

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Vere Obradović

Odlukom br. 35/503 od 22.10.2015. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Vere Obradović pod naslovom

Procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala povećane otpornosti na udar

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

R E F E R A T

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

29.09.2009. Vera M. Obradović, dipl. inž. tehnologije, upisuje doktorske studije na Katedri za Inženjerstvo materijala Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, pod mentorstvom prof. dr Radoslava Aleksića.

19.02.2015. Vera M. Obradović je Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta predložila temu za izradu doktorske disertacije pod nazivom „Procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala povećane otpornosti na udar“. Posle smrti prof. dr Radoslava Aleksića, za mentora je imenovan prof. dr Petar Uskoković.

26.02.2015. Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, odlukom br. 35/77, imenovana je Komisija za ocenu podobnosti teme i kandidata za izradu doktorske disertacije.

09.04.2015. Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, odlukom br. 35/93, usvojen je izveštaj Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata za izradu doktorske disertacije.

11.05.2015. Odlukom br. 61206-1809/2-15 Veće naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu daje saglasnost na predlog teme kandidata Vere M. Obradović pod nazivom „Procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala povećane otpornosti na udar“.

09.07.2015. Odobren je zahtev Vere M. Obradović za produženje roka završetka doktorskih studija za još dva semestra - do 30.09.2016. godine.

22.10.2015. Odlukom br. 35/503 na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta imenuje se Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije Vere Obradović, dipl. inž. tehnologije, pod naslovom „Procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala povećane otpornosti na udar“.

1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo i užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala za koju je Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu matična ustanova. Mentor je prof. dr Petar Uskoković, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta, koji je na osnovu dosadašnjih objavljenih radova i iskustava kompetentan da rukovodi izradom ove doktorske disertacije.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Vera M. Obradović, dipl. inženjer tehnologije, rođena je 10. 06. 1984. u Beogradu. Diplomirala je na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Hemijsko inženjerstvo, sa prosečnom ocenom 9,58. Za izuzetan uspeh na studijama u redovnom roku primila je diplome fonda „Panta S. Tutundžić“ u 2004., 2005., 2006. i 2008. godini, kao i specijalno priznanje Srpsko hemijskog društva. Diplomski rad sa temom „Uticaj termofizičkih parametara fluida na termohidraulički proračun razmenjivača toplote sa cevnom snopom i omotačem” odbranila je sa ocenom 10. Školske 2009/10 godine se upisala na doktorske studije na odseku za Inženjerstvo materijala i položila ispite predviđene programom sa prosečnom ocenom 10, uključujući i završni ispit sa naslovom „Analiza stabilnosti elektrospining procesa”.

Vera Obradović je od 1.02.2011. godine zaposlena u Inovacionom centru Tehnološko-metalurškog fakulteta. Angažovana je sa 12 istraživačkih meseci na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja pod nazivom „Sinteza, razvoj tehnologija dobijanja i primena nanostrukturnih multifunkcionalnih materijala definisanih svojstava“, sa evidencionim brojem III 45019. U zvanje istraživač pripravnik izabrana je maja 2011. godine, dok je u zvanje istraživač saradnik izabrana oktobra 2014.

Aktivno je učestvovala u eksperimentalnom radu pripreme i procesiranja *p*-aramidnih kompozita metodom elektropredenja iz rastvora, kao i metodom čestičnog ojačavanja aramidnih lamina; potom u ispitivanju njihove otpornosti na udar pomoću uređaja za ispitivanje udarom kontrolisane energije kao i njihovom karakterizacijom i primenom u balistici.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija Vere M. Obradović pod nazivom „Procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala povećane otpornosti na udar“ napisana je na 166 strana, u okviru kojih se nalazi 6 poglavlja, 108 slika, 18 tabela i 171 literaturnih referenci. Doktorska disertacija sadrži poglavlja: Uvod, Teorijski deo, Eksperimentalni deo, Rezultati i diskusija, Zaključak i Literatura. Po formi i sadržaju, napisana disertacija zadovoljava sve standarde Univerziteta u Beogradu za doktorsku disertaciju.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U Uvodu je opisan značaj materijala u vidu tkanina velike žilavosti koje se koriste za antibalističku zaštitu (pancir prsluci), i njihova sposobnost da apsorbiraju i brzo rasipaju energiju udara projektila. Opisano je ponašanje strukture tkanine na udar metka i unapređenje strukture koja bi zadovoljila zahteve otpornosti na udar. Potom su ukratko opisane metode dizajniranja strukture *p*-aramidnih lamina kojima se mogu značajno unaprediti njihova mehanička svojstva, putem nanoojačanja i modifikacije njihove površine. Kao glavna ojačanja su se koristile silika nanočestice i ugljenične nanocevi, dok se površina modifikovala γ -aminopropiltrioksisilanom (AMEO silan)/etanol rastvorom. Za matricu se koristio poli(vinil butiral), PVB.

