

**NASTAVNO–NAUČNOM VEĆU
TEHNOLOŠKO–METALURŠKOG FAKULTETU
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

Na sednici Nastavno–naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu održanoj 17. marta 2011. godine, određeni smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata mr Marine R. Stamenović (rođena Krivokuća) dipl. inž. tehnologije, pod nazivom:

**“MIKROMEHANIČKA ANALIZA LOMA I OŠTEĆENJA
KOMPOZITNIH CEVI *STAKLENA VLAKNA–POLIESTER*
U RAZLIČITIM HEMIJSKI AGRESIVNIM USLOVIMA”**

Posle pregleda doktorske disertacije Komisija podnosi Nastavno–naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta sledeći

**IZVEŠTAJ
o urađenoj doktorskoj disertaciji**

1. UVOD

Naslov i obim disertacije

Doktorska disertacija mr Marine R. Stamenović (rođena Krivokuća) napisana je na 218 strana, u okviru kojih se nalazi 9 poglavlja sa ukupno 228 slika, 83 tabela i 121 literaturnih navoda.

Doktorska disertacija mr Marine R. Stamenović (rođena Krivokuća), dipl. inž. tehnologije, sadrži sledeća poglavlja: Uvod, Pregled bibliografskih izvora u vezi predmeta istraživanja, Mikromehanika kompozitnih materijala, Cevi od kompozitnih materijala, Mehanička ispitivanja polimernih kompozitnih cevi u različitim hemijski agresivnim uslovima, Analiza rezultata sa mikromehaničkom analizom loma i oštećenja, Numerička analiza ponašanja staklo-poliester kompozitne cevi izložene dejstvu opterećenja, Zaključak, Literatura. Na početku disertacije dat je kratak izvod na srpskom i engleskom jeziku.

Hronologija odobravanja i izrade disertacije

- **03.12.2010. godine** – Kandidat mr Marina R. Stamenović (rođena Krivokuća) dipl. inž. tehnologije, prijavila je doktorsku disertaciju pod nazivom “Mikromehanička analiza loma i oštećenja kompozitnih cevi *staklena vlakna–poliester* u različitim hemijski agresivnim uslovima” i predložila Komisiju za ocenu naučne zasnovanosti teme.
- **17.03.2011. godine** – Na sednici Nastavno–naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu doneta je Odluka o odobravanju predloga teme doktorske disertacije mr Marine R. Stamenović (rođena Krivokuća) dipl. inž. tehnologije pod nazivom “Mikromehanička analiza loma i oštećenja kompozitnih cevi *staklena vlakna–poliester* u različitim hemijski agresivnim uslovima”, a za mentora ove doktorske disertacije imenovan je dr Slaviša Putić, van. prof.
- **04.04.2011. godine** – Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu data je saglasnost na predlog doktorske disertacije mr Marine R. Stamenović (rođena Krivokuća) dipl. inž. tehnologije pod nazivom “Mikromehanička analiza loma i oštećenja kompozitnih cevi *staklena vlakna–poliester* u različitim hemijski agresivnim uslovima”.

- **23.06.2011. godine** – Na sednici Nastavno–naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu je doneta Odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije mr Marine R. Stamenović (rođena Krivokuća) dipl. inž. tehnologije pod nazivom “Mikromehanička analiza loma i oštećenja kompozitnih cevi *staklena vlakna–poliester* u različitim hemijski agresivnim uslovima”.

Mesto disertacije u odgovarajućoj naučnoj oblasti

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala za koje je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu.

Biografski podaci o kandidatu

Marina R. Stamenović (rođ. Krivokuća) je rođena 27.06.1970. god. u Kruševcu gde je završila osnovnu i srednju školu.

Diplomirala je na Tehnološko–metalurškom fakultetu u Beogradu na Katedri za analitičku hemiju 1995. god. sa prosečnom ocenom 8,50. Na završnoj godini studija radila je kao asistent–volonter na Katedri za opštu i neorgansku hemiju. Nakon diplomiranja radila je na istoj katedri kao asistent–saradnik u nastavi i na poslovima naučnog istraživanja sve do 1997. god. Poslediplomske studije upisala je na Tehnološko–metalurškom fakultetu u Beogradu 1996. god. na Katedri za konstrukcione materijale, gde je magistrirala 1999. god., odbranivši rad sa temom “Uticaj staklenog ojačanja na statička i dinamička svojstva laminarnih kompozitnih materijala” pod mentorstvom prof. dr Radoslava Aleksića.

U periodu od 1998–1999. god. radila je kao istraživač saradnik na odseku za materijale instituta SANU kao saradnik prof. dr Dragana Uskokovića.

