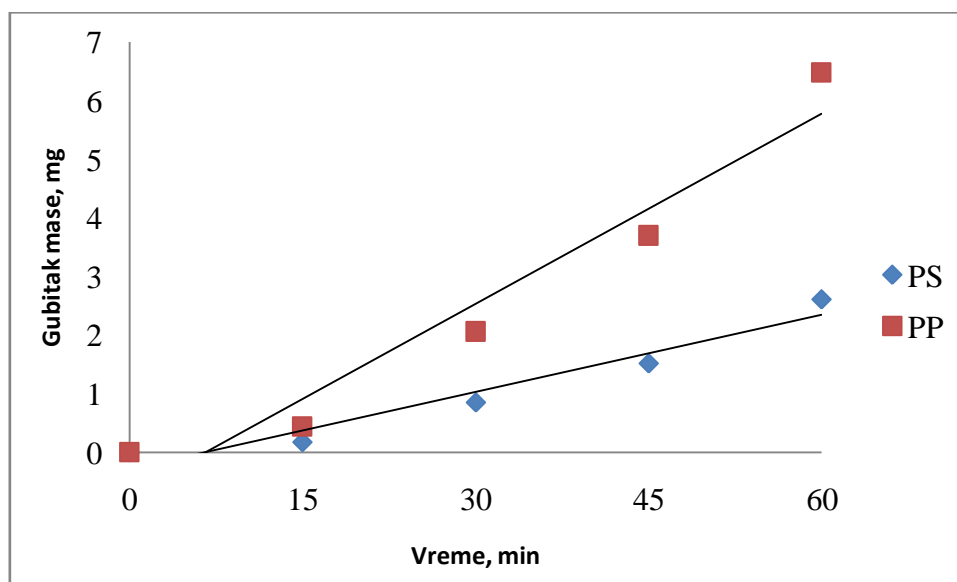
Slika 4.34. Rezultati ispitivanja premaza na metalnoj pločici (PP): a) gubitak mase (mg); b) nivo oštećenja površine (%); c) srednja površina formiranih jamica (mm^2); d) broj formiranih jamica [242].

Tabela 4.14. Rezultati merenja gubitka mase i parametri oštećenja površine uzoraka premaza PS određeni analizom slike [242]

Vreme (min)	0	15	30	45	60
Gubitak mase, (mg)	-	0,18	0,85	1,52	2,61
Nivo oštećenja površine, P/P_0 (%)	0,197541	0,242328	0,297511	0,258601	0,327292
Broj formiranih jamica, N_p	196	101	115	85	171
Srednja površina formiranih jamica, P_{av} , mm^2	0,800788	2,009396	2,209551	2,598427	1,714541


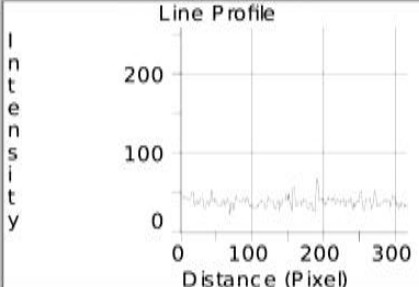
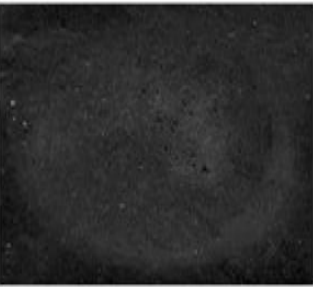
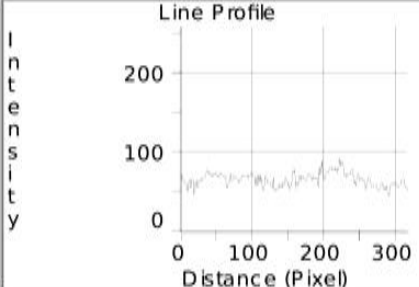
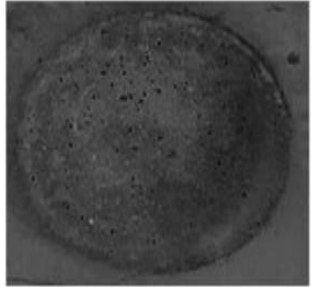
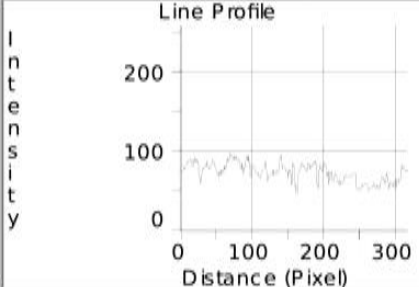
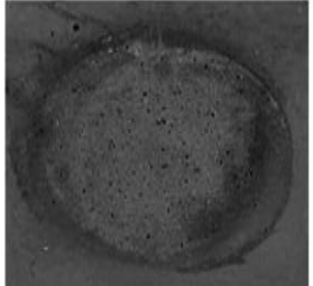
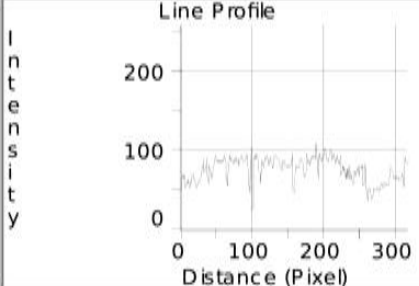
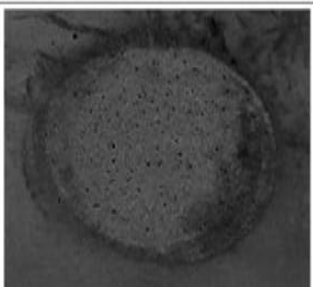
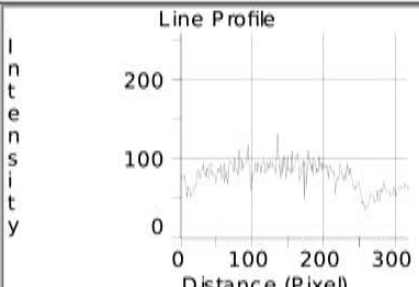


Slika 4.35. Rezultati ispitivanja premaza na polimernoj pločici (PS): a) gubitak mase (mg); b) nivo oštećenja površine (%); c) srednja površina jamica (mm^2); d) broj formiranih jamica [242].

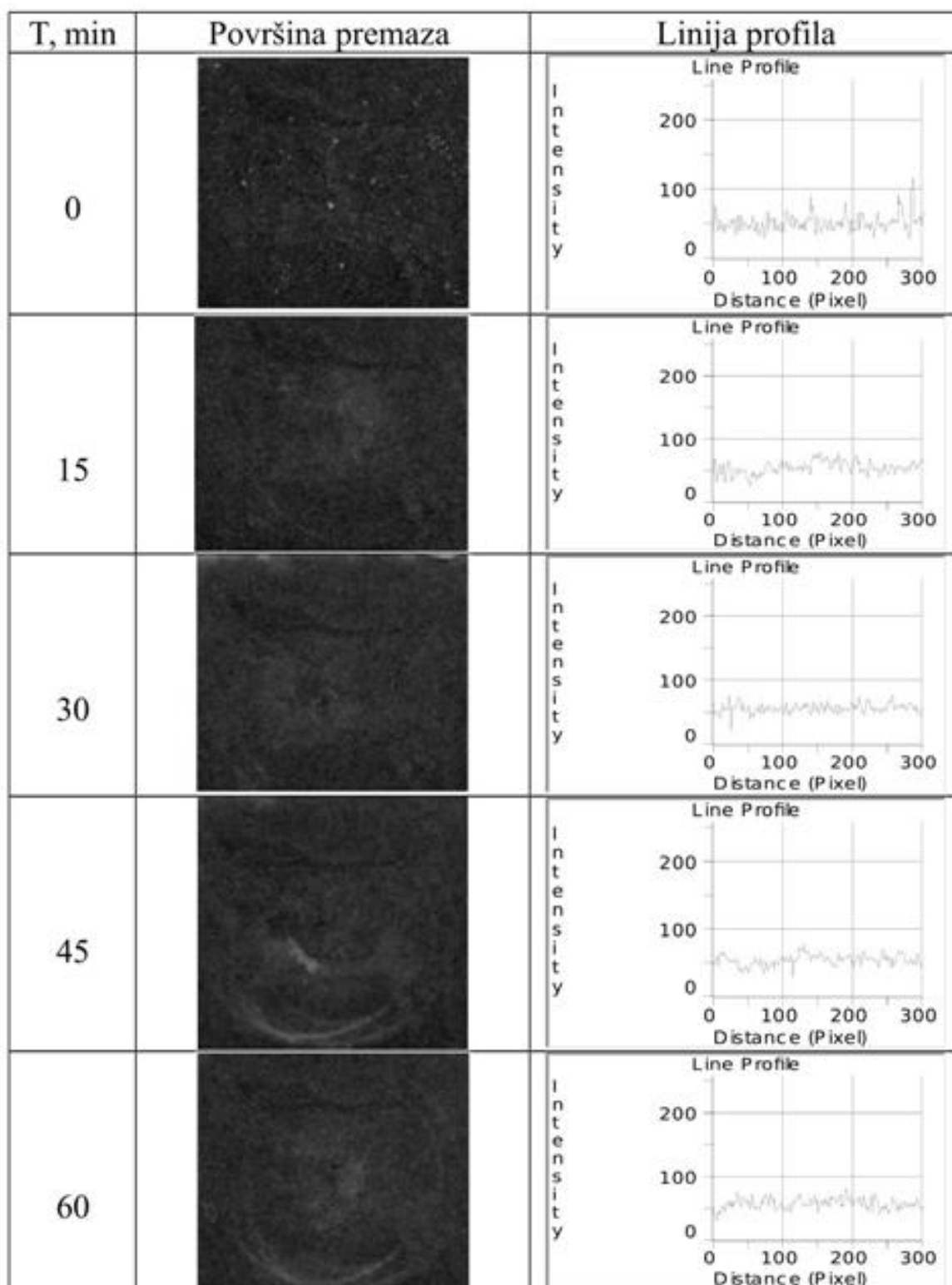


Slika 4.36. Kavitacione brzine uzoraka premaza PP i PS.

Na slikama 4.37 i 4.38 prikazane su fotografije uzoraka premaza PP i PS pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom programa za analizu slike.

T, min	Površina premaza	Linija profila
0		
15		
30		
45		
60		

Slika 4.37. Fotografije uzoraka premaza PP pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike.



Slika 4.38. Fotografije uzoraka premaza PS pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike.

Oštećenja površine uzoraka premaza odgovaraju gubicima mase uzoraka. Kod uzorka PP gubitak mase je 6,48 mg (slika 4.34.a), nivo oštećenja je 0,36%, (slika 4.34.b). Kod uzorka premaza PS gubitak mase je 2,61 mg (slika 4.35.a), dok je nivo oštećenja površine 0,32%, (slika 4.35.b). Rezultati ukazuju na visoku otpornost ispitivanih zaštitnih premaza na bazi bazalta nanetih na metalnu i na polimernu osnovu.

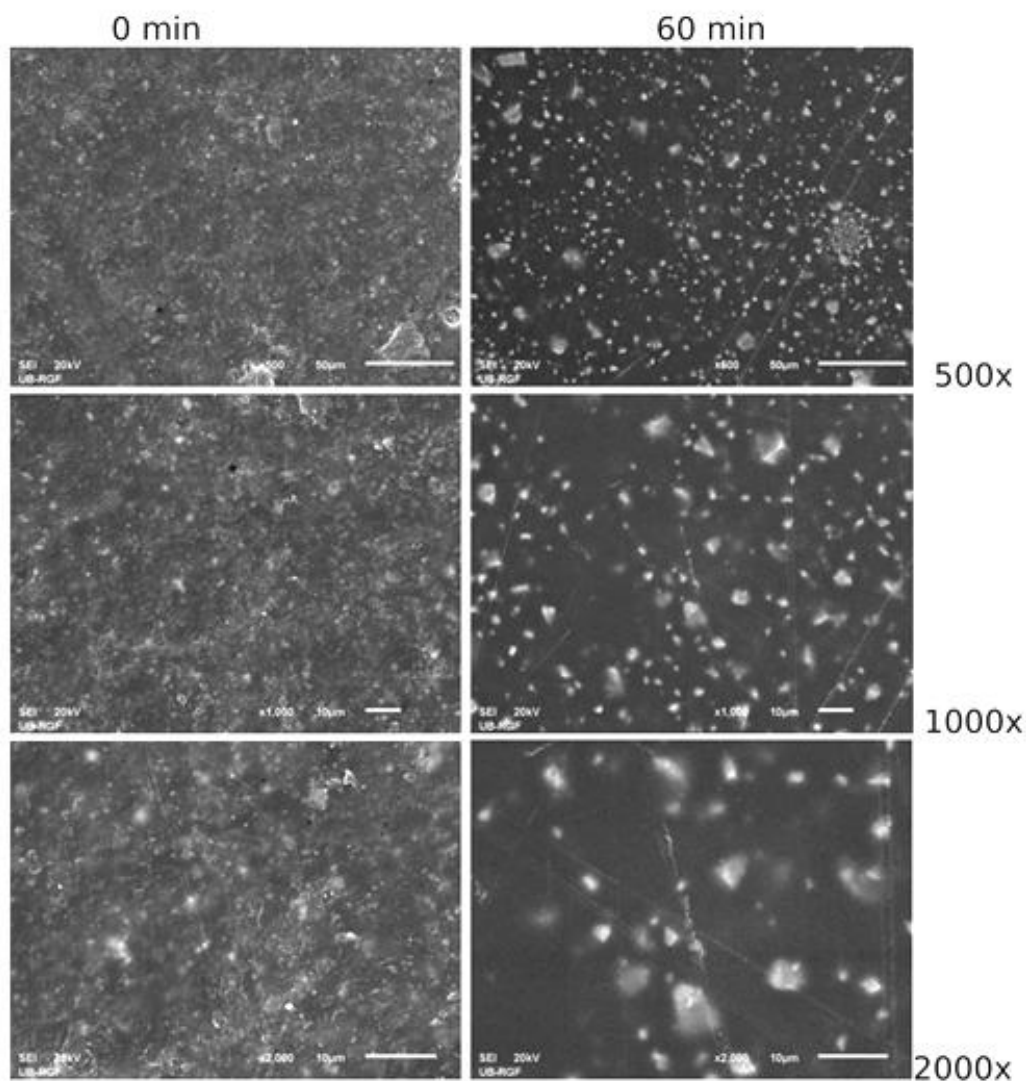
Broj formiranih jamica N_p kod uzoraka PP nakon 15 min ekspozicije opada, što ukazuje da se jamice spajaju (slika 4.34.d). Pri tome lagano se povećava srednja površina formiranih jamica, P_{av} , što pokazuje da se nastanak i razvoj oštećenja površine premaza PP odvija malom brzinom, (slika 4.34.c). Kod uzoraka PS mehanizam oštećenja površine odvija se stalnim nastajanjem i spajanjem jamica na površini premaza, slika 4.35.c, uz manju promenu srednje površine jamica, P_{av} , slika 4.35.d. Dobijeni rezultati ukazuju na postojanost slojeva premaza PP i PS pod dejstvom kavitacionih opterećenja. To se vidi i na manjim promenama linija profila za uzorke PP i PS koje ukazuju na mala oštećenja površine premaza tokom ekspozicije, slike 4.37 i 4.38, respektivno.

S obzirom da se vatrostalni premazi na bazi bazalta do sada nisu koristili u praksi livnica, niti za zaštitu delova opreme u metalurgiji, u planiranju istraživanja pošlo se od predhodnih rezultata istraživanja sastava vatrostalnih premaza i postupaka njihove izrade i primene u praksi livnica, premazi na bazi mulita, cordijerita, cirkonijum-silikata i talka [237-242], podataka iz literature o primeni keramičkih materijala u uslovima dejstva kavitacije [49-52, 73], podataka iz literature o primeni polimernih prevlaka za zaštitu materijala izloženih dejstvu kavitacije [218, 219] i na osnovu tih rezultata planirane su i istraživane recepture za premaze, njihova sinteza i ispitivanje njihove kavitacione otpornosti.

Za ocenu svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije praćena je promena mase uzoraka i promena površine premaza tokom vremena ispitivanja.

Istraživanja su pokazala da je za dobijanje veće otpornosti slojeva premaza na dejstvo kavitacije potrebno dobro prijanjanje premaza na nanetu površinu, kao i veća debljina sloja premaza. Manja oštećenja pokazali su premazi na polimernoj osnovi (ravnomernije linije profila), najverovatnije usled boljeg prijanjanja slojeva premaza na hrapaviju površinu polimera, slika 4.38 [242].

Morfologija oštećenja površine uzoraka PP i PS praćena je primenom skenirajuće elektronske mikroskopije, slika 4.39 i 4.40, respektivno.