Teorijski deo je sastavljen od sedam poglavlja. U prvom poglavlju su opisani materijali koji imaju primenu u antibalističkoj zaštiti. U okviru njega su opisane različite vrste super vlakana velike žilavosti sa svojim karakteristikama (para-aramidna vlakna, polietileni velike molekulske mase, PBO vlakna, itd.) kao i uticaj strukture tkanine na balistički udar. Detaljno su navedena i najnovija istraživanja iz oblasti hibridne zaštitne opreme. U drugom poglavlju su opisana fizička i hemijska svojstva silika nanočestica, njihovo dobijanje i modifikacija njihove površine zbog sprečavanja međusobne aglomeracije. Treće poglavlje je posvećeno ugljeničnim nanocevima, njihovim fizičkim i hemijskim svojstvima, opisu njihove molekulske strukture i metodama koje se koriste za njihovo dobijanje. Ovome su dodati i hibridni materijali koji kombinuju ugljenične nanocevi sa oksidima, sa naglaskom na hibrid o-CNT/mSiO₂, koji se koristio kao ojačanje u okviru izrade disertacije. Četvrto poglavlje je detaljno posvećeno procesu elektropredenja. Tu su navedeni i opisani svi uticaji različitih parametara koji utiču na sam proces: parametri rastvora, procesni parametri i parametri okoline. Na kraju su navedene i primene elektroispredenih vlakana. Peto poglavlje obrađuje dinamičko-mehaničku analizu (DMA) i predstavlja sve veličine koje se određuju putem te analize, a to su: kompleksni modul sa modulom skladištenja i modulom gubitka, faktor gubitka i temperatura ostakljivanja. Šesto poglavlje je posvećeno metodi nanoindentacije i u njemu su opisani osnovni principi za određivanje redukovanog modula elastičnosti i tvrdoće. U sedmom poglavlju je opisano balističko ispitivanje, zatim ispitivanje udarom kontrolisane energije i ispitivanje na ubod nožem. U okviru ovog poglavlja je opisan dijagram rezultata sa uređaja za ispitivanje udarom kontrolisane energije, definicija NIJ Standarda 0101.04 za izvođenje i ispitivanje balističke otpornosti zaštitne opreme, kao i definicija Standarda 0115.00 za ispitivanje otpornosti zaštitnih prsluka za torzo na rasecanje i ubode. Ovome je dodato i definisanje ukupne energije projektila pri probodu materijala putem fizičkih jednačina.

U Eksperimentalnom delu su navedeni materijali koji su se koristili za pripremu uzoraka. Ukupno je izvedeno šest vrsta različitih eksperimenata, kod kojih su korišćene metode elektropredenja, DMA ispitivanja, balističkog ispitivanja, ispitivanja udarom kontrolisane energije, nanoindentacija i ispitivanja na ubod nožem. Pripreme uzoraka za sve vrste ovih eksperimenata su detaljno opisane u ovom poglavlju koje na kraju završava njihovom karakterizacijom. U okviru poglavlja Karakterizacija su opisani uređaji koji su se koristili u eksperimentima kao i sve tehnike koje su se primenjivale za karakterizaciju uzoraka: optička i skenirajuća elektronska mikroskopija i njihova analiza u Image-Pro Plus programskom paketu, FTIR analiza i DSC analiza.

U Rezultatima i diskusiji su navedeni rezultati svih šest vrsta eksperimenata u vidu šest poglavlja. Na kraju svakog poglavlja su izvedeni zaključci. U prvom poglavlju su navedeni rezultati formiranja PVB-SiO₂ vlakana metodom elektropredenja gde su se menjanjem procesnih parametara analizirala vlakna putem optičke i elektronske mikroskopije. Matovi PVB vlakana i PVB-SiO₂ vlakana su se ispitivali putem FTIR analize i DSC analize. Putem dinamičko-mehaničke analize se pokazalo da dodatak PVB vlakana sa silika nanočesticama doprinosi poboljšanim termičkim svojstvima *p*-aramidnih lamina u odnosu na one impregnirane PVB filmom, proizvodeći hibridni balistički sistem povećane zaštite. U drugom poglavlju su sadržani rezultati aramidnih uzoraka sa SiO₂ nanočesticama za DMA ispitivanje. Pokazalo se da mala vrednost modula, kao i velika vrednost faktora gubitka navodi na to da je kod uzorka sa najvećim sadržajem čistih silika nanočestica prisutna i njihova međusobna aglomeracija koja slabi svojstva aramidnih uzoraka. U