U zimskom semestru školske 2003/04 god. bila je angažovana kao predavač na izvođenju nastave u Višoj politehničkoj školi u Beogradu za predmet Tehnologija prerade otpada. U istoj školi, školske 2004/05 god. radila je kao predavač u nastavi za predmete Tretman i odlaganje čvrstog i opasnog otpada i Menadžment čvrstog i opasnog otpada. U martu 2006. godine zasnovala je radni odnos u Višoj politehničkoj školi u Beogradu kao predavač u oblasti Hemije i Zaštite životne sredine. Od 2008. godine radi kao predavač u VŠSS Beogradska politehnika u užoj stručnoj oblasti Materijali i Tehnologija kože i proizvoda od kože.

Na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu je dobila naučno zvanje istraživač–saradnik.

Do sada je objavila jedan rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21), jedan rad u istaknutom časopisu međunarodnog značaja (M22) i pet radova u časopisima međunarodnog značaja (M23); dva rada je saopštila na skupovima međunarodnog značaja štampana u celini (M33) i tri rada na skupu međunarodnog značaja štampana u izvodu (M34); devet radova je objavila u vodećim časopisima nacionalnog značaja (M51) i tri rada u časopisima nacionalnog značaja (M52); dva rada je saopštila po pozivu na skupu nacionalnog značaja štampana u celini (M61); petnaest radova je saopštila na skupovima nacionalnog značaja štampanih u celini (M63) i četiri rada na skupovima nacionalnog značaja štampanih u izvodu (M64).

2. OPIS DISERTACIJE

Struktura i sadržaj disertacije

Doktorska disertacija mr Marine R. Stamenović (rođene Krivokuća), dipl. inž. tehnologije, sadrži sledeća poglavlja: 1. Uvod, 2. Pregled bibliografskih izvora u vezi predmeta istraživanja, 3. Mikromehanika kompozitnih materijala, 4. Cevi od kompozitnih materijala, 5. Mehanička

ispitivanja polimernih kompozitnih cevi u različitim hemijski agresivnim uslovima, 6. Analiza rezultata sa mikromehaničkom analizom loma i oštećenja, 7. Numerička analiza ponašanja staklo-poliester kompozitne cevi izložene dejstvu opterećenja, 8. Zaključak, 9. Literatura. Na početku disertacije dat je kratak izvod (na srpskom i engleskom jeziku).

Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U Uvodu je ukazano na činjenicu da se tradicionalno korišćeni konstrukcioni materijali danas u postrojenjima hemijske i procesne industrije sa uspehom zamenjuju kompozitnim materijalima, a veliku primenu kao jedan od osnovnih elemenata u navedenim postrojenjima imaju staklena vlakna-poliesterska smola kompozitne cevi. Cevi izrađene za ovu namenu su u zavisnosti od uslova eksploatacije izložene različitim spoljašnjim opterećenjima i uticajima hemijski agresivnih uslova što ukazuje na potrebu za sveobuhvatno ispitivanje njihovih mehaničkih svojstava. Upravo ta činjenica ukazuje na osnovni predmet ove disertacije koji je definisan u ovom poglavlju, a to je mikromehanička analiza loma i oštećenja polimernih kompozitnih cevi staklena vlakna-poliester u različitim hemijski agresivnim uslovima i pri različitim uslovima mehaničkih opterećenja u eksploataciji. U uvodnom delu je definisan i cilj istraživanja a to je dobijanje podataka o uticaju agresivnih sredina i dužine izlaganja na strukturu cevi, pre svega na modele nastajanja i mehanizme razvoja oštećenja pri različitim uslovima opterećenja.

Poglavlje dva je pregled nekih bibliografskih izvora koji su u vezi sa izvedenim istraživanjima u doktorskoj disertaciji. Činjenica je da je istraživačka aktivnost u ovoj oblasti veoma intenzivna i određeni broj radova u literaturi posvećen ovakvim istraživanjima. Navedene reference sadrže eksperimentalne rezultate istraživanja, analizu i diskusiju rezultata i izvedene zaključke, kao i teorijske osnove primenjenih metoda ispitivanja, njihove mogućnosti i ograničenja.