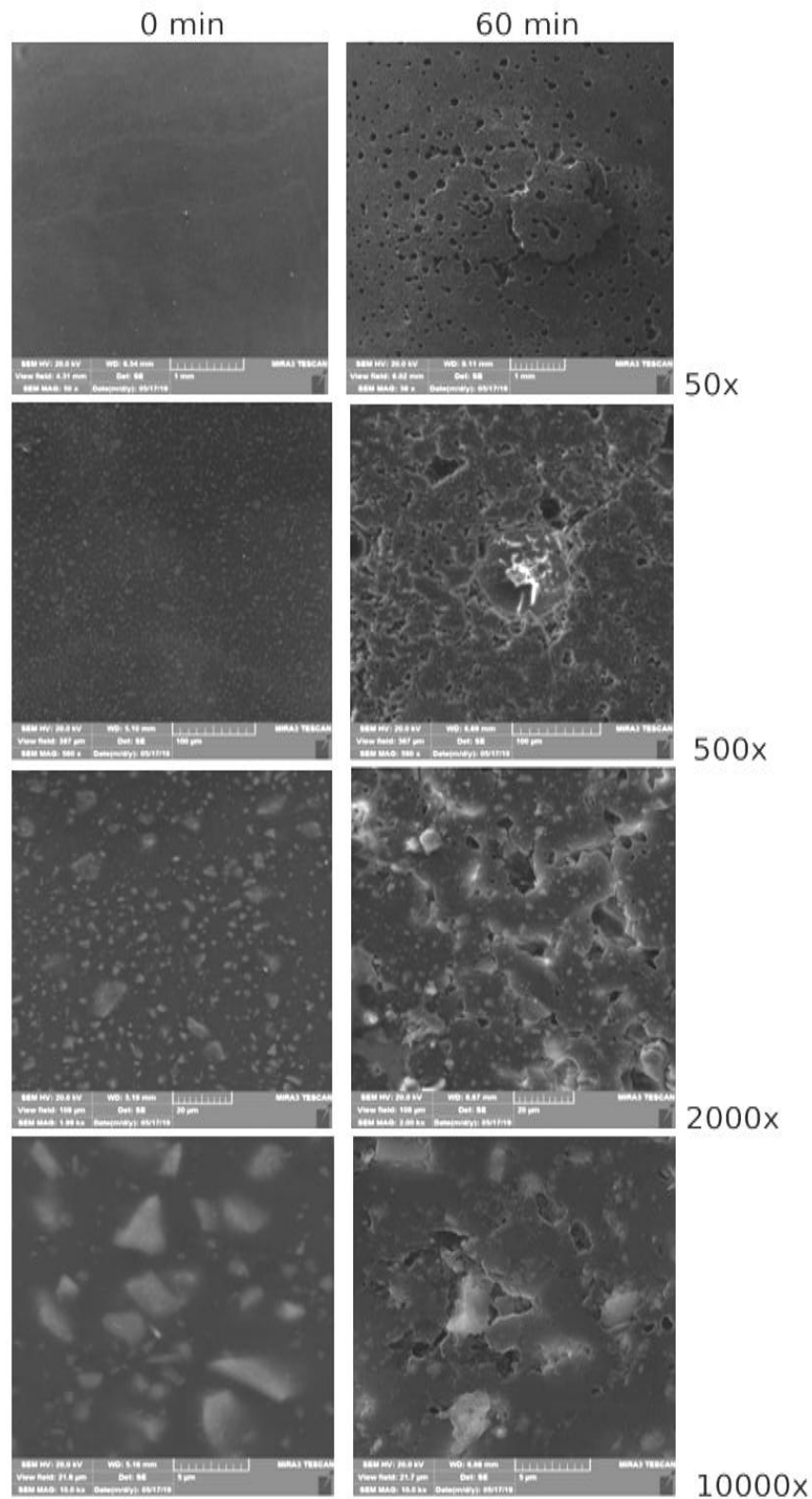


Slika 4.39. SEM mikrofotografije površina uzorka premaza PP pri različitim uvećanjima pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Pre izlaganja dejstvu kavitacije, na površini uzoraka su prisutni sitni mehurići nastali tokom izrade premaza i tokom nanošenja sa četkom, kao i veći broj sitnih i plitkih jamica, slike 4.39 i 4.40. za vreme 0 min. Na slikama se vidi ravnomerna raspodela vatrostralnog punioca u premazu.

Nakon 60 min ekspozicije početne jamice na površini su proširene, formiran je veći broj novih jamica. U pitanju su sitne i plitke jamice, koje nastaju malom brzinom i koje ne oštećuju mnogo površinu, što se vidi i iz rezultata analize slike: ukupno oštećenje površine uzorka na kraju ispitivanja je malo, ispod 3,5%, gubitak mase je ispod 6,5 mg, kod premaza PP, dok je kod premaza PS, oštećenje površine 0,32% a gubitak mase ispod 2,6 mg. To sve govori o visokoj otpornosti ove vrste vatrostralnih premaza na kavitaciona opterećenja i na

možnost njihove primene za zaštitu radnih površina opreme koja je tokom eksploatacije izložena kavitacionim naprezanjima.

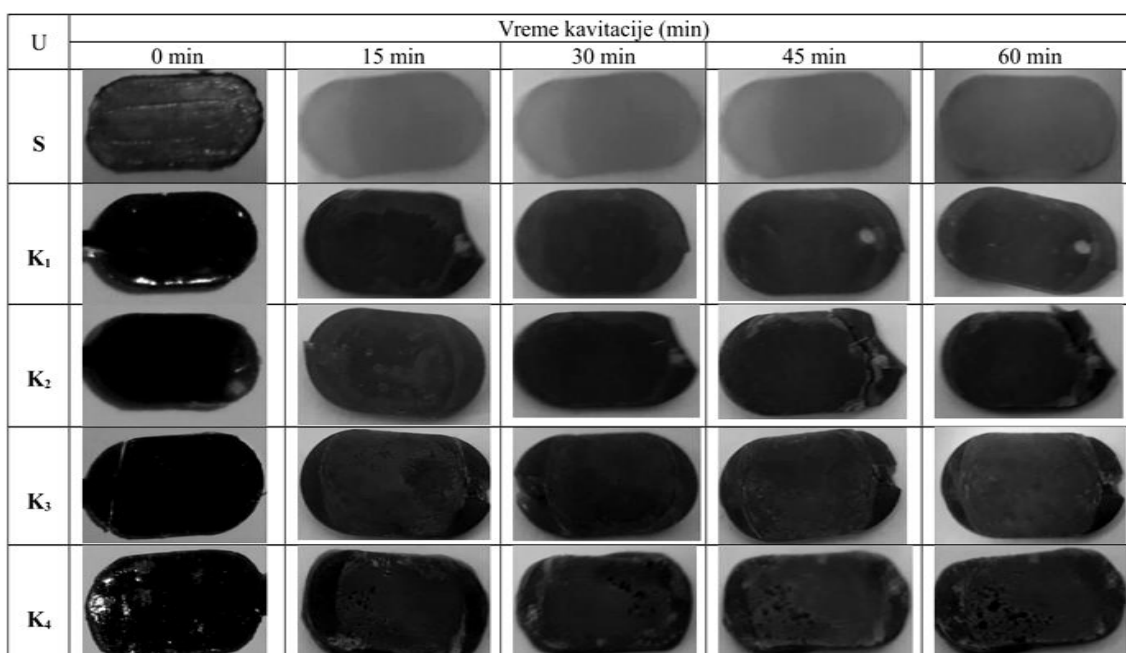


Slika 4.40. SEM mikrofotografije površina uzorka premaza PS pri različitim uvećanjima pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

Ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka zaštitnih premaza na bazi bazalta omogućilo je upoređenje svojstava ovih uzoraka, s obzirom da su ispitivani pod istim uslovima primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom, shodno standardu ASTM G 32. Primenom ove metode u praksi omogućuje se brži izbor materijala za sintezu premaza, procenu njihove efikasnosti u zaštiti metalnih i nemetalnih površina, kao i njihovog veka trajanja u sličnim eksploatacionim uslovima [242].

4.6. Rezultati ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka kompozita poliestarska smola / bazalt (uzorci NPS/B)

Kompoziti sa osnovom od nezasićene poliestarske smole (sa 40% stirena) i praha bazalta veličine čestica 40 μm , kao ojačivača, (oznake serija kompozita: K₁; K₂; K₃; K₄) podvrgnuti su ispitivanju otpornosti na dejstvo kavitacije primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom prema standardu ASTM G32. Ispitivanju su podvrgnuti i uzorci smole (oznaka: S). Na slici 4.41 prikazani su uzorci S i uzorci kompozita: K₁; K₂; K₃; K₄, pre i tokom vremena ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije.



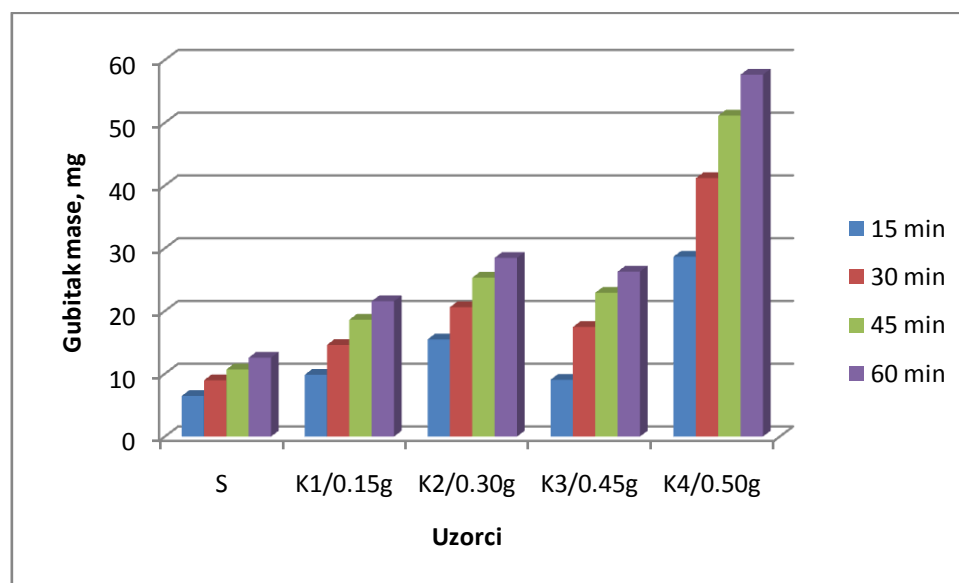
Slika 4.41. Uzorci nezasićene poliestarske smole i kompozita tokom vremena ispitivana na dejstvo kavitacije (min): 0; 15; 30; 45; 60 [250].

Tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije praćena je promena mase kompozita i smole u funkciji vremena ekspozicije, prikazano u tabeli 4.15 i na slici 4.42.

Posmatranjem površina uzoraka nakon ekspozicije može se primetiti da je u nekim kompozitima došlo do grupisanja jamica na površini, stvaranja većih i dubljih jamica, posebno kod uzoraka K₄. To ukazuje na mogućnost neravnomerne raspodele ojačivača na bazi bazalta u masi kompozita i na stvaranje potencijalno slabih mesta na kojima se javljaju veća oštećenja površine. Uzorci smole imali su manji gubitak mase od uzoraka kompozita. Kompoziti K₁; K₂; K₃ su imali znatno manji gubitak mase u odnosu na kompozit K₄, slika 4.42.

Tabela 4.15. Gubitak mase uzoraka smole i kompozita pod dejstvom kavitacije, (mg)

Vreme (min)	15	30	45	60
S	6,46	8,96	10,68	12,57
K ₁ /0,15g	9,83	14,61	18,59	21,56
K ₂ /0,39g	15,48	20,61	25,32	28,48
K ₃ /0,45g	9,05	17,46	22,91	26,28
K ₄ /0,50g	28,66	41,18	51,13	57,67

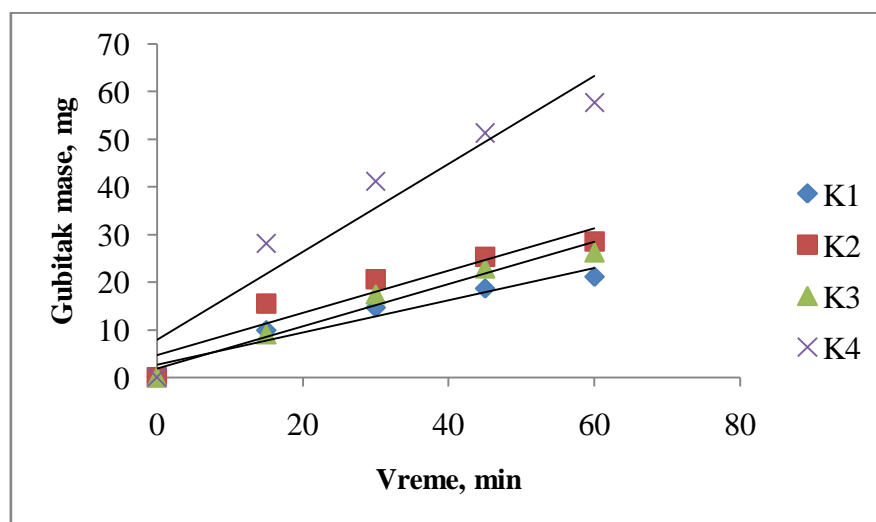


Slika 4.42. Gubitak mase uzoraka smole i kompozita tokom vremena ispitivanja na dejstvo kavitacije [250].

Uzorci smole (S) pokazali su kavitacionu brzinu 0,21 mg/min. Uzorci kompozita pri ispitivanju na dejstvo kavitacije pokazali su sledeće kavitacione brzine, tabela 4.16 i slika 4.43.

Tabela 4.16. Kavitacione brzine uzoraka kompozita, (mg/min)

Red. broj	Uzorak	Kavitaciona brzina, mg/min
1	Kompozit K ₁ /0,15g	0,35
2	Kompozit K ₂ /0,30g	0,46
3	Kompozit K ₃ /0,45g	0,44
4	Kompozit K ₄ /0,50g	0,96

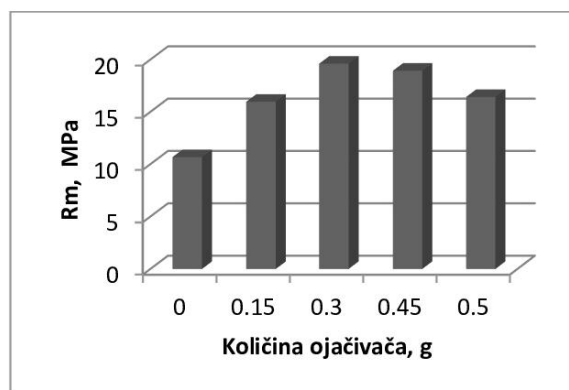


Slika 4.43. Kavitacione brzine uzoraka kompozita NPS/B.

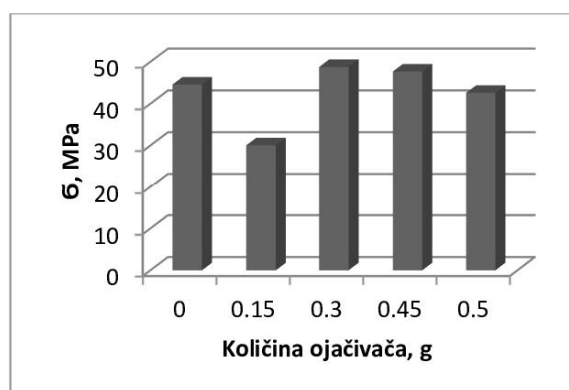
Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava kompozita: zatezne čvrstoće, čvrstoće na savijanje i tvrdoće potvrdili su pretpostavku da se pri dodavanju veće količine ojačivača na bazi bazalta (iznad 0,45 g) pojavljuje grupisanje i neujednačena raspodela ojačivača u kompozitu. Za ispitivanje je korišćena reciklirana poliestarska smola, a poseban problem bio je veličina zrna ojačivača na bazi bazalta, prečnika zrna 40 μ m i faktora oblika zrna 0,6–0,7 (tabela 3.4, slika 3.8 i tabela 3.5, slika 3.10, respektivno). Ispitivanjem su utvrđena slaba mesta u strukturi pojedinih kompozita na kojima se javljaju pukotine pri deformisanju (K₄/0,50 g). Rezultati ispitivanja svojstava kompozita NPS/B: zatezne čvrstoće, čvrstoće na savijanje i tvrdoće prikazani su u tabeli 4.17 i na slici 4.44.

Tabela 4.17. Svojstva uzoraka S i uticaj količine ojačivača na bazi bazalta na svojstva kompozita NPS/B

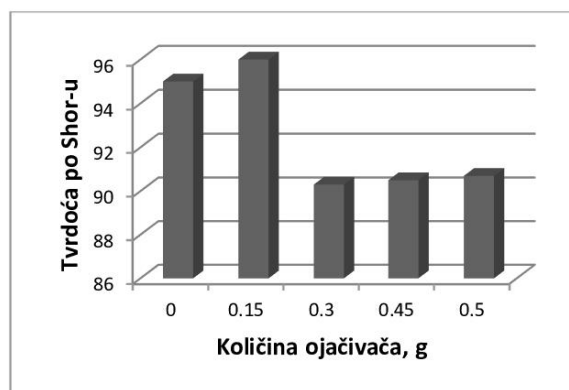
Uzorci	Količina ojačivača, mg	R _m (MPa)	σ (MPa)	Tvrdoća po Shor-u
S	0	10,67	44,57	94
K ₁	0,15	15,97	30,05	96
K ₂	0,30	19,61	48,77	90,3
K ₃	0,45	18,94	47,7	95,6
K ₄	0,50	16,43	42,6	90,7



a.