odnosu na uzorke sa čistim silika nanočesticama u različitim koncentracijama, najveća vrednost modula skladištenja je dobijena kod uzorka bez dodatih silika nanočestica, čime se objašnjava jako uzajamno delovanje između PVB-a sa koncentracijom od 20 mas.% sa aramidnom tkaninom i poliuretanom. U trećem poglavlju su navedeni rezultati balističkog ispitivanja hibridnih termoplastičnih kompozita sa silika nanočesticama. Posle balističkih ispitivanja, analiza otisaka koji su napravili meci se radila u Image-Pro Plus programskom paketu. Rezultati ispitivanja su pokazali da je dodatak AMEO modifikovanih nanočestica silike *p*-aramidnim/PVB kompozitima doprineo značajnom unapređenju njihovih mehaničkih i balističkih svojstava, čime oni mogu da pruže adekvatnu zaštitu protiv metaka. U četvrtom poglavlju su navedeni rezultati ispitivanja aramidnih uzoraka sa različitim tipovima ojačanja udarom kontrolisane energije. Ovo poglavlje prikazuje rezultate aramidnih uzoraka sa četiri sloja Kolon lamina ojačanih ugljeničnim nanocevima i aramidnih uzoraka sa jednim slojem Kolon lamine sa različitim tipovima ojačanja. U oba slučaja su se skenirane slike ispitivanih uzoraka analizirale u Image-Pro Plus programskom paketu. Kod uzoraka sa četiri sloja lamina najbolji rezultati DMA ispitivanja kao i ispitivanja udarom kontrolisane energije su postignuti sa najvećom koncentracijom MWCNT (1 mas.%) i površinskom modifikacijom *p*-aramidnih lamina sa AMEO silanom. Kod uzoraka sa jednim slojem lamine, ispitivanjem udarom kontrolisane energije PVB uzorka sa 10 mas.% silika nanočestica, postignuto je maksimalno povećanje ukupne apsorbovane energije. U petom poglavlju su navedeni rezultati ispitivanja PVB filmova sa različitim tipovima ojačanja metodom nanoindentacije gde se ustanovilo da postepeno dolazi do povećanja redukovanog modula elastičnosti i tvrdoće sa dodatkom nanoojačanja, pri čemu je najbolje rezultate pokazao PVB film sa o-SWCNT/mSiO₂ hibridima. U šestom poglavlju su navedeni rezultati ispitivanja aramidnih uzoraka sa različitim tipovima ojačanja na ubod nožem. Pokazalo se da je najveće povećanje apsorbovane energije imao PVB uzorak sa o-SWCNT/mSiO₂ hibridima. DMA ispitivanja uzoraka na ubod nožem su pokazali da je najveći modul i najveću temperaturu ostakljivanja imao Kolon/PVB/o-SWCNT/mSiO₂ uzorak.

U poglavlju Zaključak sumirani su najznačajniji rezultati proistekli iz ove doktorske disertacije, gde su navedena unapređenja svih svojstava kompozita kroz različite vrste eksperimenata.

U poglavlju Literatura navedene su sve reference citirane u doktorskoj disertaciji.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Materijal u vidu tkanina koje se proizvode od vlakana velike žilavosti se koristi u antibalističkoj zaštiti zbog svoje male gustine, velike otpornosti i velikog kapaciteta apsorpcije. Poslednjih godina *p*-aramidne tkanine (lamine) imaju veliku primenu u formiranju različitih kompozitnih struktura koje se koriste za proizvodnju antibalističke zaštitne opreme za telo. Njihova izvanredna mehanička svojstva potiču od dugačkih, pravih poli(parafenilen tereftalamid) vlakana.

Povećanje modula ili čvrstoće polimera se postiže dodavanjem ojačanja. Različiti parametri ojačanja se uzimaju u obzir pri njihovom odabiru za uspešnu realizaciju u kompozitu. U njih se ubrajaju: veličina ojačanja (čestica), njihova geometrija, orijentacija, čvrstoća i jačina veze ojačanje-matrica.

Keramika se, zbog svojih svojstava, često koristi za ojačavanje zaštitne opreme za telo. Time se postiže fleksibilnost i mala težina cele zaštitne strukture. U okviru keramike nanosilika predstavlja jedan od vodećih ojačanja koja se koriste u polimernim kompozitima. Silika (SiO₂) nanočestice karakterišu njihova velika specifična površina. Kako dolazi do uzajamne aglomeracije nanočestica, agensi u vidu silana se koriste za modifikaciju površine nanosilike zbog njihove uspešne disperzije i deaglomeracije, uzrokujući formiranje hemijskih veza između njih i organskih komponenata.