U poglavlju tri, Mikromehanika kompozitnih materijala, ukazuje se na značaj ove veoma značajne discipline u razvoju u oceni ponašanja kompozitnih materijala i oceni njihovih svojstava. Težište ovog dela je na teorijskoj analizi naponskih stanja koja zahteva razumevanje mehanike neelastičnog i nelinearnog materijala i njegovog ponašanja. Rastuća upotreba polimernih kompozitnih cevi ukazuje na potrebu za mikromehaničkom analizom loma i oštećenja, tako da se ukazuje potreba za svakom takvom pojedinačnom analizom pri korišćenju novih materijala, a naročito u novim uslovima korišćenja kao što su različiti hemijski agresivni uslovi. S obzirom da se tehnologija kompozitnih materijala zasniva na tome da se kombinuju svojstva vlakana, kao ojačavajuće komponente velike čvrstoće i materijala različite prirode, kao matrice, u ovom delu su detaljno pre svega razjašnjene njihove uloge u strukturi, a zatim i zapreminski i težinski udeli, preko takozvanog pravila mešanja karakterističnom za kompozitne materijale. Poseban značaj je dat na mehaniku interfejsa (veze vlakna-matrica). Veliki deo ovog poglavlja odnosi se na teorijsko razmatranje mikromehaničke analize lamine jer svaka mikromehanika koja se odnosi na kompozitne materijale, bez obzira o kakvoj se geometriji radi, u početku, ili u osnovi, polazi od razmatranja jedne lamine (pojedinačnog sloja). Isti pristup je bio i u ovoj doktorskoj disertaciji gde su te osnove i načela korišćeni u numeričkom delu, u poglavlju sedam. Detaljno su sa mikromehaničkog aspekta definisani osnovni pojmovi u vezi elastičnosti i čvrstoće, modul elastičnosti, moduli smicanja, Poasonov koeficijent. U jednom delu ovog poglavlja teorijski su razmatrana oštećenja u kompozitnim materijalima. Razumevanje mikromehanizama oštećenja u kompozitnim materijalima pri različitim uslovima opterećenja u toku eksploatacije je od velikog značaja pri projektovanju, jer za svaku posebnu primenu određuje žilavost kompozita, otpornost na promenljivo i udarno opterećenje, brzinu akumulacije oštećenja, preostalu čvrstoću, krutost i vek.

U poglavlju četiri je težište bilo na primeni cevi od kompozitnih materijala sa primerima u hemijskoj i naftnoj industriji gde su izvođena obimna istraživanja i razvojni programi za njihovu proizvodnju. Uporedo sa tim je opisan postupak i metoda proizvodnje namotavanjem ojačavajućih vlakana u polimernu matricu, "Filament Winding".

U poglavlju pet su prikazana mehanička ispitivanja polimernih kompozitnih cevi u različitim hemijski agresivnim uslovima. U prvom delu je ukazano na strukturu polimerne kompozitne cevi korišćene u ispitivanju, $[90_2/\pm 55_2/90_4]$. Detaljno su definisana svojstva strukturnih komponenata, E-staklenih vlakana i poliesterske smole. S obzirom da je ceo proces u istraživanju počeo proizvodnjom ovih cevi, detaljno su opisane sve faze postupka proizvodnje. U drugom delu poglavlja su prikazana ispitivanja na uzorcima koji nisu bili izlagani uticaju hemijski agresivnih uslova kako bi se dobile osnovne referentne vrednosti mehaničkih svojstava. Prikazana su i opisana sledeća ispitivanja: zatezna ispitivanja ravnih epruveta radi određivanja zatezne čvrstoće i modula elastičnosti u uzdužnom pravcu; ispitivanja zatezanjem prstenova sečenih iz kompozitnih cevi radi određivanja zatezne čvrstoće i modula u obimnom pravcu cevi; udarna ispitivanja po metodi Šarpi radi određivanja energije udara i udarne žilavosti kao i određivanje energije stvaranja i energije razvoja prsline; ispitivanja cevi dejstvom unutrašnjeg pritiska vodom na standardnim uređajima za ispitivanje polimernih i kompozitnih cevi gde su određene deformacije u uzdužnom i obimnom pravcu cevi i pravcu pod uglom $\pm 45^\circ$ primenom metode merenja deformacija mernim trakama. Kod svih navedenih ispitivanja su prikazane izmerene dimenzije uzoraka, skice i njihove oznake. Navedeni su odgovarajući standardi za izvedena ispitivanja, opisani kompletni postupci ispitivanja, alati, instrumenti, oprema i uređaji. Navedeni su svi izrazi pomoću kojih su određivane ispitne veličine. U trećem delu se određivao uticaj hemijski agresivnih uslova kao i uticaj dužine izlaganja na mehanička svojstva cevi. U ovim istraživanjima, kao hemijski agresivne supstance su korišćeni rastvori kiselina (azotne i fosforne) i rastvori baza (natrijum-hidroksida i amonijum-hidroksida) jednakih koncentracija (25mas.%). Pored toga, uzorci su tretirani i vodom. Uzorci su pre ispitivanja izloženi navedenim rastvorima kiselinama, rastvorima baza i vodi 3, 10, 30 i 60 dana, a zatim ispirani vodom. Nakon toga, iz cevi su sečeni uzorci standardnih dimenzija u zavisnosti od vrste mehaničkog ispitivanja. Za ispitivanje dejstvom unutrašnjeg pritiska su korišćene cele cevi. Za sve uzorke su prikazane dimenzije i oznake.