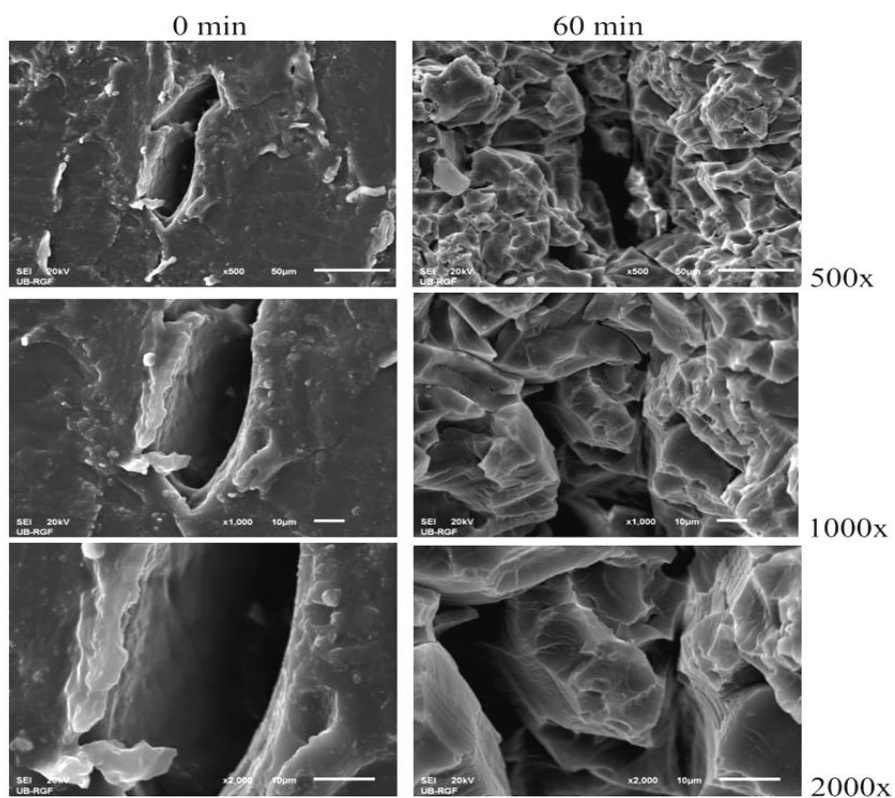
b.



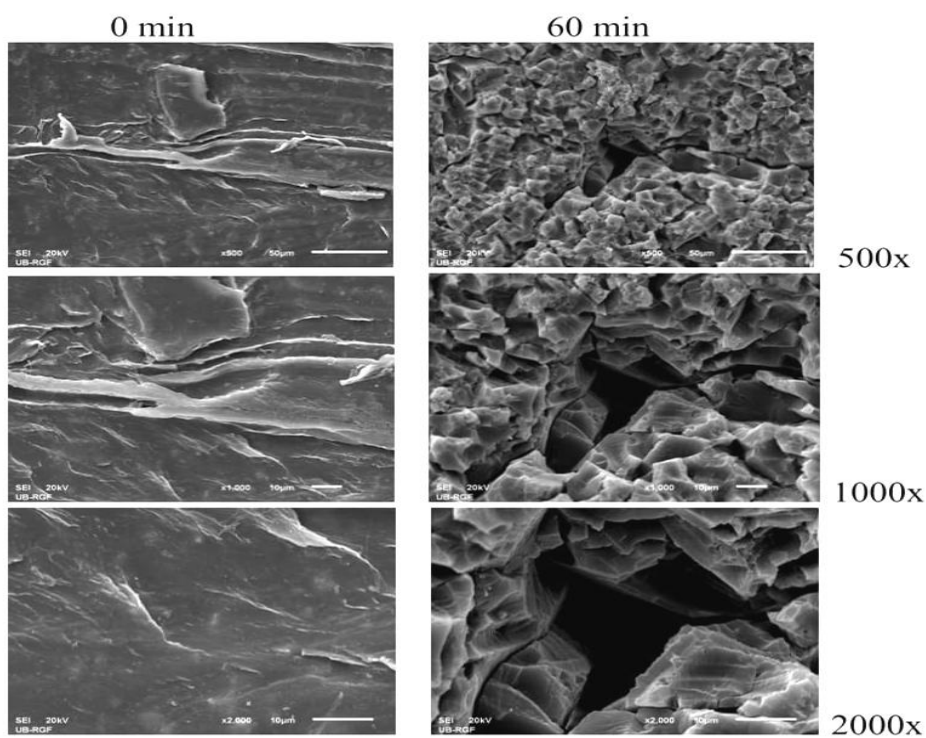
c.

Slika 4.44. Svojstva uzoraka S (0% ojačivača) i uticaj količine ojačivača na bazi bazalta (od 0,15%-0,5%) na svojstva kompozita NPS/B: a. zatezna čvrstoća, R_m (MPa); b. čvrstoća na savijanje, σ (MPa); tvrdoća po Shor-u [250].

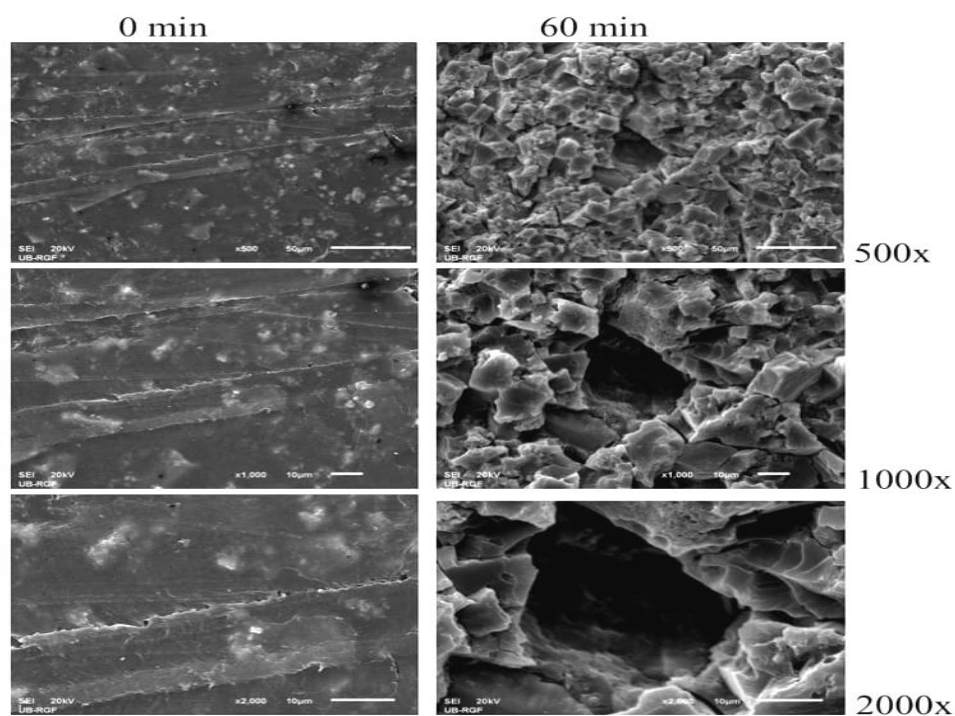
Na slikama 4.45–4.49 prikazane su SEM mikrofotografije površina uzoraka S i kompozita NPS/B pre ispitivanja (0 min) i na kraju ispitivanja (60 min) pod dejstvom kavitacije.



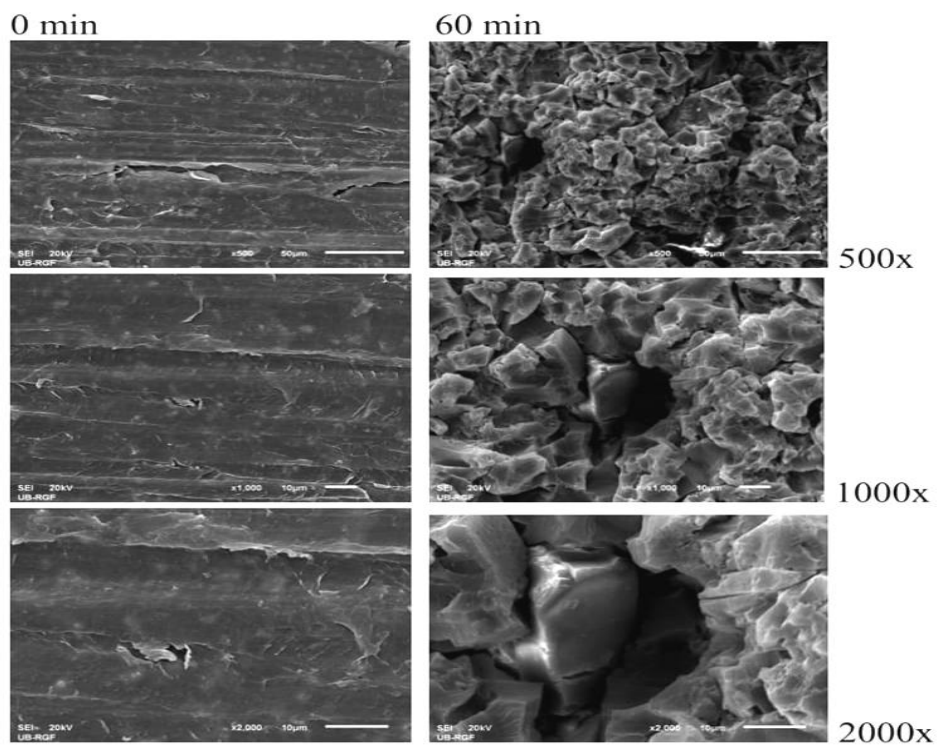
Slika 4.45. SEM mikrofotografije površina uzoraka nezasićene poliestarske smole (S) pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.



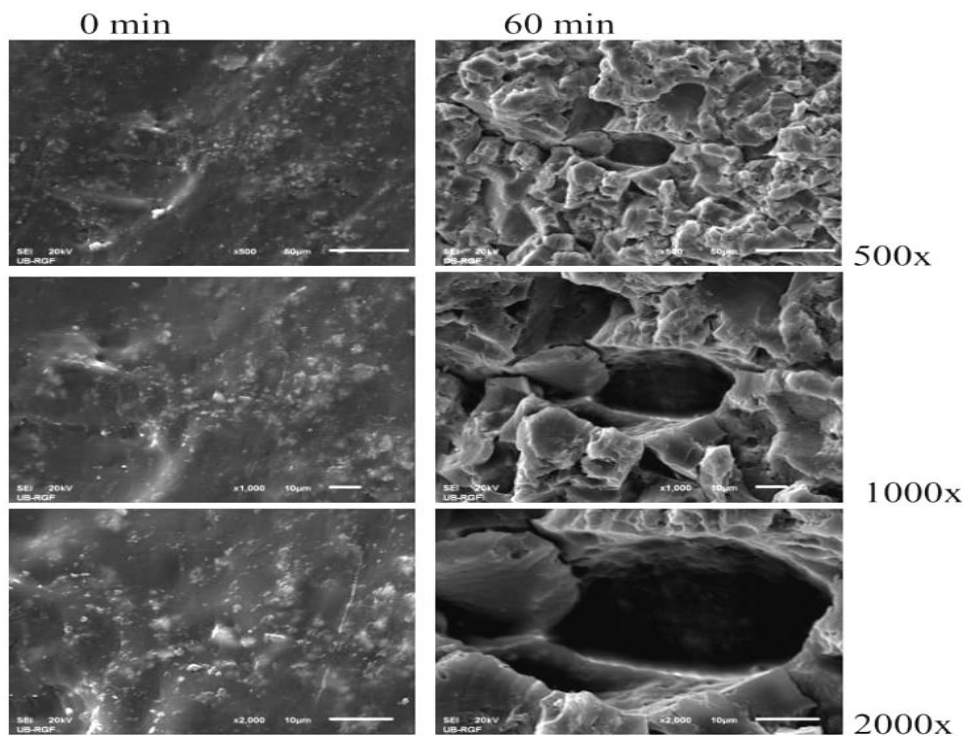
Slika 4.46. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita K_1 pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.



Slika 4.47. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita K_2 pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.



Slika 4.48. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita K_3 pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.



Slika 4.49. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita K_4 pre (0 min) i na kraju (60 min) izlaganja dejstvu kavitacije.

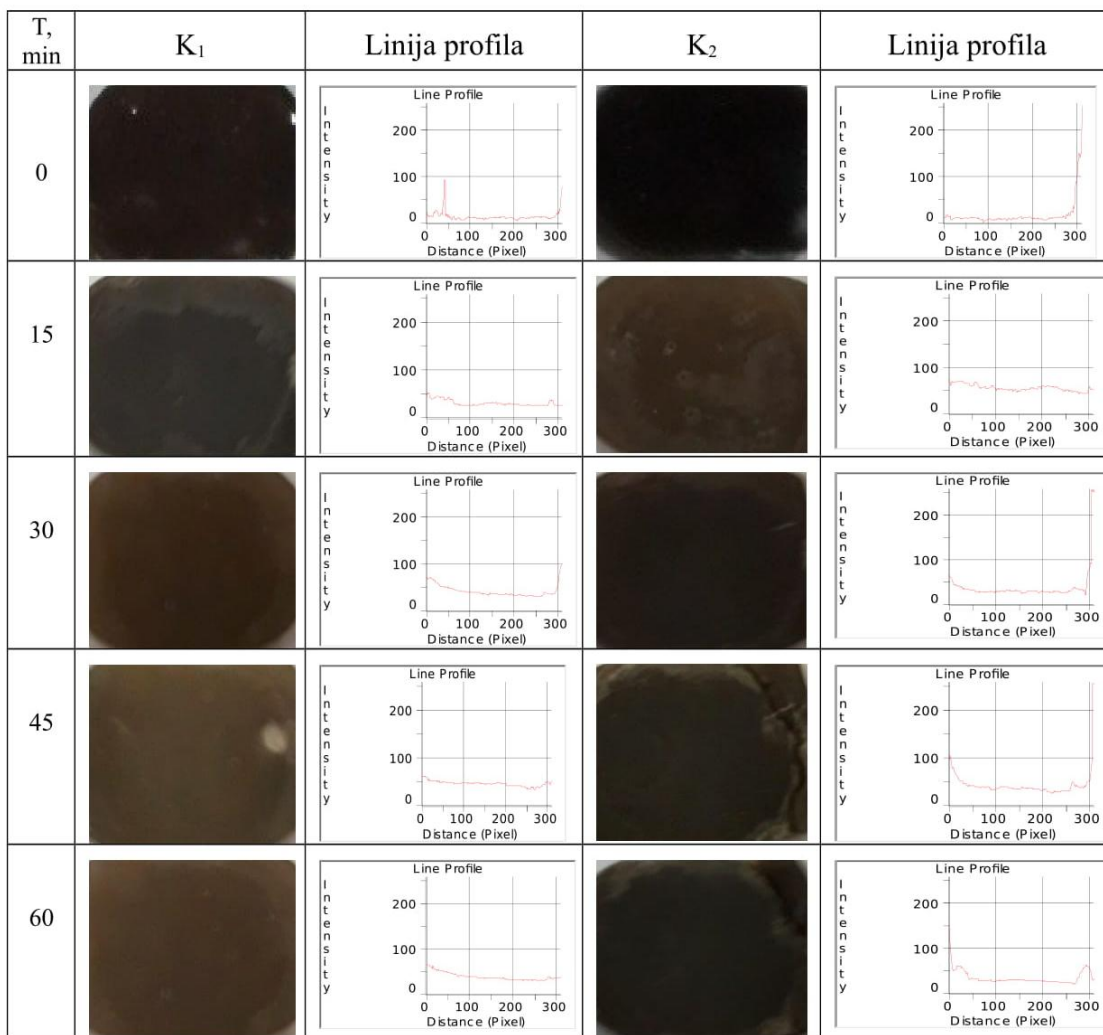
Uzorci kompozita sa dodatkom ojačivača na bazi bazalta u količini do 0,45 g, K_3 pokazuju niže vrednosti kavitacione brzine u poređenju sa kompozitom K_4 sa dodatkom 0,50 g ojačivača, tabela 4.18. Takođe, uzorci kompozita do tih vrednosti dodatka bazalta su pokazali veće vrednosti zatezne čvrstoće i čvrstoće na savijanje, kao i tvrdoće u odnosu na kompozite sa većim sadržajem ojačivača, tabela 4.17, slika 4.44. Ovo ukazuje da ispitivani kompoziti poliestarska smola/prah bazalta do količine 0,45 g, mogu da se primene u uslovima manjih kavitacionih opterećenja.

Analizom SEM mikrofotografija uzoraka kompozita vidi se da nakon 60 min delovanja kavitacije dolazi do promene površine i do stvaranja jamica. U kompozitima sa većom količinom ojačivača na bazi bazalta prečnika zrna 40 µm stvaraju se veće i dublje jamice, koje se spajaju (kompoziti K_4 , slika 4.49.).

4.6.1. Poređenje svojstava otpornosti na oštećenja pod dejstvom kavitacije kompozita poliestarska smola/prah bazalta

Na slikama 4.50–4.51 prikazane su makrofotografije uzoraka kompozita i odgovarajuće linije profila.