Ugljenične nanocevi (Carbon nanotubes – CNT) predstavljaju odličan izbor kod odabira ojačanja za polimerne kompozite zbog njihovog velikog odnosa dužina/prečnik (oko 132000000), velike čvrstoće, malih dimenzija i mase, i velike provodljivosti.

Uzorci su bili *p*-aramidne lamine (Kolon i Twaron tipa) koje su se impregnisale 10 mas.% PVB/etanol rastvorom sa različitim vrstama ojačanja koja su bila u vidu vlakana i čestica. Vlakna koja su se koristila kao ojačanja su PVB-SiO₂ elektroispredena vlakna. Čestice koje su se koristile kao ojačanja su u čistom obliku ili su bile hemijski tretirane zbog njihove bolje disperzije i formiranja veza sa PVB matricom. Kao ojačanja su se koristile sledeće čestice: silika (SiO₂) - čista i modifikovana, čiste i oksidovane ugljenične nanocevi - višeslojne (MWCNT) i jednoslojne (SWCNT), volfram disulfid (WS₂), i hibridi (oksidovane ugljenične nanocevi/modifikovana silika (o-MWCNT/mSiO₂ i o-SWCNT/mSiO₂)).

Površina uzoraka *p*-aramidnih multiaksijalnih lamina (Twaron i Kolon lamina) je bila modifikovana sa γ -aminopropiltrioksisilanom (AMEO silan)/etanol rastvorom. Uzorci su potom bili impregnisani sa poli(vinil butiral)(PVB)/etanol rastvorom sa različitim vrstom i sadržajem nanoojačanja radi poboljšanja njihovih mehaničkih, termičkih i balističkih svojstava i povećanja apsorbovane energije udara, što je predstavljalo cilj istraživanja ove doktorske teze.

Na osnovu sveobuhvatnog i detaljnog pregleda najnovije naučne literature, može se reći da sprovedena istraživanja u okviru ove doktorske disertacije spadaju u veoma aktuelno polje istraživanja u oblasti kompozitnih materijala koji se koriste za antibalističku zaštitu.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U doktorskoj disertaciji je navedeno ukupno 171 referenci, od čega je najveći deo referisane literature objavljen u prethodnih 10 godina. Najveći broj citiranih referenci čine radovi iz vrhunskih međunarodnih časopisa, sa tematikom značajnom za izradu doktorske disertacije. Literatura obuhvata radove koji su vezani za materijale koji imaju primenu u antibalističkoj zaštiti (struktura aramidnih tkanina i različite vrste ojačanja). Pored ovoga, literatura se odnosila na sve vrste metoda koje su se radile za vreme izrade disertacije: elektropredenje, DMA ispitivanje, balistička ispitivanja, nanoindentacija, ispitivanje udarom kontrolisane energije i ispitivanje na ubod nožem. U okviru literaturnih navoda, nalaze se i reference kandidata dipl. ing. Vere Obradović, koje su proistekle u toku izrade ove disertacije i koje su objavljene u vrhunskim međunarodnim časopisima, vodećim domaćim časopisima i saopštenjima na međunarodnim skupovima.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U okviru realizacije doktorske disertacije korišćene su sledeće metode za procesiranje i karakterizaciju hibridnih nanokompozitnih materijala:

- Elektropredenje (elektrospining)
U eksperimentima su se PVB-SiO₂ nanovlakna dobijala procesom elektropredenja na Electrospinner CH-01 (Linari Engineering) uređaju.
- DMA ispitivanje
Modul skladištenja (E') i faktor gubitka ($\tan \delta$) za sve uzorke u eksperimentima su se određivali pomoću dinamičko-mehaničke analize (DMA na uređaju Q800 TA Instruments, USA) koja se izvodila upotrebom konzole na savijanje sa frekvencijom od 1 Hz pri čemu je temperatura bila u opsegu od 40 °C do 170 °C i brzinom zagrevanja od 3 °C/min u atmosferi azota.
- Balističko ispitivanje
U eksperimentima su balističkom ispitivanju bili podvrgnuti uzorci višeslojnih aramidnih lamina ojačanih velikom koncentracijom silika nanočestica. Ispitivanja su bila izvedena u skladu sa NIJ 0101.04 standardom, upotrebom uređaja SABRE ballistics UK Integrated Range Instrument System (IRIS). Dve vrste metka su se koristile u ispitivanju: 357 Magnum FMJ 10.2g i 44

Rem. Magnum JHP 15.6 g, pri čemu su njihove nominalne mase bile 10,2g i 15,6g redom. U svaki uzorak se pucalo sa četiri 357 Magnum metka i jednim 44 Rem. Magnum metkom.