Šesto poglavlje je poglavlje u kome su prikazani svi dobijeni rezultati sa ispitivanja, izvedena njihova analiza sa posebnim težištem na mikromehaničku analizu na prelomnim površinama primenom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Za sva ispitivanja su dati odgovarajući rezultati koji su prikazani tabelarno i kod poređenja u obliku dijagrama, a mikromehanička analiza je potkrepljena fotografijama sa SEM pri različitim uvećanjima. Prikaz i analiza rezultata je prvo izvedena za uzorke koji nisu izlagani hemijski agresivnim uslovima, kako bi se prikazala i definisala osnovna mehanička svojstva, a zatim za uzorke koji su izlagani hemijski agresivnim uslovima i to redom za sva ispitivanja, zatezanjem, udarom i dejstvom unutrašnjeg pritiska. Dobijenim rezultatima i njihovim poređenjem se došlo do podataka o uticaju agresivnosti i vremenu izlaganja na određena mehanička svojstva.

U poglavlju sedam je urađena numerička analiza korišćenjem programskog paketa za analizu metodom konačnih elemenata Abaqus. Model je tako napravljen da se sastoji od više ortotropnih slojeva čiji su pravci duž vlakana i normalno na vlakna, pri čemu glavni pravac (duž vlakana) zaklapa ugao od 90° , 55° ili -55° u odnosu na osu cevi prema rasporedu $[90^\circ]_2[\pm 55^\circ]_4[90^\circ]_4$ što i jeste raspored slaganja razmatrane cevi. Debljina ovih slojeva određena je analizom SEM snimaka. Takođe, na SEM snimcima je uočen i spoljašnji sloj sastavljen isključivo od matrice (poliestera), koji nije uzet u obzir u numeričkoj analizi jer je njegova nosivost znatno manja od nosivosti slojeva ojačanih vlaknima. Za formiranje modela korišćeni su konačni elementi tipa ljsuske i kontinuum ljsuske. Imajući u vidu izvedena ispitivanja, razmatrani su modeli za ravne epruvete, prstenove i cele cevi koje su bile ispitivane dejstvom unutrašnjeg pritiska. Pojava otkaza u kompozitnoj cevi je predviđena primenom Tsai-Hill kriterijuma, koji daje informaciju o tome da je došlo do otkaza u celokupnom kompozitnom materijalu i kriterijuma Hashina, koji pruža mogućnost da se odredi stepen oštećenja strukturnih komponenata. Poređenjem eksperimentalno dobijenih rezultata i rezultata dobijenih primenom metode konačnih elemenata zaključeno je dobro slaganje rezultata. Razlika je u tome što se metodom konačnih elemenata dobijaju veće vrednosti

deformacije u poređenju sa eksperimentalnim ispitivanjem, tj. numerička analiza predviđa manju krutost cevi. Što se tiče rezultata zatezanja prstena, rezultati su veoma slični kao u prethodnom slučaju jer je način opterećenja te epruvete sličan dejstvu unutrašnjeg pritiska na cev. Najveća odstupanja rezultata su bila za ravne epruvete, jer je i činjenica da je zbog strukture cevi najmanja nosivost u uzdužnom pravcu a samim tim dolazi i do većih odstupanja između numeričkih i eksperimentalnih rezultata.

Najvažniji rezultati istraživanja i najvažniji doprinosi disertacije istaknuti su u osmom poglavlju Zaključci. Na kraju disertacije navedena je Literatura koja sadrži sve reference korišćene u radu, reference koje su proistekle iz disertacije objavljene u naučnim časopisima i saopštene na domaćim i međunarodnim konferencijama.

3. OCENA DISERTACIJE

Savremenost, originalnost i značaj

Savremenost disertacije se ogleda u činjenici da se danas tradicionalno korišćeni konstrukcioni materijali u postrojenjima hemijske i procesne industrije sa uspehom zamenjuju kompozitnim materijalima, a veliku primenu kao jedni od osnovnih elemenata u navedenim postrojenjima imaju staklena vlakna–poliesterska smola kompozitne cevi. Cevi izrađene za ovu namenu su u zavisnosti od uslova eksploatacije izložene različitim opterećenjima i uticajima hemijski agresivnih materija. Samim tim, rezultati istraživanja mr Marine R. Stamenović (rođene Krivokuća), dipl. inž. tehnologije, prikazani u doktorskoj disertaciji pod nazivom “Mikromehanička analiza loma i oštećenja kompozitnih cevi *staklena vlakna–poliester* u različitim hemijski agresivnim uslovima“, predstavljaju značajan doprinos u dobijanju podataka o uticaju agresivnih uslova i dužine izlaganja na strukturu polimerne kompozitne cevi, odnosno o modelima nastajanja i mehanizmima daljeg razvoja oštećenja pri različitim uslovima spoljašnjeg i unutrašnjeg opterećenja tokom eksploatacije. Takvo poznavanje je od velikog značaja za svaki polimerni kompozitni materijal i od njega izvedenih konstrukcija jer za svaku posebnu primenu određuje žilavost kompozita, otpornost na udarno i promenljivo opterećenje, brzinu akumulacije oštećenja, preostalu čvrstoću, krutost i vek.