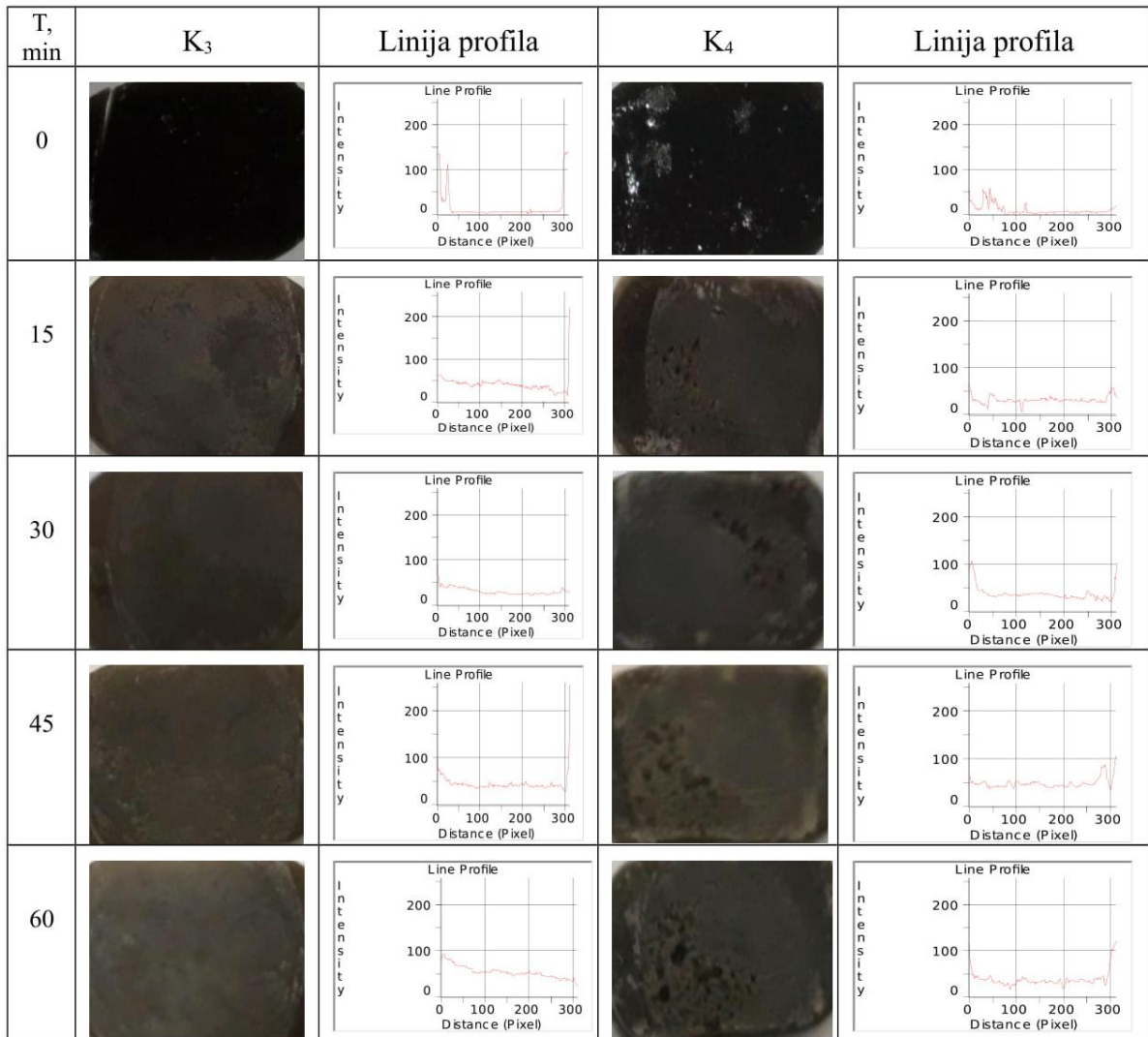
Na slici 4.50, kod kompozita K_1 (0,15 g) i K_2 (0,30 g) javljaju se manji gubici mase i manja oštećenja površine pod dejstvom kavitacije u odnosu na kompozite sa većim sadržajem bazaltnog praha kao ojačivača. Kod kompozita K_2 nakon 45 min delovanja kavitacije pojavila se mala pukotina u delu uzorka u blizini vrata epruvete. Pretpostavlja se da je pukotina nastala tokom ispitivanja zatezanjem, a da se nakon 45 min delovanja kavitacije povećala. Ova pukotina se ne menja do 60 min delovanja kavitacije. Na uzorcima kompozita na pojedinim mestima na površini vidi se promena boje uzorka, što pokazuje da je energija oslobođena implozijom kavitacionih mehura uslovlila promene unutar materijala.



Slika 4.50. Fotografije uzoraka kompozita K_1 i K_2 pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike.

Na slici 4.51, kompozit K_3 (0,45 g) pokazuje manja oštećenja površine u odnosu na kompozit K_4 (0,50 g), koji pokazuju i veći gubitak mase i veće oštećenje površine. Kod K_4 kompozita,

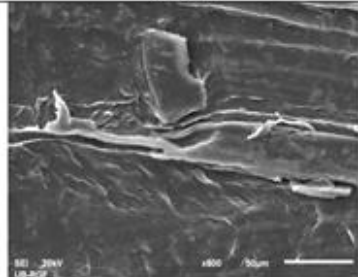
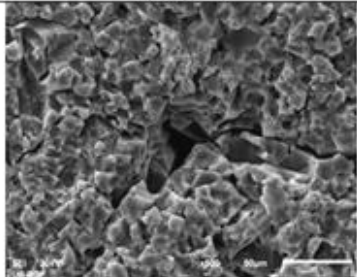
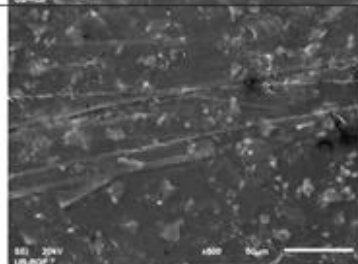
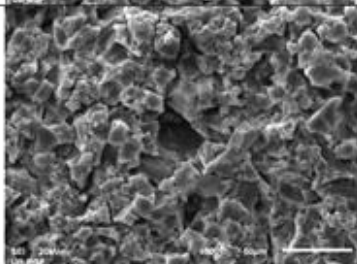
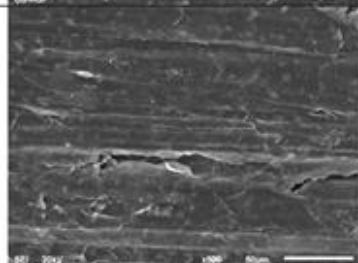
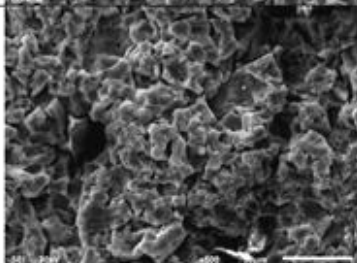
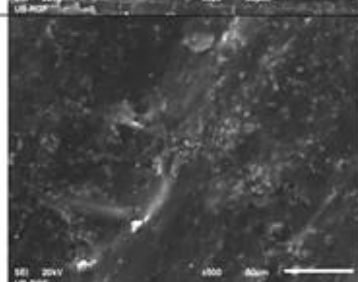
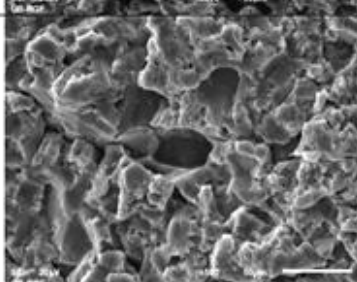
već posle 15 min ispitivanja pod dejstvom kavitacije, pri kavitacionoj brzini 0,96 mg/min nastaju oštećenja površine u vidu jamica, koje se dalje formiraju i spajaju u veće i dublje jamice. To se vidi i na većem oštećenju erodiranih površina i većoj promeni linija profila, slika 4.51.



Slika 4.51. Fotografije uzoraka kompozita K₃ i K₄ pre i tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije sa odgovarajućim linijama profila dobijenim primenom analize slike.

Na slici 4.52 prikazan je uporedni pregled SEM mikrofotografija površina uzoraka kompozita pre i na kraju ispitivanja pod dejstvom kavitacije.

Nastajanje i razvoj oštećenja površine uzoraka kompozita praćeni su primenom analize slike na dobijenim fotografijama i pri tome su određivani parametri: nivo oštećenja površine uzoraka, P/P_0 , %, broj formiranih jamica, N_p i prosečna površina formiranih jamica, P_{av} , mm^2 .

Uzorak kompozita	SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita (uvećanje 500×)	
	0 min	60 min
K ₁		
K ₂		
K ₃		
K ₄		

Slika 4.52. SEM mikrofotografije površina uzoraka kompozita pre i nakon ispitivanja pod dejstvom kavitacije sa izgledom formiranih jamica.

U tabelama 4.18 - 4.20 i na slikama 4.53–4.57 uporedo su prikazani rezultati ispitivanja, sa podacima o gubitku mase tokom vremena ispitivanja pod dejstvom kavitacije (podaci iz tabele 4.15) i podacima dobijenim analizom slike površine uzoraka za svaki kompozit.

Nivoi oštećenja površine kompozita tokom vremena ispitivanja pod dejstvom kavitacije (60 min) odgovarali su podacima o gubitku mase (mg) i kavitacionim brzinama (mg/min) i iznosili su: 21% za uzorke K₁; 23% za uzorke K₂; 25% za uzorke K₃ i 39% za uzorke K₄.

Tabela 4.18. Nivo oštećenja površine uzoraka kompozita pod dejstvom kavitacije (P/P_0 , %)

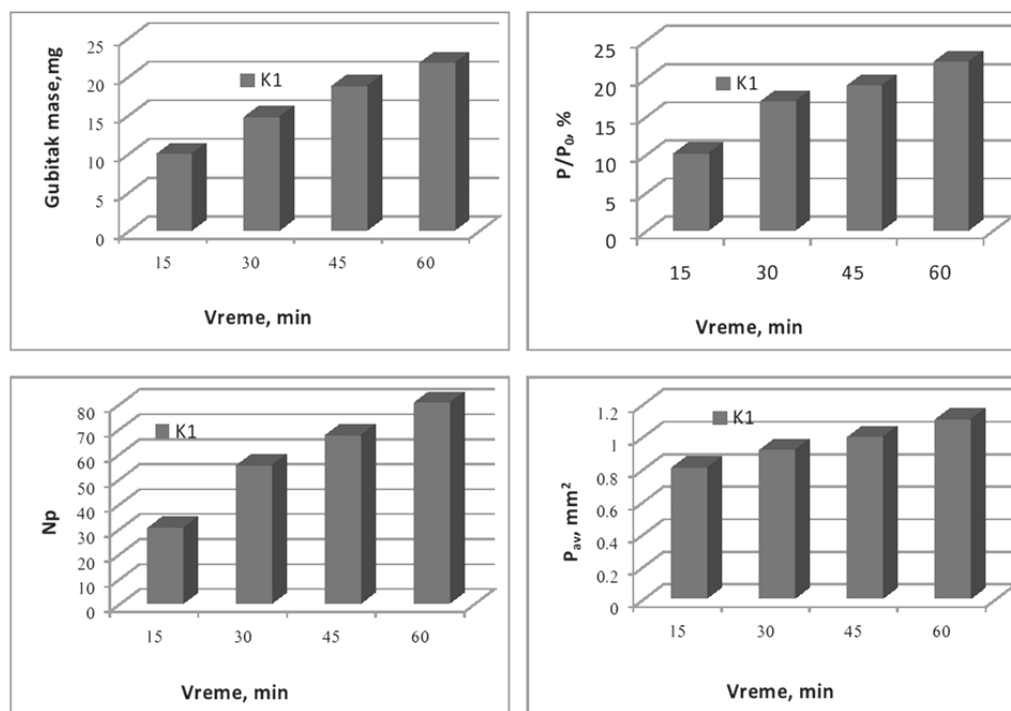
Vreme (min)	15	30	45	60
K ₁ /0,15g	10,01125	16,83770	18,95567	21,01338
K ₂ /0,39g	15,25442	18,30241	19,81567	23,24327
K ₃ /0,45g	9,91356	12,52463	22,43667	25,90234
K ₄ /0,50g	19,92457	25,41786	33,52763	39,51648

Tabela 4.19. Broj formiranih jamica N_p pod dejstvom kavitacije za uzorke kompozita

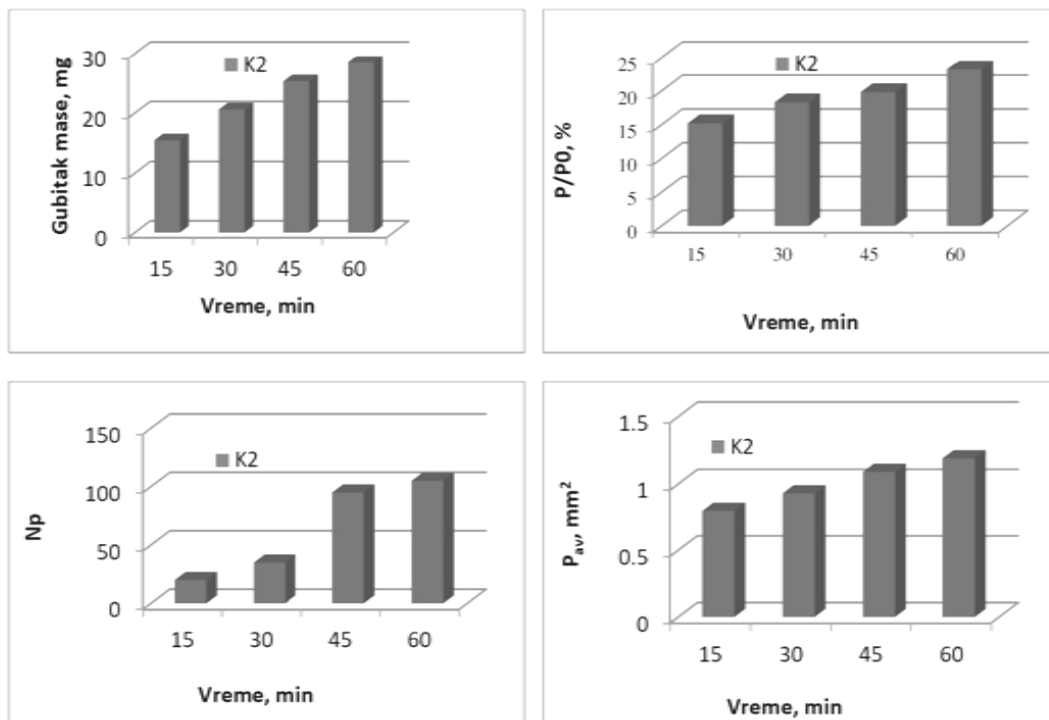
Vreme (min)	15	30	45	60
K ₁ /0,15g	30	55	67	80
K ₂ /0,39g	20	35	95	105
K ₃ /0,45g	50	95	150	200
K ₄ /0,50g	150	230	310	390

Tabela 4.20. Srednja površina formiranih jamica P_{av} , mm² za uzorke kompozita

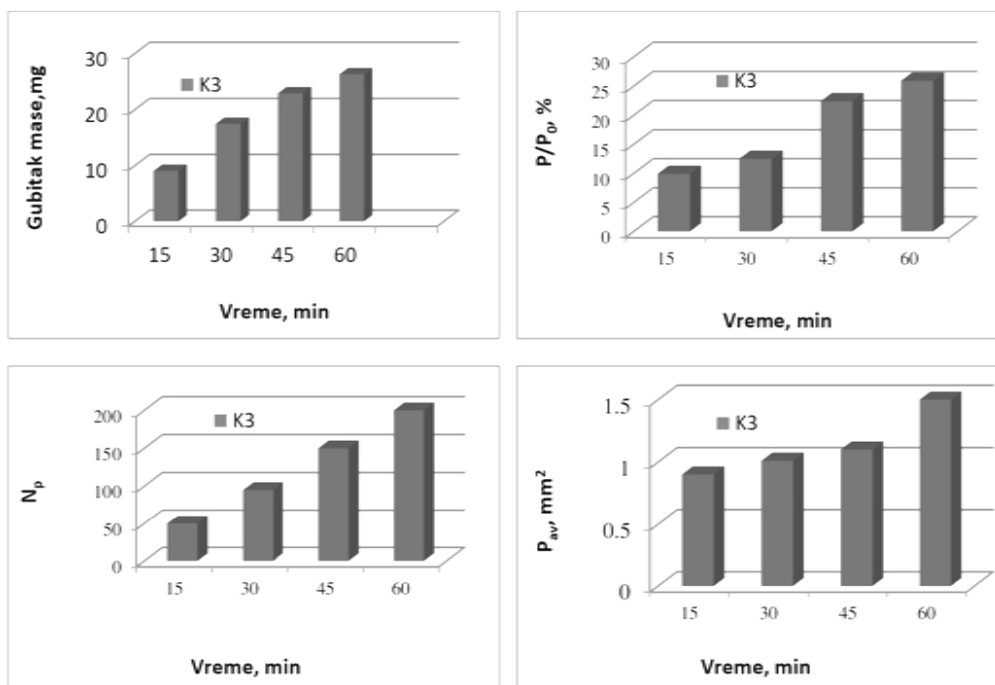
Vreme (min)	15	30	45	60
K ₁ /0,15g	0,802561	0,91341	0,99254	1,10346
K ₂ /0,39g	0,80256	0,93246	1,09554	1,19782
K ₃ /0,45g	0,92451	1,01524	1,15574	1,51778
K ₄ /0,50g	1,09126	1,21675	1,93562	2,50326



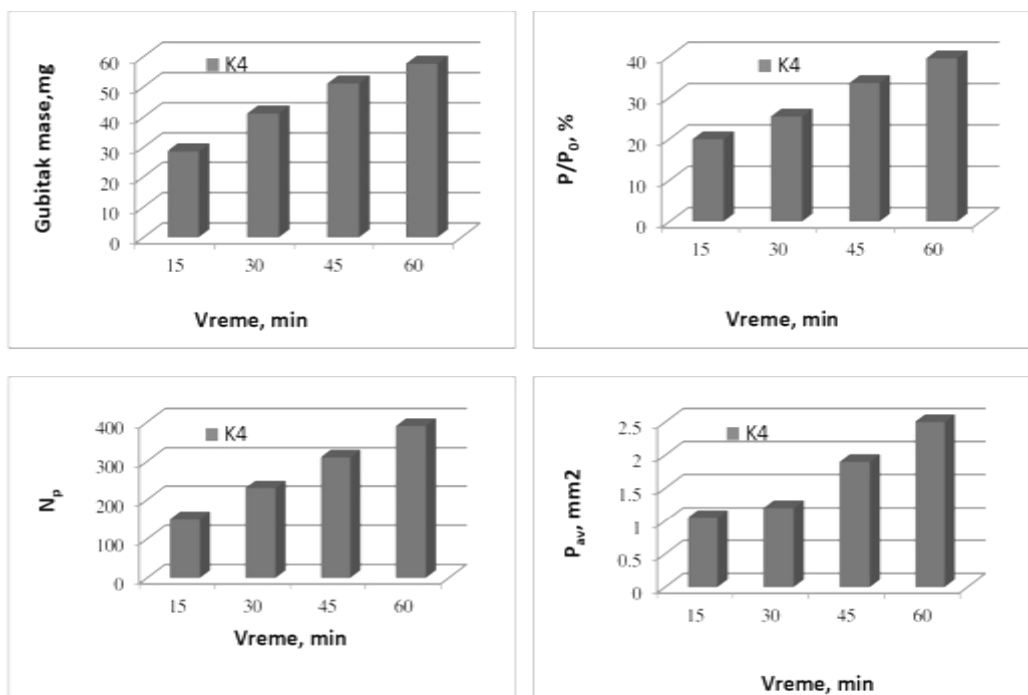
Slika 4.53. Rezultati ispitivanja kompozita K₁ pod dejstvom kavitacije: gubitak mase (mg); nivo degradacije površine P/P_0 , (%); broj formiranih jamica, N_p ; srednja površina formiranih jamica, P_{av} , (mm²).