- Ispitivanje udarom kontrolisane energije

U eksperimentima se ispitivala otpornost na udar jednoslojnih i višeslojnih *p*-aramidnih lamina koje su bile čiste ili ojačane različitim vrstama nanočestica sa različitim koncentracijama. Ispitivanja su se izvodila na uređaju za ispitivanje udarom kontrolisane energije velikih brzina Hydroshot HITS-P10, proizvođača Shimadzu Corporation, sa brzinama do 20 m/s i temperaturnom opsegu od - 40 °C do 150 °C. Ispitivanja udarom su se izvodila u cilju određivanja udarne sile i apsorbovane energije.

- Nanoindentacija

Mehanička svojstva kompozitnih filmova su se ispitivala pomoću nanoindentacije koja se izvodila na uređaju Hysitron TI 950. Ispitivanje indentacijom se koristilo za određivanje nanomehaničkih svojstava koja uključuju tvrdoću indentacije (H) i redukovani modul elastičnosti (Er).

- Ispitivanje na ubod nožem

U eksperimentima se ispitivanje na ubod nožem izvodilo na Instron uređaju u skladu sa NIJ standardom 0115,00, sa nožem koji je imao sečivo tipa S1 pri čemu se određivala apsorbovana energija uzoraka.

Tehnike koje su se koristile za karakterizaciju uzoraka, između ostalih, bile su optička i skenirajuća elektronska mikroskopija i njihova analiza u Image-Pro Plus programskom paketu.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Na osnovu analize eksperimentalnih rezultata prikupljenih kroz realizaciju teze može se zaključiti da je ostvaren veliki doprinos unapređenju mehaničkih svojstava materijala za antibalističku zaštitu koji su bili u vidu *p*-aramidnih lamina (tkanina). Poboljšanje mehaničkih karakteristika i otpornosti na udar ovih materijala je postignuto njihovim impregnisanjem sa PVB/etanol rastvorom u kome su bile dispergovane različite vreste ojačanja. Na ovaj način je moguće dizajnirati napredne antibalističke materijale sa unapred definisanim svojstvima. Kao ishod ovih naučnih rezultata i tehničkih rešenja moguća je i primena u realnim proizvodima u saradnji sa privredom. Verifikacija ostvarenih eksperimentalnih rezultata u okviru ove disertacije postignuta je i objavljivanjem radova koji iz nje proističu u međunarodnim naučnim časopisima iz ove oblasti.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Na osnovu dosadašnjeg rada i pokazanih rezultata tokom doktorskih studija i u okviru naučnoistraživačkog rada, diplomirani inženjer tehnologije Vera Obradović je pokazala izuzetnu sklonost i sposobnost za bavljenje naučno-istraživačkim radom. Iz same predložene teme disertacije, kandidat je do sada objavio tri rada u međunarodnim časopisima sa SCI liste gde je bio prvi autor i 14 saopštenja na međunarodnim (12) i nacionalnim skupovima (2).

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

U doktorskoj disertaciji su ostvareni sledeći naučni doprinosi:

- Poboljšana su mehanička svojstva materijala za antibalističku zaštitu (*p*-aramidnih lamina) dodatkom elektrospinovanih vlakana