Poznato je da se oštećenja sastoje od različitih kombinacija nastajanja prslina u matrici, raskidanja veza između vlakana i matrice, raslojavanja i lokalnog prekida vlakana, a zavise od strukture materijala, broja slojeva i orijentacije vlakana u njima, procesa oblikovanja, stanja napona i uvedenog opterećenja. Alternativni pristup u razumevanju ovih pojava je preko unapred utvrđenih mikromehaničkih modela i mehanizama oštećenja. Međutim, s obzirom na veliki broj istovremeno delujućih opterećenja u svakoj realnoj konstrukciji, modeli kao što su razdvajanje veze vlakno–matrica, izvlačenje vlakana iz matrice, lom vlakana i matrice, delaminacija, retko mogu pojedinačno biti dovoljno precizni da bi bili od koristi projektantu. Oni predstavljaju samo iskustvene modele koji zahtevaju dopunsku analizu svakog loma, a to je predmet mikromehaničke analize koja je izvedena na prelomnim površinama ispitivanih uzoraka cevi. Ovakva analiza predstavlja značajan podatak o proceni kvaliteta materijala cevi, njegovoj čvrstoći, krutosti i proceni veka trajanja polimerne kompozitne cevi što daje originalnost ovoj doktorskoj disertaciji.

Analiza je izvedena na prelomnim površinama nakon svih izvedenih mehaničkih ispitivanja i to na uzorcima koji nisu bili i onima koji su bili izlagani uticaju hemijski agresivnih uslova 3, 10, 30 i 60 dana. U istraživanju, kao hemijski agresivne supstance su korišćeni rastvori azotne kiseline, fosforne kiseline, natrijum-hidroksida i amonijum-hidroksida jednakih koncentracija (25mas.%) i voda. Struktura staklena vlakna-poliester kompozitne cevi je $[90_2/\pm 55_4/90_4]$ (2 sloja staklenih vlakana kao ojačanje pod uglom 90° u odnosu na osu, zatim 4 sloja helikoidno pod uglom $\pm 55^\circ$ i 4 sloja pod uglom 90° u odnosu na osu). Značaj disertacije se ogleda u tome da je dobijeno saznanje o tome kako odabrane baze i kiseline određenih pH vrednosti prvenstveno utiču na kvalitet veze

vlakna–matrica kao najosetljivijeg mesta u strukturi polimernih kompozitnih materijala. Slabljenje te veze predstavlja izuzetno neželjenu pojavu stvaranja potencijalnih kritičnih mesta inicijacija i nagomilavanja prslina praćenih izvlačenjem vlakana. S druge strane, prekomerno jake veze vlakna–matrica mogu prouzrokovati pucanje vlakana usled ograničavajućih deformacija ili vlakna ili matrice, što prouzrokuje smanjenje krutosti. U oba slučaja se u materijalu stvaraju zone visokih i kritičnih naponskih stanja što ugrožava celovitost materijala ili elemenata konstrukcije.

Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U literaturnom pregledu doktorske disertacije navedeno je 120 literaturnih izvora, od kojih najveći broj čine objavljeni radovi sa tematikom značajnom za izradu doktorske disertacije. Navedene reference sadrže eksperimentalne rezultate istraživanja mnogih istraživača, analizu i diskusiju rezultata i izvedene zaključke, kao i teorijske osnove primenjenih metoda ispitivanja, njihove mogućnosti i ograničenja. U okviru korišćenih literaturnih navoda nalaze se i reference kandidata mr Marine R. Stamenović (rođene Krivokuća), proistekle iz ove disertacije, koje su objavljene u međunarodnim i vodećim nacionalnim časopisima i saopštene na međunarodnim i nacionalnim konferencijama. Time je kandidat proširio do sada poznata saznanja o staklena vlakna–poliester kompozitnim cevima i njihovom ponašanju prilikom različitih uslova mehaničkih opterećenja i hemijski agresivnih uslova delovanja. Iz uvida u doktorsku disertaciju i objavljenih radova koje je kandidat priložio, kao i popisa literature koja je korišćena u istraživanju, uočava se adekvatno poznavanje predmetne oblasti istraživanja, kao i poznavanje aktuelnog istraživanja u ovoj oblasti u svetu.