Slika 4.54. Rezultati ispitivanja kompozita K₂ pod dejstvom kavitacije: gubitak mase (mg); nivo degradacije površine P/P₀, (%); broj formiranih jamica, N_p; srednja površina formiranih jamica, P_{av}, (mm²).



Slika 4.55. Rezultati ispitivanja kompozita K₃ pod dejstvom kavitacije: gubitak mase (mg); nivo degradacije površine P/P₀, (%); broj formiranih jamica, N_p; srednja površina formiranih jamica, P_{av}, (mm²).



Slika 4.56. Rezultati ispitivanja kompozita K₄ pod dejstvom kavitacije: gubitak mase (mg); nivo degradacije površine P/P₀, (%); broj formiranih jamica, N_p; srednja površina formiranih jamica, P_{av}, (mm²).

Treba istaći da je na svojstva dobijenih kompozita veliki uticaj pokazala osnova kompozita, reciklirana poliestarska smola, kao i veličina i oblik zrna ojačivača na bazi praha bazalta (prečnik zrna 40 μm, faktor oblika zrna 0,6–0,7). Pri većoj količini ojačivača (0,50 g kod kompozita K₄) javilo se znatno smanjenje otpornosti na dejstvo kavitacije i pojava većeg broja jamica koje su se tokom procesa spajale u dublje jamice i na taj način su izazvale znatna oštećenja površine, slika 4.56. U cilju dobijanja kompozita polimerna osnova/ ojačivač na bazi bazalta boljih karakteristika, dalja istraživanja treba proširiti na primenu epoksi smola za osnovu kompozita i ojačivača na bazi praha bazalta manjih dimenzija zrna (ispod 10 μm), kao i ojačivača na bazi bazaltnih vlakana.

5. Zaključak

Predmet ove disertacije bio je praćenje nastajanja i razvoja oštećenja vatrostalnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije u cilju procene mogućnosti njihove primene kao konstrukcionih elemenata opreme u metalurgiji i rudarstvu. Istraživani su uzorci na bazi bazalta: rovni (RB); liveni (LB) i sinterovani (SB). Za praćenje nastajanja i razvoja oštećenja vatrostalnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije korišćeni su rezultati ispitivanja dobijeni primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom (standard ASTM G32). Nastajanje i razvoj oštećenja površine tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije praćeno je primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa i primenom analize slike. Poređenje rezultata obavljeno je prema kriterijumima: vrednosti kavitacionih brzina (gubitak mase u vremenu ekspozicije) i analize morfologije oštećenja površine uzoraka (oštećenje površine uzoraka usled nastajanja i razvoja jamica; broj formiranih jamica, njihovo povećanje i/ili spajanje u veće i dublje jamice; promena oštećene površine uzoraka i povećanje hrapavosti površine). Pri tome istraživanja su vođena pri istim geometrijskim karakteristikama uzoraka; istom načinu pripreme površine uzoraka, kao i istim uslovima ispitivanja primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom.

Istraživanjima je pokazano da dužina perioda inkubacije, perioda u kome nema gubitka mase, kao i maksimalni stepen oštećenja i gubitka mase uzoraka, prvenstveno zavise od ispitivanog materijala, njegove strukture i svojstava, a takođe, zavise i od uslova ispitivanja i prvobitnog stanja površina ispitivanih uzoraka. Uslovi ispitivanja primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom bili su isti za sve uzorke na bazi bazalta.

Posebna pažnja posvećena je pregledu površina uzoraka pre izlaganja procesu kavitacije i identifikaciji oštećenja površine uzrokovanih prisustvom mehurova uklopljenih u strukturu uzoraka bazalta. Takođe, pažnja je posvećena otkrivanju jamica nastalih tokom ispitivanja, njihovom razvoju i određivanju njihovih karakteristika.

Pregledom površine uzoraka RB, LB, SB pre izlaganja dejstvu kavitacije, primećena su različita oštećenja na ograničenim oblastima, najčešće oko postojećih mehurova u strukturi. Kod uzoraka RB konstatovana su veća oštećenja, sa većim brojem jamica, koje utiču na oštećenja površine i smanjuju otpornost rovnog bazalta na dejstvo kavitacije.

Na uzorcima LB i SB, pre početka ispitivanja na dejstvo kavitacije, konstatovana su mala oštećenja površine u blizini mehurova, koji su uklopljeni u strukturu bazalta a ispunjeni su vazduhom ili staklom.

Ispitivanjem je utvrđeno da najmanju otpornost na dejstvo kavitacije pokazuju uzorci RB. Površina RB uzoraka pre početka kavitacije bila je oštećena usled prisustva mnoštva jamica koncentrisanih oko postojećih mehura u strukturi bazalta. Na samom početku izlaganja dejstvu kavitacije javlja se gubitak mase, a na kraju ispitivanja, za 120 min ekspozicije, gubitak mase iznosi 88,5 mg; oštećenje površine je 35%; kavitaciona brzina je 0,74 mg/min. Praćenjem promena morfologije oštećenja površine uzoraka primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa pokazalo se da je dominantan mehanizam oštećenja uzoraka veći gubitak mase sa površine uzoraka bez deformacije ili promene strukture. Pokazalo se da su prisutni kristali olivina i piroksena u strukturi RB uzorka različito erodirali. Povećan nivo oštećenja površine i izmereni gubitak mase pokazuju da uzorci RB imaju malu otpornost na dejstvo kavitacije.

Znatno veću otpornost na dejstvo kavitacije pokazuju uzorci LB i SB. Gubitak mase uzoraka LB na kraju vremena ispitivanja, u trajanju 120 min, bio je 3,53 mg, kavitaciona brzina je 0,03 mg/min, oštećenje površine je 12 %. Jamice formirane na površini uzorka veoma malo su menjale oblik i dimenzije tokom ekspozicije. Dominantan mehanizam oštećenja ovih uzoraka je postepeni gubitak mase uzoraka sa površine jamica bez deformacije i promene strukture uzoraka. Zapažena je pojava jamica na površini gasnih mehura, koje se postepeno menjaju tokom ekspozicije. Dobijeni rezultati ispitivanja pokazuju da uzorci LB imaju visoka svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije i da se mogu primeniti u uslovima visokih kavitacionih opterećenja.

Povišena svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka LB mogu se tumačiti na osnovu strukture uzoraka dobijene procesima topljenja bazaltnog agregata određenog sastava, livenja u peščane kalupe i sprovedenog termičkog tretmana. Promena režima toplotne obrade dovela je do pojave različitih kristalnih faza, različitog udela i sastava staklaste faze, različitih mikrostruktura, pri čemu su dobijeni i uzorci staklo-keramike različitih svojstava.

Uzorci staklo-keramike na bazi bazalta dobijeni procesom sinterovanja (uzorci SB) pokazali su, takođe visoku otpornost na dejstvo kavitacije. Sprovedeni postupci pripreme punioca na bazi bazalta i režim sinterovanja uzoraka SB doprineo je dobijanju kompaktne sitnozrne strukture uzoraka sa visokim svojstvima otpornosti na dejstvo kavitacije. U ranoj fazi procesa kavitacije veoma je teško otkriti jamice na površini uzoraka. Tek posle dužeg vremena dejstva kavitacije pojedinačne male jamice se pojavljuju i taj broj se povećava proporcionalno sa vremenom, lagano raste srednja površina formiranih jamica. Pri tome proces gubitka mase se odvija malom brzinom, na kraju ispitivanja, u trajanju 120 min, gubitak mase je 2,26 mg, kavitaciona brzina je 0,02 mg/min, a nivo oštećenja površine je

15%. Dominantan mehanizam oštećenja uzoraka SB je lagano povećanje gubitka mase uzoraka sa površine jamica bez deformacije i promene strukture uzoraka.

Dobijeni uzorci na bazi bazalta (LB i SB uzorci) pokazali su visoka svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije i mogu da se u praksi primene u uslovima gde se očekuju visoka kavitaciona opterećenja. Ispitivani uzorci mogu da se porede i prema izračunatoj kavitacionoj brzini, koja predstavlja odnos ukupnog gubitka mase uzoraka i vremena ispitivanja prema redosledu: 0,02 mg/min uzorci SB; 0,03 mg/min uzorci LB; 0,74 mg/min uzorci RB.

S obzirom da je bazalt jeftina mineralna sirovina, da Srbija raspolaže sa znatnim mineralnim resursima, da je proces sinterovanja pogodan za izradu staklo-keramike visokih performansi (za dobijanje uzoraka SB), kao i procesi topljenja i livenja sa termičkim tretmanom (za dobijanje uzoraka LB) postoji mogućnost široke primene ove vrste vatrostalnih materijala za izradu konstrukcionih delova za različite primene u metalurgiji i rudarstvu.

Pored istraživanja oblikovanih vatrostalnih materijala na bazi bazalta, istraživani su i procesi sinteze livačkih premaza na bazi bazalta, za razvoj Lost foam vatrostalnih premaza za primenu u livarstvu, kao i zaštitnih vatrostalnih premaza za zaštitu metalnih i nemetalnih površina. Premaz na bazi bazalta predstavlja novinu i do sada se nije koristio u livarstvu. Primenjena priprema vatrostalnih punioca na bazi bazalta procesima mlevenja i mehaničke aktivacije na veličinu prečnika zrna ispod 20 μm , primenjeni sastavi suspenzija premaza prema istraženim recepturama, uticali su na sintezu premaza dobrih tehnoloških svojstava, koja su određena prema standardu za ovu vrstu vatrostalnih proizvoda.

Svojstva zaštitnih vatrostalnih premaza na bazi bazalta nanesenih na metalne i polimerne materijale ispitivana su primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom. Dobijeni rezultati ispitivanja pokazali su visoku otpornost slojeva premaza na dejstvo kavitacije, sa malim gubicima mase, malim oštećenjima površine premaza i kavitacionim brzinama 0,11 mg/min za premaze nanete na metalne površine i 0,04 mg/min za premaze nanete na polimernu površinu.

Utvrđeno je da se mehanizam oštećenja površine premaza odvija stalnim nastajanjem i spajanjem sitnih jamica koje ne oštećuju mnogo površinu premaza tokom ekspozicije. Bitna karakteristika otpornosti i postojanosti premaza su dobra adhezionna svojstva, dobro prijanjanje premaza na nanete površine, što se postiže optimalnim sastavom premaza, odgovarajućom debljinom sloja premaza, pripremom površine pre nanošenja zaštitnih premaza.

Takođe, istraživanje je prošireno i na sintezu kompozita sa polimernom osnovom (nezasićena polestarska smola) i bazaltnim prahom kao ojačivačem. Dobijena su zadovoljavajuće svojstva

otpornosti ispitivanih kompozita na dejstvo kavitacije sa dodatkom ojačivača na bazi bazalta, veličine prečnika zrna 40 μm , u količini ispod 0,45 g. Dalja istraživanja kompozita polimerna osnova/bazalt treba proširiti na primenu epoksi smole za osnovu kompozita i bazaltnog praha manjeg prečnika zrna (ispod 10 μm), kao i ojačivača na bazi bazaltnog vlakna.

Literatura

1. M. Dojčinović: Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije, Monografija, Tehnološko- metalurški fakultet, Beograd, str. 99, 2013, ISBN: 978-86-7401-305-2.
2. S. Chandra Roy: Modeling and analysis of material behavior during cavitation erosion, PhD Thesis, University Grenoble Alpes, France, (English: NNT: 2015GREAI081, tel-01267573), 2015.
3. J. P. Franc, J. M. Michel (Eds): Fundamentals of cavitation, Series Fluid Mechanics and Its Applications, vol.76, 2004, XXII, 306 p., Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow.
4. B. Belahadji, J.P. Franc, J.M. Michel: A Statistical Analysis of Cavitation Erosion Pits, J. Fluids Eng. 113 (1991) 700–706. doi:10.1115/1.2926539.
5. T. Okada, Y. Iwai, S. Hattori, N. Tanimura: Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse, Wear, 184, 231-239, 1995.
6. Z. Xiaojun: Effect of surface modification process on kavitation erosion resistance, PhD Thesis, University Federal do Parana, Brazil, 2002.
7. J. Ripken: Comparative Studies of Drop Impingement Erosion and Cavitation Erosion, University of Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Project Report No 105, Minneapolis, Minnesota, 1969.
8. S. Hattori, H. Mori, T. Okada: Quantitative evaluation of cavitation erosion, J. Fluid. Eng.-T. ASME, 120 (1), 179-185, 1998.
9. N. Mustapić: Intenzifikacija procesa proizvodnje biodizela pomoću kavitacije, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Rijeka, 2012.
10. M. Szkodo: Estimation of cavitation erosion resistance of materials, Advances in Materials Science, vol.6, No.1, (9), 2006.
11. J.R. Laguna-Camacho, R. Lewis, M. Vite- Torres, J. V. Mendez- Mendez: A study of cavitation erosion on engineering materials, Wear, vol. 301, Issues 1-2, pp. 467-476, 2013.
12. J. Fan, J. Mazur, N. Melicharek, M. Schmittziel: Erosion, Cavitation and Fretting Corrosion, www.lettsvankirk.com/index.php?option=com.
13. F. Caupin, E. Herbert: Cavitation in water: A Review, C. R. Physique 7, 1000-1017, 2006.

14. A. Thiruvengadam: *Erosion, Wear, and Interfaces of Corrosion*, Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM), © 1974.
15. M. Dojčinović: Merenje hrapavosti kao alternativna metoda u proceni kavitacione otpornosti čelika, *Hem.Ind.* 67, 2, 323-330, 2013. doi:10.2298/HEMIND120320064D.
16. I. Mitelea, O. Oanca, I. Bordeasu, C. M. Craciunescu: Cavitation Erosion of Cermet-Coating Aluminium Bronzes, *Materials* 9 (3), 204, doi 10.3390/ma9030204, 2016.
17. W. J. Tomlinson, S. J. Matthews: Cavitation erosion of aluminium alloy matrix/ceramic composites, *Journals of Materials Science Letter* 13, 170-173, 1994.
18. R. Jasionwski, Z. Pedzich, D. Zasada, W. Przetakiewicz: Cavitation Erosion Resistance of Fe-Al Intermetallics Alloys and Al₂O₃-based Ceramics, *Archives of Metallurgy and Materials* 60 (2) 671-675, 2015.
19. M. D. Nedeloni, V. Cojocaru, R. Ciubotariu, D. Nedelcu: Cavitation Erosion Tests Performed by Indirect Vibratory Method on Stainless Steel Welded Samples with Hardened Surface, *Analele Universitaii Eftimie Murgu, Reisisa, anul XIX, Nr. 1*, 2012, ISSN 1453-7397.
20. I. Bordeasu, C. Patrasoiu, R. Badarau, L. Sucitu, M. Popoviciu, V. Balasoiu: New Contributions to Cavitation Erosion Curves Modeling, *FME Transactions*, vol.34, No.1., 39-43, 2006.
21. B. V. Hubballi, V. B. Sondur: A Review on the Prediction of Cavitation Erosion Inspection in Hydraulic Control Valves, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol.3, Issue 1, 2013.
22. I. Tzanakis, A. Georgoulas, M. Hadfields, N. Kotsovinos: Cavitation erosion damage of schroll stell plates by high-speed gas working fluid, *Int. J. Comp. Meth. and E xp. Meas.*, vol. 2, No.2, 168-183, 2014. doi: 10.2495/cmeme-v2-n2-168-183.
23. D. Hart, D. Whale: A review of cavitation- erosion resistant weld surfacing alloys for hydroturbines, Technical Services Eutectic Australia Pty Ltd., Australia, 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Publishing, 12 (2010), 012036, doi:10.1088/1755-1315/12/1/012036.
24. A. Karabenciov, A. D. Jurchela, I. Bordeasu, M. Popoviciu, N. Birau, A. Lustyan: Consideration upon the cavitation erosion resistance of stainless steel with Chromium and Nickel content, 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems IOP Publishing, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 12, 2010. 012036, doi:10.1088/1755-1315/12/1/012036.