- Poboljšana su mehanička svojstva, balistička svojstva i povećana je apsorbovana energija materijala za antibalističku zaštitu (*p*-aramidnih lamina) dodatkom silika nanočestica, ugljeničnih nanocevi i hibrida (oksidovane ugljenične nanocevi/modifikovana silika (o-CNT/mSiO₂)) koji su se koristili kao ojačanja, pri čemu su uzorci poliuretan/*p*-aramidnih multiaksijalnih lamina (Twaron i Kolon lamine) bili impregnisani sa poli(vinil butiral)(PVB)/etanol rastvorom sa različitim sadržajem ojačanja (različiti odnos ojačanja u odnosu na PVB)
- Poboljšana su mehanička i balistička svojstva i povećana je apsorbovana energija *p*-aramidnih kompozita pomoću modifikacije površina *p*-aramidnih lamina sa γ -aminopropiltrioksisilanom (AMEO silan)/etanol rastvorom
- Povećan je redukovani modul elastičnosti i tvrdoća filmova dodatkom nanoojačanja, pri čemu su najbolji rezultati postignuti sa o-SWCNT/mSiO₂ hibridima
- Povećana je apsorbovana energija dvoslojnih *p*-aramidnih uzoraka sa o-SWCNT/mSiO₂ hibridima kod eksperimenta na ubod nožem u odnosu na uzorak bez nanoojačanja.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Predmet celokupne disertacije je dizajniranje strukture i dobijanje nanokompozitnih materijala za antibalističku zaštitu sa gledišta poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava, kao i otpornosti pri udarima kontrolisane energije i balističkim udarima, što se postiglo upotrebom, u vidu ojačanja, elektrospredjenih vlakana, čistih i modifikovanih silika nanočestica, višeslojnih ugljeničnih nanocevi, volfram disulfid nanočestica, o-CNT/mSiO₂ čestičnih hibrida, kao i hemijskom modifikacijom silika nanočestica i ugljeničnih nanocevi i modifikacijom aramidne lamine AMEO silanom. Procesiranje i karakterizacija uzoraka se radila na najsavremenijim uređajima na Tehnološko-metalurškom fakultetu. U pomenute uređaje se ubrajaju: aparat za elektrospredjenje Electrospinner CH-01 (Linari Engineering), uređaj za ispitivanje udarom kontrolisane energije velikih brzina Hydroshot HITS-P10, proizvođača Shimadzu Corporation, Japan, i uređaj za nanoindentaciju Hysitron TI 950. Rezultati proistekli iz istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji značajno su unapredili postojeća naučna znanja iz oblasti kompozitnih materijala povećane otpornosti na udar koja mogu imati praktičnu primenu.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Kandidatkinja dipl. inž. Vera M. Obradović do sada je, kao prvi autor i koautor, objavila i saopštila sledeće radove koji uključuju eksperimentalne rezultate koji su ostvareni radom u okviru ove disertacije:

Kategorija M 21:

1. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Živković I., Radojević V., Uskoković P. S., Aleksić R., *Dynamic Mechanical and Impact Properties of Composites Reinforced with Carbon Nanotubes, Fibers and Polymers*, vol. 16, no. 1, pp. 138-145, 2015 (IF 0.881) (ISSN: 1229-9197).

2. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Jančić-Heinemann R., Živković I., Radojević V., Uskoković P. S., Aleksić R., *Ballistic Properties of Hybrid Thermoplastic Composites with Silica Nanoparticles, Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 9, no. 4, pp. 97-107, 2014 (IF 0.986) (ISSN: 1558-9250).

Kategorija M 23:

1. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Kojović A., Živković I., Radojević V., Uskoković P. S., Aleksić R., Electrospun Poly(vinylbutyral)/silica Composite Fibres for Impregnation of Aramid Fabrics, *Materiale Plastice*, vol. 51, no. 3, pp. 319-322, 2014 (IF 0.824) (ISSN: 0025-5289).

Kategorija M 24:

1. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Živković I., Uskoković P. S., Aleksić R., Dynamic mechanical properties of aramid fabrics impregnated with multiwalled carbon nanotubes, *Zaštita materijala (Materials Protection)*, vol. 14, no. 2, pp. 141-145, 2013 (ISSN: 0351-9465).

2. **Obradović V.**, Stojanović D., Kojović A., Živković I., Radojević V., Uskoković P., Aleksić R., Aramid composites impregnated with different reinforcement: nanofibers, nanoparticles and nanotubes, *Zaštita materijala (Materials Protection)*, vol. 15, no. 4, pp. 351-361, 2014 (ISSN: 0351-9465).

Kategorija M 51:

1. **Obradović V.**, Kojović A., Stojanović D. B., Nikolić N., Živković I., Uskoković P., Aleksić R., The Analysis of Forming PVB-SiO₂ Nanocomposite Fibers by the Electrospinning Process, *Scientific Technical Review*, vol. 61, no. 3-4, pp. 34-38, 2011 (ISSN: 1820-0206).

2. **Obradović V.**, Stojanović D., Grković M., Živković I., Radojević V., Uskoković P., Aleksić R., Dynamic Mechanical Properties of Aramid Fabrics Impregnated with Carbon nanotube/Poly (Vinyl Butyral)/Ethanol Solution, *Metallurgical & Materials Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 259-266, 2013 (ISSN: 2217-8961).

Kategorija M 52:

1. **Obradović V. M.**, Stojanović D. B., Radojević V. J., Uskoković P. S., Aleksić R. R., Ispitivanje udarima kontrolisane energije multiaksijalnih aramidnih lamina sa različitim tipovima ojačanja, *Tehnika-Novi Materijali*, vol. 24, no. 4, pp. 585-589, 2015 (ISSN: 0354-2300).