Analiza primenjenih naučnih metoda i njihova adekvatnost za sprovedeno istraživanje

Naučne metode korišćene i istraživanju i opisane u ovoj doktorskoj disertaciji primenjene su za ocenu ponašanja kompozitne cevi staklena vlakna–poliester u različitim uslovima mehaničkih opterećenja i hemijski agresivnim uslovima delovanja. Potpuno je opisan savremeni postupak proizvodnje ispitivanih cevi metodom “Filament Winding”. Sva mehanička ispitivanja su izvedena prema važećim standardima. Ispitivanje zateznih svojstava cevi na uzorcima isecanim iz cevi u uzdužnom (osnom) i poprečnom (obimnom) pravcu su izvedena na elektro–mehaničkim kidalicama SCHENCK TREBEL RM 100 i INSTRON 1332 sa kontrolerom INSTRON FAST TRACK 80800, uz korišćenje hidrauličkih čeljusti. Energije udara su određivane na elektronskom mernom uređaju za digitalno izračunavanje udarne energije RPSW 150/30 po metodi Šarpi. Korišćenjem digitalne merne opreme dobijeni su podaci i dijagrami sila–vreme i energija–vreme na osnovu kojih su određene energije inicijacije i energije daljeg progresivnog rasta prslina. Ispitivanja cevi dejstvom unutrašnjeg pritiska vodom je bilo izvedeno na standardnim uređajima za ispitivanje polimernih i kompozitnih cevi. Određene su deformacije u uzdužnom i obimnom pravcu cevi i pravcu pod uglom $\pm 45^\circ$ korišćenjem metode merenja deformacija primenom mernih traka. Korišćene su pojedinačne merne trake oznake 6/120 LY11, kao i rozete sa dve trake 6/120 XY11 i sa tri trake 6/120 RY11. Primenom metode konačnih elemenata su i numerički potvrđeni ispravnost ispitivanja i rezultati ispitivanja dobijeni ispitivanjem dejstvom unutrašnjeg pritiska. Sva mikromehanička analiza na prelomnim površinama ispitivanih uzoraka cevi radi utvrđivanja modela i mehanizama loma usled uticaja hemijski agresivnih uslova i vremena izlaganja je izvedena primenom skenirajuće elektronske mikroskopije.

Ocena primenljivosti i verifikacija ostvarenih rezultata

Na osnovu sinteze do sada objavljenih literaturnih podataka, uvida u prikazane rezultate sa izvedenih eksperimentalnih ispitivanja i izvedenih mikromehaničkih analiza prikazanih u ovoj

doktorskoj disertaciji očigledan je doprinos u mikromehaničkom razumevanju uticaja hemijski agresivnih uslova na polimerne kompozitne cevi. Od posebnog značaja je saznanje o veku trajanja ispitivanih cevi i zaključka o vremenu izlaganja kada se dalje ne smanjuju mehanička svojstva koja bi bitno ugrozila sigurnost cevi. Takođe se mikromehaničkom analizom utvrdila štetnost određenih rastvora na strukturne elemente kompozitne cevi a posebno na vezu vlakna-matrica kao najznačajnijeg parametra u definisanju čvrstoće celokupnog materijala. Izvedenim ispitivanjima dejstvom unutrašnjeg pritiska se došlo do podataka o graničnim vrednostima pritisaka pri kojima deformacije prevazilaze dozvoljene i kada dolazi do procurivanja cevi u različitim hemijski agresivnim uslovima što je od posebnog značaja za realne uslove eksploatacije razmatranih rastvora i strukture ispitivanih cevi. Potvrda ovih značajnih rezultata o veku cevi je verifikovana razvijenim numeričkim modelom primenom metode konačnih elemenata.

Ocena sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat mr Marina Stamenović (rođena Krivokuća) je magistar tehničkih nauka iz oblasti Inženjerstva materijala. Dugi niz godina se na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu bavila istraživanjima i ispitivanjima u oblasti kompozitnih materijala. Tokom izrade doktorske disertacije ispoljila je izuzetnu stručnost u pripremi i realizaciji eksperimenta, korišćenju različitih tehnika i metoda pri ispitivanju i analizi rezultata. Kandidat poseduje sve kvalitete koji su neophodni za samostalni stručni rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Kandidat je svojim rezultatima dao doprinos nauci, pre svega u oblasti razvoja i karakterizacije polimernih staklena vlakna-poliester kompozitnih cevi kao i veku trajanja u realnim hemijski agresivnim uslovima tokom eksploatacije.

Potpuno je od samog početka praćen proces izrade uzoraka cevi sa svim neophodnim podacima o udelima strukturnih komponenti i izvedenom geometrijom $[90_2/\pm 55_4/90_4]$ što je bio neophodan preduslov za kasnije analize i rezultata i mikromehaničke analize. U doktorskoj disertaciji su po prvi put za tako oblikovane cevi prikazani postupci ispitivanja i njima dobijeni rezultati. Izvedena su ispitivanja zatezanjem prema važećim standardima radi određivanja vrednosti napona u uzdužnom (osnom) i poprečnom (obimnom) pravcu i određivanja deformacija. Metodom Šarpi su određene ukupne energije udara, energije inicijacije prslina kao i energije rasta prslina.