25. M. Mlkvik, R. Olšiak, B. Knižat, J. Jedelsky: Character of the cavitation erosion on selected metallic materials, *EJP Web of Conference*, 67, 02076 (2014), doi: 10.1051/enjpof/20146702076.
26. D. Krahl, J. Weber, M. Fuchs: Visualization of cavitation and investigation of cavitation erosion in a valve, 10th International Fluid Power Conference, Dresden, Group G-Fundamentals/ Paper G-2, p.333-348, 2016.
27. S. J. Pawel: Assessment of Cavitation - Erosion Resistance of Potential Pump Impeller Materials for Mercury Service at the Spallation Neutron Source, National Laboratory for Department of Energy, Springfield, VI, USA, Materials Science and Technology Division, ORNL/TM-2007/033, 2007.
28. R. H. Richman, W. P. McNaughton: Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals, *Wear*, vol.140, Issue 1, pp. 63-82, 1990.
29. V. Aleksić, M. Dojčinović, Lj. Milović, I. Samardžić: Cavitation damages morphology of high- strength low- alloy steel, *Metalurgija* 55, 3, 423-425, 2016.
30. Ch. Feng, J. Shuyun: Cavitation erosion resistance of diamond- like carbon coating on stainless steel, *Appl. Surf. Sci.*, 292, 16–26, 2014.
31. A. Karrab, M. A. Doheim, M. S. Aboaraia, S. M. Ahmed: Examination of Cavitation Erosion particles morphology in corrosive waters, *Journal of Engineering Sciences*, Assiut University, vol. 40, No. 6, pp.1793-1814, 2012.
32. R. Singh, S. K. Tiwari, S. K. Mishra: Cavitation Erosion in Hydraulic Turbine Components and Mitigation by Coatings: Current Status and Future Needs, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21 (7) 1539-1551, 2012.
33. D. A. Hammond, M. F. Amateau, R. A. Queeney: Cavitation Erosion Performance of Fiber Reinforced Composites, *Journal of Composite Materials*, 27, 1522-1544, 1993.
34. A. Fairfield: Cavitation damage to potential sewer and drain pipe materials, *Wear* 317, 92–103, 2014.
35. M. Kumar, A. S. Whittaker, M. C. Constantinou: Experimental investigation of cavitation in elastomeric seismic isolation bearings, *Engineering Structures* 101, 290–305, 2015.
36. K. M. Marshek, J. M. Rinehart, R. Gartner: Wear damage to a thermoplastic conveyer chain, *Wear* 37, 387-391, 1976.
37. F. Kalateh, R. Attarnejad: Finite elements simulation of acoustic cavitation in the reservoir and effect on dynamic response of concrete dams, *Finite Elements in Analysis and Design* 47, 543–558, 2011.

38. A. W. Momber: Short- time cavitation erosion of concrete, *Wear* 241, 47-52, 2000.
39. W. Fan, Y. Bai: Review of suspension and solution precursor plasma sprayed thermal barrier coatings, *Ceramic International*, vol. 42, Issue 13, 14299-14312, 2016.
40. H. Li, Z. Cui, Z. Li, S. Zhu, X. Yang: Microstructure and Cavitation Erosion Properties of Ceramic Coatings Fabricated on Ti-6Al-4V Alloy by Pack Carburizing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, (8), 2014.
41. T. Fukai, K. Matsumoto: Cavitation Erosion of Ceramic Coatings and its Evaluation Method, Research Center, Toyo Engineering Corporation, 11, 25, 2009.
42. A. Krella, A. Czyzniewski: Influence of the substrate hardness on cavitation erosion resistance of TiN coating, *Wear* 263, pp. 395-401, 2007.
43. V. Matikainen, K. Niemi, H. Koivuluoto, P. Vuoristo: Abrasion, Erosion and Cavitation Erosion Wear Properties of Thermally Sprayed Alumina Based Coatings, *Coatings* 4, 18-36, 2014; doi: 10.3390 /coatings4010018.
44. T. Pramod, R. K. Kumar, S. Seetharamu, M. Kamaraj: Effect of Porosity on Cavitation Erosion Resistance of HVOF Processed Tungsten Carbide Coatings, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 307-314, 2014., ISSN 2250-3234.
45. R. Sollars, A. D. Beitelman: Cavitation- Resistent Coatings for Hydropower Turbines, Construction Engineering Research Laboratory, US Army Corps of Engineerings, Engineering Research and Development Center, ERDC/CERL TR - 11-21, 2011.
46. G. F. Schmitt: Coating and Thermal Protection Materials Branch Nonmetallic Materials Division, Liquid and solid particles impact erosion, Technical report AFML-TR-79-4122, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 45433, USA, 1979.
47. R. Kertscher et al: First Result of Cavitation Erosion Behavior of Plasma Nitrided Niobium: Surface Modification, *Materials Research* 18 (6) 1242-1250, 2015.
48. D. Niebuhr: Cavitation erosion behavior of ceramic in aqueous solution, *Wear* 263, Issue 1-6, 295-300, 2007.
49. G. Garcia- Atance Fatjao, M. Hadfield, C. Vieillard, J. Sekulic: Early stage cavitation erosion within ceramics- An experimental investigation, *Ceramic International*, vol. 35, Issue 8, 3301-3312, 2009.
50. W. J. Tomlinson, S. J .Matthews: Cavitation erosion of structural ceramics, *Ceramic International*, vol.20, Issue 3, 201-209, 1994.

51. J. Lu, K. H. Zum Gahi, J. Schneider: Microstructural effects on the resistance to cavitation erosion of ZrO₂ ceramic in water, *Wear*, vol. 265, Issue 11-12, 1680-1686, 2008.
52. K. R. Gopi, R. Nagarajan: Application of Powder Ultrasound in Cavitation Erosion Testing of Nano–Ceramic Particle/Polymer Composites, *Solid State Phenomenon*, vol. 136, pp 191-204, doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.136.191, 2008.
53. U. Litzow, K. H. Zum Gahr, J. Schneider: Cavitation erosion of advanced ceramics in water, *International Journal of Materials Research: Vol. 97, No. 10*, pp. 1372-1377, 2006, doi: 10.3139/146.101380.
54. N. Qiu, L. Wang, S. Wu, D. S. Likhachev: Research on cavitation erosion and wear resistance performance of coatings, *Engineering Failure Analysis* 55, 208–223, 2015.
55. J. Denny: *A: Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd Edition, New Jersey: Prentice Hall, Inc., © 1996.
56. M. Hadad, S. Siegmund: Cavitation Erosion Vibratory Test (ASTM G 32), *NOWA SWISS COATING TECHNOLOGY*, pp 1-2, 2012.
57. S. Hattori: Recent Investigations on Cavitation Erosion at the University of Fukui, in: K.-H. Kim, G.L. Chahine, J.-P. Franc, A. Karimi (Eds.), *Adv. Exp. Numer. Tech. Cavitation Eros. Predict*, Springer, pp. 257–282, 2014.
58. ASTM G32-10, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org, n.d
59. ASTM G134-95 (2001), Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by a Cavitating Liquid Jet, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, www.astm.org, n.d.
60. A. F. Alturki, A. Abouel- Kasem, S. M. Ahmed: Characteristics of Cavitation Erosion Using Image Processing Techniques, *Journal of Tribology*, vol.135, Issue 1, 014502, Paper No: TRIB-1-1056, 2012.
61. Image Pro Plus 6.0, The Proven Solution for Image Analysis, Media Cybernetics: Rockville, MD, USA, 1993.
62. J. Dostanić, M. Dimitrijević, R. Jančić-Heinemann, T. Volkov-Husović: Primena analize slike u karakterizaciji materijala, *SM Srbije Beograd*, 2008.
63. C. C Berton-Carabin, K. Schroen: Pickering Emulsions for Food Applications: Background, Trends and Challenges, *Annual Review of Food Science and Technology*, 6 (1), 2015.

64. L. Stricker: Acoustic cavitation and Sonochemistry, PhD Thesis, University of Twente, Physics of Fluids, Netherlands, 2013.
65. N. Bremond, M. Arora, C. D. Ohl, D. Lohse: Controlled multibubble surface cavitation, *Phys. Rev. Lett.* 96, 224501, 2006.
66. D. Fernandez Rivas, B. Verhaagen, A. Galdamez Perez, E. Castro-Hernandez, R. van Zwieten, K. Schroen: A novel ultrasonic cavitation enhancer, *Journal of Physics: Conference Series* 656, 012112, 2015, doi:10.1088/1742-6596/656/1/012112.
67. D. F. Rivas, B. Verhaagen, editors: Special Issue: Cleaning with bubbles, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015.
68. Sonics & Materials, Inc.: Cavitation erosion of ultrasonic probes, www.sonics.com.
69. Y. He, Z. Shen: Experimental Research on Cavitation Erosion Detection Based on Acoustic Emission Technique, *Proceedings, 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University of Granada*, 12-15 September 2012.
70. A. Abouel- Kasem, A. Ezz El- Deen, K. M. Emara, S. M. Ahmed: Investigation into Cavitation Erosion Pits, *J. Tribol* 131 (3), 031605, 2009.
71. M. Dular, B. Stoffel, B. Sirok: Development of cavitation erosion model, *Wear* 261, 642-655, 2006.
72. M. Dular, A. Osterman: Pit clustering in cavitation erosion, *Wear* 265, 811-820, 2008.
73. M. Dular, B. Bachert, B. Stoffel, B. Širok: Relationship between cavitation structures and cavitation damage, *Wear* 257, 1176-1184, 2004.
74. M. Dular, O. Coutier- Delgosha: Numerical modeling of cavitation erosion, *ERCOFTAC Meeting, Zagreb*, 2009.
75. P. K. Koukouvini, G. Bergeles, M. Gavaises: A new methodology for estimating cavitation erosion: Application on a high speed cavitation test rig, *11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Proceedings*, pp.1-11, 2014.
76. J. P. Franc: Recent Investigation on cavitation Erosion, *University of Grenoble, Bubble Cluster Dynamics Workshop Institute DAlmbert- paris, Legi BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9*, 2013.

77. F. G. Hammit: Observation on Cavitation Damage in a Flowing System, Trans. ASME, J. of Basic Engineering, pp.3, 1963.
78. T. J.C. Terwisga, P. A. Fitzsimmons, L. Ziru, E. Jan Foeth: Cavitation Erosion: A review of physical mechanisms and erosion risk models, Proceedings of the 7th International Symposium on cavitation, CAV 2009, Paper No.41, Ann Arbor, Michigan USA, 2009.
79. G. Bark, J. Friesch, G. Kuiper, J. T. Ligtelin: Cavitation Erosion on Ship Propellers and Rudders, In Proceedings of 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Luebeck- Trevemuende, Germany, 2004.
80. S. W. Doroff, R. S. Miller, A. P. Thiruvengadam, W. C. Wesrcott: Spheroidal particles produced by cavitation erosion, Nature 247, 363-364, 1974.
81. K. K. Shal'nev, I. I. Varga, D. Sebestyen: Investigation of the scale the scale effects of cavitation erosion, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol.260, No.1110, 256-266, 1966.
82. Lord Rayleigh O.M. F.R.S. (1917) VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity, Philosophical Magazine, 34:200, 94-98, DOI: 10.1080/14786440808635681.
83. Y. Li, H. S Chen, D. R. Chen, J. D. Wang: Effect of micro/ nano – particles in cavitation erosion, J. Nanosci. Nanotechnol. 9 (2), 783-7, 2009.
84. H. Soyama, H. Kumano, M. Saka: A new parameter to predict cavitation erosion, Tohoku University, Sendy 980-8579, Japan, CAV2001: Session A3.002, 2001.
85. M. Grekula, P. Lindell: Cavitation Erosion Damage: Running the risk of costly recurrent repairs, The Swedish Club Letter, 1-2007, Loss Prevention.
86. S. Hattori, E. Nakao: Evaluation of Cavitation Erosion based on Erosion Particles, CAV2001: session A 4.001, 2001.
87. P. A. Brandner, Y. Lecoffre, G. Walker: Development of an Australian National Facility for Cavitation Research, 6th International Symposium on Cavitation, CAV2006, Wageningen, The Netherlands, Sept. 2006.
88. L. Barbaca, B. W. Parce, P. A. Brandner: Computational Investigation of Ventilated Cavity Flow Over a 2-D Fence, 19th Australasian Fluid Mechanics Conference Melbourne, Australia 8-11 December 2014.
89. L. Barbaca, B. W. Parce, P .A. Brandner: Experimental Investigation of Ventilated Cavity Flow Over a 3D Wall Mounted Fence, ISROMAC 2016, International

Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery Hawaii, Honolulu, April 10-15, 2016.

90. G. L. Chahine, J. P. Franc, A. Karimi: Laboratory Testing Methods of Cavitation Erosion, Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction, Fluid Mechanics and Its Applications 106, K.-H. Kim et al. (eds.), Chapter 2, DOI: 10.1007/978-94-017-8539-6 2, Springer Science + Business Media Dordrecht, 2014.
91. M. Seif, A. Asnaghi, E. Jahanbakhsh: Drag force on a flat plate in cavitating flows, Published Online: 2009-10-21, DOI: <https://doi.org/10.2478/v10012-008-0028-2>.
92. D. Frunyaverde, C. Virel Campian, V. Cojocaru, G. Marginean, M. Baran, R. Ciubotariu: Influence of welded layer thickness on the cavitation erosion resistance, Selected Topics in Energy, Environment, Sustainable Development and Landscaping, pp. 316-320, ISBN: 978-960-474-237-0, 2012.
93. F. Caupin: Liquid-vapor interface, cavitation and the phase diagram of water, Phys. Rev. E71, (1-5), 051605, 2005.
94. M. El Mekki, C. Ramboz, L. Perdereau, K. Shmulovich, L. Mercury: Life time of superheated water in micrometric synthetic fluid inclusion, p. 279-292, in Metastable System under Pressure, Ed. S. Rzoska, A. D. Rzoska, V. Mazur, Springer, 2010.
95. M. Harison: An Experimental Study of Single Bubble Cavitation Noise, J. Acoust. Soc. Am. 24, 776, doi:10.1121/1.1906978, 1952.
96. L. A. Crum: Surface Oscillations and Jet Development in Pulsating Bubbles, Le J. Phys. Colloq. 40, C8-285-C8-288, doi: 10.1051/jphyscol: 1979849, 1979.
97. M. Plesset, R. Chapman: Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighbourhood of a solid boundary, Journal of Fluid Mechanics, vol.47, Issue 2, 283-290, 1971.
98. C. T. Hisao, A. Jayaprakash, A. Kapahi, J. K. Choi: Modelling of material pitting cavitation bubble collapse, Journal of Fluid Mechanics, vol.755, pp. 142-175, 2014.
99. K. H. Kim, G. Chahine, J. Franc, A. Karimi, eds., Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction, Springer, 2014.
100. A. Philipp, W. Lauterborn: Cavitation erosion by single laser- produced bubbles, J. Fluid. Mech. 361, 75–116, doi:10.1017/S0022112098008738., 1998.
101. S. Fujikawa, T. Akamatsu: Effect of non-equilibrium condensation of vapor on the pressure wave produced by the collapse of a bubble in a liquid, J Fluid Mech. vol.97, Issue 3, pp. 481-512, 1980.

102. M. Futakawa, H. Kogawa, C. Tsai, S. Ishikura, Y. Ikeda: Off-line tests on pitting damage in Mercury target, JAERI- Reseach 2003- 005, Japan, 2003.
103. V. Djordjevic, J. Kreiner, Ž. Stojanovic: Cavitation Erosion Estimation of Composite Materials, 33rd International SAMPE Symposium: 1561-1570, Escaler, 1988.
104. M. Dular, M. Petkovšek: On the Mechanisms of Cavitation Erosion- Coupling High Speed Videos to Damage Patterns, Experimental Thermal and Fluid Science, vol.68, 359-370, 2015.
105. V. Srdić: Procesiranje novih keramičkih materijala, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, 2004.
106. M. Tecilazić–Stevanović: Osnovi tehnologije keramike, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 1990.
107. T. Volkov Husović: Vatrostalni materijali- svojstva i primena, Savez inženjera metalurgije Srbije, 2007.
108. Lj. Kostić–Gvozdenović, R. Ninković: Neorganska hemijska tehnologija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 1997.
109. S. Drljević: Teoretske i tehnološke osnove proizvodnje vatrostalnog materijala, Zenica, 1999.
110. Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, grupa autora: M. Galić, I. Katavić, I. Kerekeš, J. Pirš, urednik mr M. Galić, Poglavlje: Vatrostalni materijali, s.542-569, 1985.
111. A. Terzić, Lj. Pavlović: Konstrukcioni materijali za visokotemperaturnu primenu, ITNMS Beograd, 2009.
112. Projekat MNT RS, TR 6722: Razvoj tehnologija proizvodnje punila i prahova u raznim granama industrije, 2005-2007.
113. A. Terzić, D. Izvonar. Lj. Pavlović: Ispitivanje nemetalnih mineralnih komponenti za primenu u konstrukcionim materijalima, ITNMS Beograd, 2007.
114. R. Simic, A. Prstic, N. Gilic: Technical and economical base for building capacities for obtained casting products from basalt ore in Serbia, Proceedings of Conference - Cement 2002, Struga, Macedonia, p.156-160, 2002.
115. A. Prstic, Z. Aćimovic, M. Cosic, Lj. Andric, Z. Tanaskovic: Application of casting materials based basalt ore in metallurgy and mining industry, XI Balkan Mineral Processing Congress, Tirana, Albania, Proceedings, p.422 – 425, 2005.