Kategorija M 53:

1. **Obradović V.**, Elektrospinning tehnologija, *Hemijski pregled*, vol. 53, no. 2, str. 41-47, 2012 (ISSN: 0440-6826).

Kategorija M 33:

1. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Živković I., Jančić Hajneman R., Radojević V., Uskoković P. S., Aleksić R., "Ballistic resistance of nanomodified hybrid thermoplastic composites", *Proceedings of the 5th International Scientific Conference OTEH 2012 on Defensive Technologies*, Belgrade, 2012, pp. 301-304, (ISBN: 978-86-81123-58-4).

2. **Obradović V.**, Stojanović D., Grković M., Živković I., Radojević V., Uskoković P., Aleksić R., "Dynamic Mechanical Properties of Aramid Fabrics Impregnated with Carbon nanotube/Poly (Vinyl Butyral)/Ethanol Solution", *Proceedings & Book of Abstracts, 1st MME SEE 2013, Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe*, Belgrade, 2013, pp. 406-413, (ISBN: 987-86-87183-24-7).

Kategorija M 34:

1. **Obradović V.**, Stojanović D., Kojović A., Živković I., Jančić Hajneman R., Uskoković P., Aleksić R., "The analysis of stability of the electrospinning process of forming PVB-SiO₂ nanocomposite fibers", *The Book of Abstracts of the Thirteenth Annual Conference YUCOMAT*, Herceg Novi, 2011, pp. 143.

2. **Obradović V.**, Nikolić N. D., Stojanović D., Kojović A., Živković I., Uskoković P., Aleksić R., "Deposition of the electrospun PVB-SiO₂ fibers onto the aramid fabrics", *The Book of Abstracts of the 2nd International Workshop*, Belgrade, 2011, pp. 57 (ISBN: 978-86-7401-278-9).

3. **Obradović V.**, Kojović A., Stojanović D. B., Nikolić N. D., Živković I., Uskoković P. S., Aleksić R., "Electrospun PVB-SiO₂ composite fibers: morphology, properties and ballistic applications", *The Book of Abstracts of the Tenth Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering*, Belgrade, 2011, pp. 39 (ISBN: 978-86-80321-27-1).

4. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Zrilić M., Živković I., Radojević V., Uskoković P. S., Aleksić R., "Mechanical properties of hybrid thermoplastic impregnated aramid fabrics with multiwalled carbon nanotubes", *The Book of Abstracts of the First International Conference-Processing, Characterization and Application of Nanostructured Materials and Nanotechnology-NanoBelgrade 2012*, Belgrade, 2012, pp. 86 (ISBN: 978-86-7401-285-7).

5. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Kojović A., Živković I., Radojević V., Uskoković P. S., Aleksić R., "Dynamic mechanical thermal properties of hybrid thermoplastic impregnated aramid fabrics with silica nanoparticles", *The Book of Abstracts of the First International Conference-Processing, Characterization and Application of Nanostructured Materials and Nanotechnology-NanoBelgrade 2012*, Belgrade, 2012, pp. 87 (ISBN: 978-86-7401-285-7).

6. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Trifunović D. D., Živković I., Radojević V., Uskoković P. S., Aleksić R., "Instrumented Impact Testing of Hybrid Thermoplastic Aramid Fabrics Reinforced with Carbon Nanotubes", *The Book of Abstracts of the Fifteenth Annual Conference YUCOMAT*, Herceg Novi, 2013, pp. 114.

7. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Jančić - Heinemann R., Živković I., Radojević V., Uskoković P. S., Aleksić R., "Ballistic Test of Silica Nanoparticles Reinforced Thermoplastic Composites", *The Book of Abstracts of the Slonano Conference*, Ljubljana, 2013, pp. 72.

8. **Obradović V.**, Stojanović D., Petrović M., Živković I., Radojević V., Uskoković P., Aleksić R., *Impact testing of hybrid thermoplastic aramid fabrics with different kinds of reinforcement*, *The Book of Abstracts of the Sixteenth Annual Conference YUCOMAT*, Herceg Novi, 2014, pp. 102.

9. **Obradović V.**, Stojanović D., Petrović M., Živković I., Radojević V., Uskoković P., Aleksić R., *Impact testing of kolon p-aramid fabrics with various types of reinforcement*, *The Book of Abstracts of the Thirteenth Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering*, Belgrade, 2014, pp. 31 (ISBN: 978-86-80321-30-1).

10. **Obradović V.**, Stojanović D. B., Kojović A., Radojević V., Uskoković P., "Nanomechanical and thermal properties of PVB films with various types of nanoreinforcement", *The Book of Abstracts of the 5th SoMaS summer school*, Mittelwihr, France, 2015, pp. 26-27.