Značajni su i prikazani rezultati ispitivanja cevi unutrašnjim pritiskom i merenje deformacija tokom porasta opterećenja primenom mernih traka kojima se dobila realna raspodela napona i deformacija koja nije ista i poznata kao kod cevi od izotropnih konstrukcijskih materijala što takođe za ispitivanu strukturu kompozitne cevi predstavlja značajan doprinos.

Poseban ostvaren naučni doprinos se ogleda u dobijenim rezultatima nakon ispitivanja uzoraka cevi koji su bili izlagani rastvorima kiselina i baza 3, 10, 30 i 60 dana i njihovim uticajima na strukturu što je analizirano i zaključeno nakon mikromehaničkih analiza na prelomnim poršinama uzoraka. Proučeni su svi modeli i mehanizmi nastanka i daljeg progresivnog rasta prslina unutar strukture za sve slučajeve opterećenja i uslove i vremena delovanja što daje značajan doprinos za korišćenje cevi u različitim uslovima.

Kritička analiza rezultata istraživanja

Na osnovu definisanih ciljeva istraživanja određena je metodologija istraživanja koja je primenjena u doktorskoj disertaciji. S obzirom na složenost problematike, primenjeno je više

metoda istraživanja. Rezultati dobijeni ispitivanjima na zatezanje, udar i dejstvom unutrašnjeg pritiska za uzorke koji nisu i za one koji su izlagani dejstvu hemijski agresivnih uslova u različitim vremenskim periodima su u saglasnosti i pokazuju očekivana smanjenja mehaničkih svojstava. Pored toga, rezultati dobijeni za uzorke koji su izlagani dejstvu hemijski agresivnih uslova su u skladu sa rezultatima koje su objavili drugi autori.

Uvidom u dostupnu literaturu iz ove oblasti ispitivanja i istraživanja i rezultate ispitivanja i istraživanja dobijenih primenom odabrane metodologije u okviru ove doktorske disertacije, može se uočiti da nije bilo značajnih odstupanja i neslaganja rezultata od očekivanih. Takođe je značajna potvrda saglasnosti dobijenih rezultata ispitivanjem cevi dejstvom unutrašnjeg pritiska primenom metode konačnih elemenata, što ukazuje na adekvatan izbor metodologije ispitivanja u okviru ove doktorske disertacije.

Očekivana primena rezultata u praksi

Rezultati istraživanja dobijeni tokom izrade ove doktorske disertacije omogućavaju bolje razumevanje uticaja hemijski agresivnih uslova na proizvedene staklena vlakna-poliester kompozitne cevi u eksploataciji.

Dobijeni rezultati ukazuju na realno smanjenje mehaničkih svojstava nakon određenog vremenskog perioda izlaganja rastvorima kiselina i baza što u praksi ima velikog značaja za procenu veka trajanja ispitivanih cevi. Izvedenom mikromehaničkom analizom se došlo do saznanja o mehanizmima razvoja prsline što je takođe u direktnoj vezi sa vekom trajanja cevi koja se pod navedenim hemijski agresivnim uslovima nalazi u eksploataciji a sa već iniciranim prslinama u strukturi.

Takođe se došlo i do vrednosti maksimalnih pritisaka koji se mogu koristiti a da ne dođe do procurivanja cevi.

I razvijeni numerički model primenom metode konačnih elemenata koji je pokazao dobru saglasnost sa ispitnim rezultatima ima praktičan značaj jer se u narednim istraživanjima drugih struktura kompozitnih cevi mogu simulirati različiti pritisci i time doće do podataka o raspodeli deformacija i napona u cevi a samim tim i do procene njenog veka trajanja.

Svi rezultati mogu koristiti kao solidna osnova institutima i proizvođačima cevi izrađenih od ovih ili sličnih struktura polimernih kompozitnih cevi za dalja istraživanja u domenu poboljšanja njihovih svojstava u raznim uslovima eksploatacije.

Verifikacija rezultata u časopisima i saopštenjima na konferencijama

Objavljeni naučni radovi i saopštenja koji čine deo doktorske disertacije

Deo rezultata iz doktorske disertacije kandidat je prezentovao naučnoj javnosti u zemlji i inostranstvu publikovanjem 7 radova i to: jednog rada u istaknutom časopisu međunarodnog značaja (M22), jednog rada u časopisu međunarodnog značaja (M23), jednog rada saopštenog na skupu međunarodnog značaja štampanog u izvodu (M34), 2 rada u vodećem časopisu nacionalnog značaja (M51), jednog rada u časopisu nacionalnog značaja (M52), jedan rad po pozivu na skupu nacionalnog značaja štampan u celini (M61).