116. A. Prstić, R. Simić, Lj. Andrić, Z. Acimović: Melting and casting of basalt ore, Mineral Processing in 21st Century –X Balkan Mineral Processing Congress, Varna, Bulgaria, Preceedings, p. 893-897, 2003.
117. T. E. Warner: Synthesis: Properties and Mineralogy of Important Inorganic Materials, A John Wiley and Sons, Ltd. Publication, 2011.
118. Z. Acimović, A. Prstić, Lj. Andrić, V. Milošević, S. Milićević: Ceramic Coating for Cast House Application, Chapter 9, pp.261-286, Ceramic Coatings - Applications in Engineering, Feng Shi (Ed.), 2012.
119. Z. Acimović, Lj. Andrić, V. Milošević, S. Milićević.: Refractory coating based on cordierite for application in new evaporate pattern casting process, Ceramic International, 37 (2011) 99-104, 2011.
120. Pavlovic M., Dojcinovic M., Martinovic S., Vlahovic M., Stevic Z., Volkov-Husovic T.: Non destructive monitoring of cavitation erosion of cordierite based coatings, Composites Part B 97 (2016) 84-91.
121. A. Prstić, Z. Acimović, Lj. Andrić, J. Stojanović, A. Terzić: Zircon-based coating for application in Lost foam casting process, CI&CEQ, 18 (4) 587-593, 2012.
122. D. Duval, S. Risbud, J. Shackelford: Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing, Chapter 2: Mullite, Springer, 2008.
123. H. Schneider, J. Schreuer, B. Hildmann: Structure and properties of mullite - A review, J. Am. Ceram Soc, 28 (2), 329-344, 2008.
124. C. Y. Chen, G. S. Lan, W. H. Tuan: Microstructural evolution of mullite during the sintering of kaolin powder compacts, Ceramic International, 26, 715-720, 2000.
125. D. Doppalapudi, S. N. Basu: Structure of mullite coatings grown by chemical vapor deposition, Materials Science and Engineering, A231, 48-54, 1997.
126. F. Gridi- Bennadji: Matériaux de mullite à microstructure organisée composés d'assemblages muscovite – kaolinite, PhD Thesis, Universite de Limoges, 2007.
127. J. Jacas-Rodriguez, C. R. Perez-Pariente, I. Gonzalez, J. Diaz-Carretero. J. Agundez-Rodriguez, M. Hernandez-Velazd: An approach to mesoporous silica into α -Al₂O₃-mullite cavities, Materials Letters 59, 1820-1823, 2005.
128. J. A. Santillan, H. B. Ramirez, R. Bradt: Dense mullite from attrition milled kyanite and alumina, J Ceram Processing Research, vol.8, No 1, 1-11, 2007.
129. L. Shu-quan, Z. Jie, T. Xiao-ping, T. Yan: Mechaical properties and structure of zirconia--mullite ceramics prepared by in-situ controlled crystallization od Si-Al-Zr-

- O amorphous bulk, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18, 799-803, 2008.
130. R. Ruh: Mullite–SiC Whisker and Mullite–ZrO₂–SiC Whisker, Handbook of Ceramic Composites, Chapter 14, pp. 325-346, Kluwer Academic Publishers, 2005.
131. M. J. Viens: Mechanical Properties of a Porous Mullite Materials, NASA Technical Memorandum 104547, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 1991.
132. C. Sadic, A. Albizane, I. El Amrani: Characterization of elaborated Moroccan mullite to improving porous refractories quality, Ceramica 59, 609-613, 2013.
133. I. A. Aksaay, D. M. Dabbs, M. Sarikaya: Mullite for Structural, Electronic and Optical Application, J. Am. Ceram. Soc 74 (10), 2343-58, 1991.
134. R. R. Tummala: Ceramic and Glass-Ceramic Packaging in the 1990s, J. Am. Ceram. Soc., 74 (5), 8955-908, 1991.
135. Pavlović M., Dojčinović M., Martinović S., Vlahović M., Stević Z., Volkov-Husović T.: Cavitation damage of mullite ceramic: Implementation of image analysis, 48th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor 2016, Proceedings, p.241-244
136. A. Pyzik, C. Han, C. Li, M. Malanga, F. Mao, D. Merrick, A. Prunier, C. Todd, D. Turmel, K. Yang: Development of Acicular Mullite Materials for Diesel Particulate Filters Application, Deer Conference, Chicago, 2005.
137. X. Q. Cao, S. Vassen, D. Stoeber: Ceramic materials for thermal barrier coating, Journal of the European Ceramic Society, 24, 1-10, 2004.
138. H. Jianfeng, Zh. Bo, OY. Haibo, C. Liyun, L. Cuiyan, F. Jie, L. Hejun: Effect of particle size on anti-oxidation property of mullite coating prepared by pulse arc discharge deposition, Royal Society of Chemistry Advanced, 5, 103744-103751, 2015, DOI: 10.1039/c5ra19573j.
139. G. H. Gibbs: Polymorphisam of cordierite, The American Mineralogist, 51, 1068-1087, 1996.
140. N. Nikolić, S. Radić, A. Maričić, M. Ristić: Kordijeritna keramika, SANU i Tehnički fakultet Čačak, Beograd, 2001.
141. M. Jovanović, M. Ristić: Application of the cordierite phase for high density bodies, Chem. Ind., 8, 1373-1377, 1987.
142. G. W. Parmelee, G. H. Baldwin: Anwendung von Talk Porzellanmassen, Trans. Amer. Soc., 15, 606-610, 1913.

143. G. A. Rankin, H. E. Mervin: Ternary system MgO-Al₂O₃-SiO₂, J. Am. Ceram. Soc. 45, 30-35, 1918.
144. Lj. Trumbulović: Efekti primene kordijeritne keramike u livarstvu, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, 2003.
145. L. Zhou, C. Wang, W. Liu, H. Yong: Influence of titanium dioxide on the microstructure and properties of porous cordierite ceramics, Rare Met Mater Eng, 38, 366–368, 2009.
146. K. Sumi, Y. Kobayash, E. Kato: Synthesis and sintering of cordierite from caoline and basic carbonate: J. Am. Soc. J., 106 89-93, 1998.
147. M. Hirano, H. Inada: Preparation and characterization of cordierite- zirconia composites from co-precipitated powder, J. Mater. Sci., 28, 74–78, 1993.
148. S. Kumar Marikkannan, E. Perumal Ayyasamy: Synthesis, characterization and sintering behaviour influencing the mechanical, thermal and physical properties of cordierite-doped TiO₂, Journal of Materials Research and Technology, vol. 2, Issue 3, 269-275, 2013.
149. Z. Shamsudin, A. Hodzic, C. Soutis, R. J. Hand, S. A. Hayes, I. P. Bond: Characterization of thermo-mechanical properties of MgO-Al₂O₃-SiO₂ glass ceramic with different heat treatment temperatures, J. Mater. Sci., 46, 5822–5829, 2011.
150. Z. Aćimović, A. Prstić, Lj. Andrić: Primena kordijerita za izradu livačkih premaza u livarstvu, Hem.Ind.61 (1) 39-43, 2007, YU ISSN 0367-598X
151. M. Jovanović, M. Ristić: Specijalna tehnička keramika na bazi talka, Hem.Ind. 8, 1370-1373, 1957.
152. R. Petrović, Đ. Janačković, S. Zec, S. Drmanić, Lj. Kostić-Gvozdrenović: Phase-Transformation Kinetics in the Three Phase Cordierite Gel, Journal of Materials Research, 16, 451-458, 2001.
153. S. Martinović, M. Vlahović, M. Dojčinović, M. Pavlović, T. Volkov Husović: Comparison of cavitation erosion behavior of cordierite and zircon based samples using image and morphological analyses, Materials Letters 220 (2018) 136-139, ISSN: 0167-577X, IF: 2,687 (97/285).
154. P. Patnaik: Handbook of Inorganic Chemicals, The McGraw-Hill Companies, ISBN 0-07-049439-8, 2003.
155. D. R. Lide: Handbook of Chemistry and Physics (87 ed). Boca Raton, FL: CRC Press, 4–96, 1998, ISBN0-8493-0594-2.

156. F. L. Pirkle, D. A. Podmeyer: Zircon: Origin and Uses, Transactions, vol. 292, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., USA, 62, 1988.
157. J. L. Li, R. S. Chen, W. Ke: Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21 761–766, 2011.
158. SRPS EN 12890:2000 / CEN/TC 190 Premazi za pešćane kalupe i jezgra, 2000.
159. SRPS B.H9.102:1980 Premazi–materijali za pešćane kalupe i jezgra, klasifikacija, tehnički uslovi primene, metode ispitivanja, 1980.
160. M. Pavlović, M. Dojčinović, S. Martinović, M. Vlahović, Z. Stević, M. Jovanović, T. Volkov-Husović: Determination of Degradation Level during Cavitation Erosion of Zircon Based Ceramic, Science of Sintering, 49 (2017) 175-185.
161. M. Branković: Tehnologija livačkih kalupa, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1982.
162. Z. Aćimović, A. Terzić, Lj. Andrić, Lj. Pavlović, M. Pavlović: Application of Chromite in the Production of Refractory Coatings, Interceram –Refractories Manual II/2013, 290-293; Interceram 62, (4), 290-293, 2013.
163. Z. Aćimović, A. Prstić, Lj. Andrić: The characterization of talc-based coating for application for Al-Si alloy casting, CI&CEQ 13 (1) 38-40, 2007, YU ISSN 1451-9372.
164. Barth, T. F. W.: Theoretical petrology, 3rd ed.; John Wiley and Sons Inc.: New York, USA, pp. 120-150, 1952.
165. C. Parmelee: Ceramic Glasses, M. Deker, Chicago, 1986.
166. W. D. Kingery, H. K. Bowen, D. R. Uhlman: Introduction to Ceramics, a Wiley – Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.
167. G. H. Beall, H.L. Rittler: Basalt glass ceramics, Am Ceram Soc Bull, 55 (6) 579–582, 1976.
168. M. Tajder: Petrogeneza- Geneza eruptivnih stijena, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1964.
169. G.A. Khater, A. Abdel- Motelib, A.W. El Manawi, M.O. Abu Safiah: Glass-ceramics materials from basaltic rocks and some industrial waste, J Non-Crystal. Solids 358, 1128-1134, 2011.
170. S. Marica: Quaternary basalts from Romania- Characteristics and non-conventional uses. Bulletin of the Geological Society of Greece 2004, 36, Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki, April 2004, pp. 104-108.

171. A. Karamanov; S. Ergul; M. Afyildiz, M. Pelino: Sinter -crystallization of a glass obtained from basaltic tuffs, *J Non-Cryst Solids* 354, 290-295, 2008.
172. M. Tošić, R. Dimitrijević, S. Radosavljević, M. Đuričić: Influence of the iron oxidation state on the nucleation of basalt glass, *J. Serb. Chem. Soc.* 63 (12) 1019-1030 (1998), JSCS-2613.
173. A. Prstić, Z. Aćimović, Lj. Pavlović, Lj. Andrić, A. Terzić: The application of basalt in the manufacturing of ceramic glazes. *J. Min. Metall. Sect. A.* 43, 53-60, 2007.
174. Cocić, M.; Logar, M.; Matović, B.; Poharc- Logar, V.: Glass-Ceramics Obtained by the Crystallization of Basalt, *Sci. Sinter.* 42, 383-388, 2010. <https://doi:10.2298/SOS1003383C>.
175. B. Matović, S. Bošković, M. Logar: Preparation of basalt -based glass ceramics. *J. Serb. Chem. Soc.* 68, 505-510, 2003. <https://DOI:10.2298/JSC0306505M>.
176. D. Čikara, A. Todić, D. Čikara-Anić.: Possibilities of Production of Wear Resistant Construction Elements by Processing of Serbian Basalt. *FME Trans.* 38, 203-207, 2010.
177. M. Pavlović, M. Sarvan, F. Klisura, Z. Aćimović: Bazalt - sirovina za proizvodnju agregata za moderne pokrove cesta i željezničkih pruga (Basalt - Raw Material for Production of Aggregate for Modern Road and Rail Shroud), Četvrta konferencija – Održavanje 2016, Proceedings, s. 175., 02-04. juni 2016, Zenica BiH, Godina 4, No1, 2016
178. A. Prstić, Z. Aćimović, A. Terzić, Lj. Pavlović, Z. Tanasković: The application of basalt in civil engineering, 4th International Conference GNP 2012 Civil Engineering- Science and Practice, Žabljak, Montenegro, Proceedings, p. 125., 2012.
179. Aćimović Z., Andrić Lj., Milošević V., Milićević S.: Wear resistance basalt production for application in mining industry, IX Symposium Metali i nemetali, Zenica B&H, 23-24.04.2012. Proceedings, p. 150-155, 2012.
180. Rudarski institut Beograd: Istraživanje mogućnosti eksploatacije i prerade bazalta ležišta "Vrelo" Kopaonik, Beograd, 1993.
181. R. Simic, N. Gilic: Geology, use and processing of basalt ore bearing Vrelo-Kursumlia, Conference Rock, Arandelovac, Proceedings, p. 150-155., 2000.
182. U. Gunay, M. Ozturk, E. Ercenk, S. Yilmaz: The Investigation of the Effect of Particle Size and velocity on Solid particle Wear Properties of Basalt Base Glass -ceramics, Proceedings of the 6th International Advances in Applied Physics and

- Materials Science Congress & Exhibition, AIP Conf. Proc. 1809, 020022-1–020022-6; 24 February 2017., doi: 10.1063/1.4975437
183. Andrić, Lj.; Aćimović, Z.; Trumić, M.; Prstić, A.; Tanasković, Z.: Specific characteristic of coating glazes based on basalt, *Mater Des.* 33, 9-13, 2012.
184. S. Yılmaz; Bayrak, G.; Sen, S.; Sen, U.: Structural characterization of basalt-based glass-ceramic coatings. *Mater Des.* 27, 1092–1096, 2006.
185. E. Ercenk; Ugur, S.; Yılmaz, S.: Structural characterization of plasma sprayed basalt-SiC glass-ceramic coatings, *Ceram. Int.*, 37, 883-889, 2011.
186. V. Fiore, G. Di Bella, A. Valenza: Glass - basalt/epoxy hybrid composites for marine applications, *Mater Des.*, 32, 2091–2099, 2011.
187. M. Dehkordi, T. Nosraty, H. Shokrieh, M. M. Minak, G. Ghelli: Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics, *Mater. Des.* 31, 3835–3844, 2010. doi:10.1016/j.matdes.2010.03.033.
188. A. Todić, B. Nedeljković, D. Cikara, I. Ristović: Particulate basalt– polymer composites characteristics investigation, *Mater. Des.* 32, 1677–1683, 2011. <https://doi:10.1016/j.matdes.2010.09.023>.
189. Z. Janjušević, Z. Gulišija: *Procesi na kontaktnoj površini metal-kalup u funkciji kvaliteta odlivaka*, ITNMS Beograd, 2009.
190. M. Tomović: *Livenje lakih i obojenih metala*, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, 1990.
191. U. C. Nwaogu, N. S. Tiedje: Foundry Coating Technology: A Review, *Mater. Sci. Applic.*, 2, 8, 1143-1160, 2011.
192. R. W. Davies: The replacement of solvent based coatings in modern foundries, *Foundrymen*, vol. 89 (9), 287-290, 1996.
193. R. Monroe: *Expandable Pattern Casting*, AFS, USA (1994).
194. R. A. Rapp: *Surface Coatings for High-temperature Alloys*, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, p. 9013 - 9018, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 2003.
195. R. E. Moore: *Refractoriness, Structure and Properties*, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 8079-8099, University of Missouri- Rolla, Rolla, Missouri, USA, 2001.
196. M. Karimian, A. Ourdjini, M.H. Idris, T. Chuan and H. Jafari: Process Control of Lost Foam Casting using Slurry Viscosity and Dipping Time, *J. Appl. Sci.*, 11, 3655-3658, 2011.