Kategorija M 63:

1. **Obradović V.**, Stojanović D., Kojović A., Radojević V., Živković I., Uskoković P., Aleksić R., „Uticaj procesnih parametara na formiranje strukture PVB-SiO₂ nanokompozitnih vlakana“, *Zbornik radova sa Savetovanja Napredni materijali i njihove primene*, Požarevac, 2011, str. 56-63 (ISBN: 978-86-911159-2-0).

2. **Obradović V.**, Stojanović D., Živković I., Jančić Hajneman R., Radojević V., Uskoković P., Aleksić R., „Balistička svojstva impregnisanih aramidnih tkanina sa silika nanočesticama“, *Zbornik radova sa Savetovanja Primena savremenih materijala u tehnologijama i konstrukcijama*, Požarevac, 2012, str. 46-54 (ISBN: 978-86-911159-3-7).

Tehnička i razvojna rešenja:

Kategorija M82:

Nova proizvodna linija, novi materijal, industrijski prototip, novo prihvaćeno rešenje problema u oblasti makroekonomskog, socijalnog i problema održivog prostornog razvoja uvedeni u proizvodnju

1. Aleksić R., Stojanović D., Uskoković P., Živković I., Kojović A., **Obradović V.**, Radojević V., Zrilić M., Funkcionalno gradijentni nanokompozitni hibridni materijali povećane otpornosti na udar, *Projekat MPNRS Razvoj opreme i procesa dobijanja polimernih kompozitnih materijala sa unapred definisanim funkcionalnim svojstvima*, Evidencioni broj 34011, Korisnik ULTRATEX, doo, Šabac, 2011.

2. Aleksić R., **Obradović V.**, Stojanović D., Živković I., Uskoković P., Radojević V., Mitraković D., Trifunović D., Petrović M., Balistički hibridni termoplastični kompoziti ojačani ugljeničnim nanocevima, *Projekat MPNRS Razvoj opreme i procesa dobijanja polimernih kompozitnih materijala sa unapred definisanim funkcionalnim svojstvima*, Evidencioni broj 34011, Korisnik Ultrateks, Šabac, Oblast na koju se tehničko i razvojno rešenje odnosi: materijali i hemijske tehnologije, 2013.

3. Aleksić R., Stojanović D., **Obradović V.**, Živković I., Uskoković P., Radojević V., Jančić-Hajneman R., Zrilić M., Trifunović D., Balistički hibridni termoplastični kompoziti ojačani nanočesticama silike, *Projekat MPNRS Razvoj opreme i procesa dobijanja polimernih kompozitnih materijala sa unapred definisanim funkcionalnim svojstvima*, Evidencioni broj 34011, Korisnik Ultrateks, Šabac, Oblast na koju se tehničko i razvojno rešenje odnosi: materijali i hemijske tehnologije, 2013.

Kategorija M 83:

Novo laboratorijsko postrojenje, novo eksperimentalno postrojenje, novi tehnološki postupak

1. Aleksić R., Stojanović D., Uskoković P., **Obradović V.**, Kojović A., Radojević V., Živković I., Uređaj za dobijanje nanokompozitnih funkcionalnih vlakana, *Projekat MPNRS Razvoj opreme i procesa dobijanja polimernih kompozitnih materijala sa unapred definisanim funkcionalnim svojstvima*, Evidencioni broj 34011, Korisnik ULTRATEX, doo, Šabac, 2011.

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu svega izloženog, Komisija smatra da doktorska disertacija pod nazivom „Procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala povećane otpornosti na udar“ kandidata Vere M. Obradović, dipl. inž. tehnologije, pripada naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo i užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala, što je potvrđeno radovima objavljenim u vrhunskim međunarodnim časopisima kao i brojnim saopštenjima na nacionalnim i međunarodnim naučnim skupovima.

Imajući u vidu obim i kvalitet dobijenih rezultata, mogućnost njihove primene u praksi, kao i sposobnosti koje je kandidat pokazao, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta da prihvati ovaj izveštaj i da se doktorska disertacija pod nazivom „Procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala povećane otpornosti na udar“ kandidata Vere M. Obradović, dipl. inž. tehnologije, prihvati, izloži na uvid javnosti i nakon isteka zakonom predviđenog roka, uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 23. 11. 2015. godine

ČLANOVI KOMISIJE

Prof. dr Petar Uskoković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Prof. dr Vesna Radojević, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Prof. dr Đorđe Janačković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Dušica Stojanović, naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Irena Živković, docent
Univerzitet umetnosti u Beogradu, Fakultet primenjenih umetnosti