Spisak objavljenih radova mr Marine Stamenović (rođene Krivokuća)

M22- Naučni rad objavljen u istaknutom časopisu međunarodnog značaja

1. **M. Stamenović, S. Putić, M. Rakin, B. Međo, D. Čikara**, "Effect of alkaline and acidic solutions on the tensile properties of glass-polyester pipes", Materials and Design, Vol. 32/4,

pp. 2456-2461 (2011) ISSN 0261-3069, IF 2010=1,696, Materials Science, Multidisciplinary (2010:76/225).

M23- Naučni radovi objavljeni u časopisima međunarodnog značaja

1. **M. Stamenović**, S. Putić, S. Drmanić, M. Rakin and B. Medjo, "The influence of service solutions on the longitudinal and circumferential tensile properties of glass-polyester composite pipes", Materials Science, Vol.47, No1, pp.61-69, ISSN 1068-820X, IF 2010=0,210, Materials Science, Multidisciplinary (2010:193/225).

M34- Radovi saopšteni na skupovima međunarodnog značaja štampani u izvodu

1. **M. Stamenović**, S. Putić, P. Stajčić, "Stress And Strain Determination In Vertical Cutting Of Glass-Polyester Composite Pipes", 5th International Conference of the Chemical Societies of the South-East European Countries, Book of Abstracts, Ohrid, Makedonija, Vol. 1 pp. 237 (2006)

M51- Naučni radovi objavljeni u vodećim časopisima nacionalnog značaja

1. S. Putić, **M. Stamenović**, B. Bajčeta, D. Vitković, "Determination of Tension Strength in the Longitudinal and Circumferential Direction in Glass-Polyester Composite Pipes", Acta Periodica Technologica, APTEFF, 40, 1-220, pp. 155-163, (2009), YU ISSN 1450-7188
2. S. Putić, **M. Stamenović**, J. Petrović, M. Rakin, B. Medo, "Effect of Alkaline Solutions on the Tensile Properties of Glass-Polyester Pipes", Acta Periodica Technologica, APTEFF, 42, (2011), u štampi.

M52- Naučni radovi objavljeni u časopisima nacionalnog značaja

1. **M. Stamenović**, S. Putić, D. Vitković, D. Ljubić, "Određivanje pravca glavnih napona i deformacija kod staklo-poliester kompozitnih cevi pri dejstvu unutrašnjeg pritiska", Svet polimera, Vol. 13 (1) 1-32, pp. 13-16 (2010), ISSN 1450-6734

M61- Radovi po pozivu saopšteni na skupovima nacionalnog značaja štampani u celini

1. **M. Stamenović**, S. Marjanović, S. Putić, "Određivanje napona u staklo-poliester kompozitnim cevima usled dejstva unutrašnjeg pritiska", Savetovanje "Kompozitni materijali i njihova primena", Zbornik radova, Požarevac, Srbija, 27 avgust 2010, 61-70 (ISBN 978-86-912123-3-9).

5. ZAKLJUČAK

Kratak osvrt na disertaciju u celini

Imajući u vidu dobijene rezultate i na osnovu svega izloženog Komisija je ocenila da doktorska disertacija kandidata mr Marine R. Stamenović (rođene Krivokuća), dipl. inž. tehnologije, pod nazivom "Mikromehanička analiza loma i oštećenja kompozitnih cevi *staklena vlakna-poliester* u različitim hemijski agresivnim uslovima", predstavlja originalni naučni doprinos u oblasti Inženjerstva materijala što je potvrđeno objavljivanjem radova u međunarodnim i vodećim nacionalnim časopisima i saopštenjima na međunarodnim konferencijama.

Predlog Komisije Nastavno-naučnom veću

Komisija smatra da doktorska disertacija kandidata mr Marine R. Stamenović (rođene Krivokuća), dipl. inž. tehnologije, pod nazivom “Mikromehanička analiza loma i oštećenja kompozitnih cevi *staklena vlakna–poliester* u različitim hemijski agresivnim uslovima“, poseduje sve elemente potrebne za doktorsku disertaciju. Na osnovu kvaliteta i značaja postignutih rezultata, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu da prihvati ovaj izveštaj i da ga zajedno sa podnetom doktorskom disertacijom mr Marine R. Stamenović (rođene Krivokuća), dipl. inž. tehnologije, učini dostupnim na uvid javnosti u zakonski predviđenom roku, kao i da nakon završetka ove procedure pozove kandidata na usmenu odbranu disertacije pred Komisijom u istom sastavu.

U Beogradu, 07. 11. 2011. god.

ČLANOVI KOMISIJE

1. Dr Slaviša Putić, vanredni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
2. Dr Radoslav Aleksić, redovni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
3. Dr Milorad Zrilić, docent
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
4. Dr Saša Drmanić, docent
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
5. Dr Zijah Burzić, naučni savetnik
Vojno-tehnički institut, Beograd