197. M. Sands, S. Shivukumar: Influence of coating thickness and sand fineness on mold filling in the lost foam casting process, *Journal of Materials Science* 38, 667-673, 2003.
198. Ž. Josipović: Uticaj tehnoloških parametara na kvalitet vatrostalnih premaza na bazi keramičkih materijala za peščane kalupe i jezgra, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2001.
199. A. Prstić: Sinteza, karakterizacija i primena novih vrsta vatrostalnih premaza u livarstvu, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Tehnološko-metalurški fakultet, 2016.
200. Z. Aćimović, M. Đuričić, S. Drmanić, R. Đuričić: The influence of the parameters of Lost foam process on the quality of the aluminium alloys castings, *Chem. Ind.* 64 (2) 121-127, 2010.
201. Lj. Andrić, M. Petrov, Z. Aćimović, M. Trumić: A kinetic study of mechanical activation of mica in a vibratory mill, *Metalurgia International*, vol.XVII, No 7, 33-38, 2012.
202. B. Fotoohi: A study of mechanochemical activation in solid-state synthesis of advanced ceramic composition, Master Thesis, School of Chemical Engineering Interdisciplinary Research Centre (IRC) in Materials Processing, The University of Birmingham, 2010.
203. D. Živanović, Lj. Andrić, S. Milošević: Mechanical activation of mica, *International Journal of Science of Sintering*, 28, (2), 117-122, 1996.
204. P. Balaz: Mechanical activation in hydrometallurgy, *Int. J. Miner. Process.* 72, 341–354, 2003.
205. S. Shivukumar, L. Wang, B. Steenhof: Physico-Chemical aspect of the Full mould casting of aluminium alloys, Part I: The Degradation of Polystyrene, *Trans. AFS* 95, 791-800, 1987.
206. Lj. Trumbulović, Z. Aćimović, Z. Gulišija, Lj. Andrić: Correlation of Technological Parameters and Quality of Castings Obtained by the EPC Method, *ELSEVIER, Mater. Lett.* 58, 1726-1731, 2004.
207. Y. Akbarzadeha, M. Rezaeiea, A. Akbar Babaluo, A. Charchia, H. R. Azimia, Y. Bahlulib: Mikrostruktura, permeability and rheological behavior of lost foam refractory coatings, *Surface&Coating Technology* 202, 4636-4643, 2008.

208. W. D. Griffiths, P. J. Davies: The permeability of Lost Foam pattern coatings for Al alloy casting, *Journal of Materials Science*, vol.43, Issue 16, pp. 5441-5447, 2008.
209. N. Don Cho: Effect of coating materials on fluidity and temperature loss of molten metal in full mould, 56th World Foundry Congress, Dusseldorf, German, GIFA, No 7.1.7.10, 1989.
210. A. Prstić, Z. Aćimović, A. Terzić, Lj. Pavlović, S. Grujić: Development of new cordierite –based refractory coatings for casting application, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 1-11, IJAC-12010, 2012.
211. Z. Aćimović, Lj. Pavlović, Lj. Trumbulović, Lj. Andrić, M. Stamatović: Synthesis and Characterization of the Cordierite Ceramics from Non-Standard Raw Materials for Application in Foundry, *ELSEVIER, Mater. Letter* 57, 2651-2656, 2003.
212. R. Ballman: Assembly and coating of polystyrene foam patterns for the Evaporate Pattern Casting Process, 92nd Casting Congress, Hartford, Connecticut, USA, *Proceedings*, pp. 250-260, 1988.
213. A. Ch. Psimenos, G. Eder: PCT- Pure Coating Technology, A new Coatings Technology from Furtenbach, *Foundry* 49 (3-4), pp.22-28, 2010.
214. J. Milić, Lj. Andrić, A. Terzić, Marko Pavlović, Z. Aćimović: Synthesis and characterization of refractory coats based mica for application in new casting process, *Intern. Sci. Conf. 10th Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, The Book of Abstracts*, pp 57., Banja Luka, 2013.
215. R. Sollars, Alfred D. Beitelman: Cavitation- Resistent Coatings for Hydropower Turbines, Construction Engineering Research Laboratory, US Army Corps of Engineerings, Engineering Research and Development Center, ERDC/CERL TR - 11-21, 2011.
216. S. Lavigne, F. Pougoum: Cavitation erosion behavior of HVOF cavitec coatings, *Wear*, 386, 90–98, 2007.
217. N. Cinca, A. Isalgué: Wear of NiTi coatings obtained by thermal spraying, *Eur. Symp. Martens. Trans.*, 2009, 06007.
218. M. Dojčinović, V. Đorđević: The possibility of polymer materials application in reparation of hydraulic machinery parts damaged by cavitation, 3rd International Conference Research and Development in Mechanical Industry RaDMI 2003, *Proceedings*, p. 19-23

- 219.M. Dojčinović, J. Hrabar, V. Đorđević: Kavitaciona otpornost višeslojnog materijala na bazi metalne mrežice i epoksi sistema, Naučno-stručni skup- IRMES, Jahorina, 2002, Zbornik radova, s. 289-294.
- 220.K. K. Chawla: Composite materials science and engineering, 2nd ed. New York, Springer- Verlag, 1998.
- 221.D. Čikara, N. Bajić, M. Rakin, D. Čikara- Anić: Basalt fibers–ecological alternative for glass fibers. In Proceedings of the XIV International Scientific and Professional Meeting, Ecological Truth- Eco-Ist '10, Soko Banja, Serbia, pp. 194-198, 2006.
- 222.A. Akinci: Mechanical and morphological properties of basalt filled polymer matrix composites, Archives of Materials Science and Engineering, vol.35, Issue 1, pp. 29-32, 2009.
- 223.M. Çaliskan, A. Akinci, S. Yilmaz, U. Sen: Assignment of mechanical properties of basalt- LDPE composite materials using experimental and computer aided simulation methods, Scientific Research and Essays vol. 6 (11), pp. 2315-2324, 4 June, 2011, Available online at <http://www.academicjournals.org/SRE>, DOI: 10.5897/SRE10.1106, ISSN 1992-2248 ©2011 Academic Journals.
- 224.A. Akinci, E. Ercek, S. Yilmaz, U. Sen: Slurry erosion behaviors of basalt filled low density polyethylene composites, Mater. Des. 32, 3106–3111, 2011.
- 225.D. Cikara, A. Todić, T. Todić: Istraživanje mogućnosti primene domaćih bazalta za proizvodnju bazaltnog stakla, IMK-14 Istraživanje i razvoj, Godina XVI, Broj (37) 4/2010.
- 226.P. Wambua, I. Ivens, I. Verpoest: Natural fibers: can they replace glass and fibre reinforced plastics, Compos. Sci. Technol., 63, 1259–64, 2003.
- 227.M. S. N, Lopes F. P. D, Ferreira A. S, Nascimento D. C. O.: Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly, JOM, 61, (1), 17–22, 2009.
- 228.S. N. Monteiro, Satyanarayana K. G, Lopes F. P. D.: High strength natural fibers for improved polymer matrix composites, Mater Sci Forum, 638–642, 961–6, 2010.
- 229.N. de Oliveira Roque Maciela, J. Barreto Ferreiraa, J. da Silva Vieiraa, C. Gomes Dias Ribeiroc, F. Perissé Duarte Lopesa, F. Muylaert Margemb, S. Neves Monteiroc, C. Maurício Fontes Vieiraa, L. Carlos da Silvac: Comparative tensile

- strength analysis between epoxy composites reinforced with curaua fiber and glass fiber, *J. Mater. Resh. Technol.*, 8, 7, (4), 561-565, 2018.
230. M. D. Navarro- Mas, J. A. García- Manrique, M. Desamparados Meseguer, I. Ordeig, A. I. Sánchez: Delamination Study in Edge Trimming of basalt Fiber Reinforced Plastics (BFRP), *Materials*, 11, 1418-14 31, 2018; doi:10.3390/ma11081418.
231. M. Mitkov, D. Božić, Z. Vujović: *Metalurgija praha*, BMG, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, 1998.
232. R. Aleksić: *Osnovi kompozitnih materijala*, TMF Beograd, 2004.
233. B. Dholakiya: *Unsaturated Polyester Resin for Specialty Applications*, Chapter 7, Polyester, Hosam El - Din M. Saleh, Intech Open, DOI: 10.5772/48479. Available from: <https://www.intechopen.com/books/polyester/unsaturated-polyester-resin-for-specialty-application>: (September 26th 2012).
234. D. R. Baer, J. E. Amonette, M. H. Engelhard, D. J. Gaspar, A. S. Karakoti, S. Kuchibhatla, P. Nachimuthu, J. T. Nurmi, Y. Qiang, V. Sarathy, S. Seal, A. Sharma, P. G. Tratnyeke, C.M. Wang: Characterization challenges for nanomaterials, *Surf. Interface Anal.*, 40, 529–537, 2008.
235. SRPS EN 1007-5: 2010; *Savremena tehnička keramika - Metode ispitivanja*; Deo 5: Određivanje raspodele zatezne čvrstoće i deformacije vlakana u snopu vlakana na temperaturi okoline.
236. T. Kovačević: *Uticaj modifikovanih mikro-čestica dobijenih iz nemetalne frakcije otpadnih štampanih ploča na mehanička i termička svojstva poliestarske smole sintetisane iz otpadnog poli(etilen tereftalata)*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, 2018.
237. Z. Aćimović, Anja Terzić, Ljubiša Andrić, Marko Pavlović: Comparasion of refractory coatings based on talc, cordierite, zircon and mullite for Lost foam casting, *Materials and Technology* 49, 1, 157-164, 2015.
238. Z. Aćimović, A. Terzić, Lj. Andrić, Lj. Pavlović; Marko Pavlović: Synthesizing a new type of mullite lining, *Materials and Technology* 47, (6), 777-780, 2013.
239. M. Pavlović, Lj. Andrić, D. Radulović, S. Drmanić, N. Đorđević, M. Petrov: Influence of Mechanical Activation of a Cordierite –Based Filler on Sedimentation Stability of Lost Foam Refractory Coatings, *Science of Sintering*, 51, 15-25, 2019.

240. M. Pavlović, Lj. Andrić, D. Radulović, Z. Čeganjac: The influence of mechanical activation of talc-filler on the quality of the refractory coatings, 49th International October Conference on Mining and Metallurgy, 18-21 October 2017, Bor Lake, Proceedings, pp.53-56, ISBN 978-86-6305-066-2.
241. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, F. Klisura, M. Sarvan, D. Radulović, M. Petrov: Characterization and determination of erosion resistance of refractory materials for application in metallurgy and mining, Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry" (EEM2019), Jahorina 2019, Proceedings, pp. 546-552. DOI: 10.7251/EEMEN1901546P
242. M. Pavlović, M. Dojčinović, M. Prokić-Cvetković, Lj. Andrić, M. Sarvan: Kontrola kvaliteta vatrostalnih premaza primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom, Quality 2019, Proceedings, pp.137-142, Neum 2019.
243. M. Dojčinović: Uticaj strukture na mehanizam razaranja čelika pod dejstvom kavitacije, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 2007.
244. B. Kljajević: Softverski program OZARIA 2.5 za određivanje veličine i oblika zrna vatrostalnih punioca, VAGA Lab. Beograd, Srbija (2000).
245. Lj. Kostić- Gvozdinović, M. Todorović, R. Petrović: Praktikum iz tehnologije keramike, TMF Beograd, 2000.
246. L. L. Hench, R. W. Gould: Characterization of Ceramics, Marcel DECCer. Inc., New York, 1988.
247. M. M. Ristić: Principi nauke o materijalima, Srpska akademija nauka i umetnosti, Odeljenje tehničkih nauka, posebna izdanja, Knjiga 36, 1993.
248. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić- Cvetković, Lj. Andrić, Z. Čeganjac, Lj. Trumbulović: Cavitation wear of Basalt Glass Ceramic, Materials 2019, 12, 1552, doi: 10.3390/ma12091552.
249. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić- Cvetković, Lj. Andrić: The Mechanisms of Cavitation Erosion of Raw and Sintered Basalt, Science of Sintering, (accepted for publication in journal Sci. Sinter in 4th volume in year 2019.)
250. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić- Cvetković, Lj. Andrić: Cavitation resistance of composite polyester resin/basalt powder, Structural integrity and life, vol. 19, No. 1 (2019.), pp. 19-22.

251. M. Pavlović, S. Grujić, A. Terzić, Lj. Andrić: Synthesis of the glass-ceramics based on basalt, Serbian Ceramic Society Conference "Advanced Ceramic and Application II – New frontiers in multifunctional material science and procession", Book of Abstracts, Belgrade, Serbia (30.09-01.10.2013) p. 36 (P7), ISBN 978-86-915627-1-7, COBISS-SR-ID 201203212.
252. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić- Cvetković, Lj. Andrić: Nastajanje i razvoj oštećenja pod dejstvom kavitacije na uzorcima livenog bazalta, *Zaštita materijala*, 60 (2), 182-189, 2019.
253. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, J. Stojanović, D. Radulović, M. Petrov, M. Blagojev: Influence of the basalt structure and properties on development the cavitation damage, 50th International October Conference on Mining and Metallurgy, IOC 2018, 30th September – 3rd October 2018, Hotel "Jezero" Bor Lake, Serbia, Proceedings, pp.155-158.
254. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, D. Radulović, M. Petrov: Determination of the cavitation resistance of glass-ceramic samples based on raw basalt and industrial waste raw materials for use in metallurgy, XIII MPRC Belgrade, 8-10. May 2019, Proceedings, pp. 423-429, 2019.
255. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić- Cvetković, Lj. Andrić: Application of glass ceramics based on basalt for the production of parts of equipment in metallurgy, 14. International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, DEMI 2019, Banja Luka 24-25 May 2019, Proceedings, pp. 687-690.
256. S. Janjić, P. Ristić: Mineralogija, Naučna knjiga, Beograd, 1995.
257. Pavlović M., Đuričić M., Mumđić A.: Basalt application prospects for touristic facilities furnishing, SED 2015, Užice –Srbija, Proceedings, pp.53-60, 2015.
258. M. Pavlović, Lj. Andrić, D. Radulović, M. Petrov: Effect of micronized grinding on the quality of the fillers based on cordierite, mullite and zircon, Proceedings XVII. Balkan Mineral Processing Congress, Edited by F. Arslan, A. A. Sirkeci et al., BMPC 2017, November 1-3, Antalya, Turkey, pp. 607-612, ISBN: 978-975-7946-42-7.
259. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić- Cvetković, Lj. Andrić: Synthesis and characterization of new refractory coating base on basalt, 4th Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe (MME SEE 2019), Belgrade, Serbia, June 5-7. 2019, Proceedings, P33, p. 63, 2019.

260. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, D. Radulović, Z. Čeganjac: Determination of cavitation resistance of sintered basalt samples, 51st International October Conference on Mining and Metallurgy, 16-19 October 2019, Bor Lake, Proceedings, pp. 215-218.
261. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, D. Radulović: Comparison of the formation and development of cavitation damage on cast and sintered samples based on basalt, Journal of Mining and Metallurgy, Section A: Mining, vol 55 (1) A 2019 (accepted for publication).

Biografski podaci o kandidatu

Marko D. Pavlović, dipl. ing. tehnologije je rođen 1986. godine u Beogradu gde je završio osnovnu školu i srednju elektrotehničku školu "Nikola Tesla".

Studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2005/2006. godine. Diplomirao je na Odseku Inženjerstvo materijala dana 05.06.2013. godine sa opštim uspehom 7,34 (sedam i 34/100) u toku studija i ocenom 10 (deset) na diplomskom ispitu. Master akademske studije upisao je školske 2017/2018 godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu, Univerziteta u Beogradu na studijskom programu Metalurško inženjerstvo, završio je 13.07.2018. godine sa prosečnom ocenom 9,25 (devet i 25/100) i time stekao akademski naziv Master inženjer metalurgije. Doktorske akademske studije, studijski program: Metalurško inženjerstvo, upisao je školske 2013/2014. godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu, Univerziteta u Beogradu. Položio je sve ispite predviđene programom studiranja sa prosečnom ocenom 8,92 (osam i 92/100).

Tokom studiranja volontirao je u Livnici NHBG ŽIKS HARD Beograd (2008.; 2012.) i Preduzeću za informatički inženjering, konsalting i marketing Orbis d.o.o. Beograd (2013). Bio je uključen kao volonter 2017. godine na Projektu: T34026 pod nazivom: "Geopolimeri – razvoj tehnologije za konverziju otpada u funkcionalne materijale" u Institutu za multidisciplinarna istraživanja Univerziteta u Beogradu. Kao inženjer prodaje radio 2018. godine u firmi Golden Lab& Eng, Zemun, gde je završio obuku i radio na uređajima za spektralnu analizu. Od 2019. godine radi kao inženjer kontrole kvaliteta u firmi Kontrol Inspekt, Beograd.

Završio je obuke: Uvod u projekte; Savremeni projektni pristup u EU; Planiranje i pisanje predloga projekta; Izrada Logističke matrice projekta u PK Vojvodine, Novi Sad 2015. godine. U Agenciji za obrazovanje "Poslovna savršenost" Beograd završio je obuku AUTO-CAD 2D, 2017. godine, a obuku za montažu, programiranje i puštanje u rad Teletek Alarmnih sistema u firmi MS Security System, d.o.o Beograd završio 2018. godine.

Objavio je 9 radova u časopisima međunarodnog značaja, 3 rada u međunarodnom časopisu sa recenzijom značajnom za oblast nauke o materijalima, 21 saopštenje na skupovima međunarodnog i domaćeg značaja štampana u celini, 12 saopštenja sa međunarodnog skupa štampanih u izvodu, 3 rada objavljena u časopisu nacionalnog značaja, 2 saopštenja na skupu nacionalnog značaja štampana u izvodu. Govori, čita i piše engleski jezik.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Марко Павловић

број индекса 4028/2013

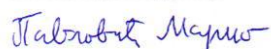
Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

НАСТАЈАЊЕ И РАЗВОЈ ОШТЕЋЕЊА ВАТРОСТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА НА БАЗИ
БАЗАЛТА ПОД ДЕЈСТВОМ КАВИТАЦИЈЕ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда



У Београду, 28.06.2019.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НАСТАЈАЊЕ И РАЗВОЈ ОШТЕЋЕЊА ВАТРОСТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА НА БАЗИ
БАЗАЛТА ПОД ДЕЈСТВОМ КАВИТАЦИЈЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 28. 06. 2019.

Таласица Милос

1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.