

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu održanoj 09.02.2012. godine, određeni smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije Abdolghane M. Hussen Torki, MS nauka o materijalima, pod naslovom "Dinamičko-mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih materijala" ("Dynamic Mechanical Properties Of Hybrid Nanocomposites Materials". Posle pregleda doktorske disertacije kandidata Abdolghane M. Hussen Torki, Komisija podnosi Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta sledeći

**IZVEŠTAJ
o urađenoj doktorskoj disertaciji**

1. UVOD

1.1. Naslov i obim disertacije

Doktorska disertacija Abdolghane M. Hussen Torki pod nazivom "Dinamičko-mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih materijala" napisana je na 111 strana, sadrži 7 tabela, 42 grafičkih prikaza i 207 literaturnih navoda. Teza se sastoji iz sledećih celina: *Apstrakt* (na srpskom i engleskom jeziku), *Spisak slika*, *Spisak tabela*, *Uvod*, *Teorijski deo* (tri poglavlja), *Eksperimentalni deo* (tri poglavlja sa rezultatima i diskusijom), *Zaključak*, *Prilozi i Literatura*.

1.2. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

- 26.06.2008. - Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je odluka o imenovanju Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije Abdolghane M. Hussen Torki-ja, pod nazivom "Dinamičko-mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih materijala".
- 17.07.2008. - Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je odluka o prihvatanju Izveštaja Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije i odobrenju izrade doktorske disertacije Abdolghane M. Hussen Torki-ja, pod nazivom "Dinamičko-mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih materijala" Za mentora je određen Dr Radoslav Aleksić,
- 26.09.2009. - Veće naučnih oblasti tehničkih nauka donosi odluku po kojoj daje saglasnost na predlog teme Abdolghane M. Hussen Torki-ja, pod nazivom "Dinamičko-mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih materijala",
- 09.02.2012.- Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta imenovana je Komisija za pregled i ocenu doktorske disertacije u sastavu: dr Radoslav Aleksić, red. prof. TMF, dr Petar Uskoković, red.prof. TMF, dr Vesna Radojević, van. prof. TMF, dr Milorad Zrilić, docent TMF i dr Irena Živković, viši naučni saradnik, Institut bezbednosti- BIA.

1.3. Mesto disertacije u odgovarajućoj naučnoj oblasti

Istraživanja u okviru ove teze spadaju u naučnu oblast Hemija i hemijska tehnologija, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu.

1.4. Biografski podaci o kandidatu

Mr Abdolghane M. Torki rođen je 10. 08. 1965. godine u Tripoliju. Diplomirao je na Hemijskom fakultetu (Alfateh University) u Tripoliju, 1989. godine. Magistarske studije završio je 2000. godine na Pekinškom Univerzitetu aeronautike i astronautike, Beijing University of Aeronautics and Astronautics-BUAA, u oblasti polimernih kompozitnih materijala. Magistarsku tezu pod nazivom: "Behavior of the Hybrid Composites under Sharp Impact and Ballistic Impact", odbranio je 28.03.2003. Od 1989. godine zaposlen je u Tehničko-istraživačkom centru u Tripoliju i radi kao hemičar na anlizama kontrole kvaliteta.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Struktura i sadržaj disertacije

Doktorska disertacija sadrži sledeća poglavlja: *Apstrakt* (na srpskom i engleskom jeziku); *Uvod*; *Osnove lakih pancirnih sistema*; *Laki pancirni materijal*; *Nanokompozitni polimerni balistički materijal*; *Mehanizmi oštećenja balističkih kompozitnih materijala i metode ojačavanja kompozita*; *Eksperimentalne metode*; *Dinamičko-mehanička svojstva nanokompozita poli (vinil butiral)-aramidna vlakna*; *Viskoelastična svojstva nanomodifikovanih termoplastičnih polimera za impregnaciju multiaksijalnih aramidnih tkanina*; *Rezultati i diskusija*; *Zaključak*; *Prilozi i Literatura*. Po svojoj formi i sadržaju, podneti rad zadovoljava sve standarde za doktorsku disertaciju.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U Uvodu je istaknut značaj istraživanja u oblasti nanotehnologija. Na sadašnjem nivou naučnih saznanja i praktične primene nanotehnologije, glavna istraživanja odvijaju se u oblasti materijala i novih proizvodnih tehnologija, sa ciljem unapređenja konkurentnosti nove industrije zasnovane na novom znanju. Do nedavno su mnogi projekti razvoja materijala bili vezani za klasične tehnologije. Međutim, kako su istraživanja i rezultati u primeni novih vrsta tehnologija uznapredovali velikim koracima, većina projekata se modifikuje i sagledava kroz prizmu primene najnovijih saznanja u oblasti nano-tehnologije. Tako već danas stručnjaci Masačusetskog instituta za nanotehnologije, formirani u timove, konstruišu nove uniforme, šlemove, rukavice, čizme i druge delove zaštitne odeće, koji će imati funkciju mehaničke i balističke zaštite od protivničke municije. Drugi istraživački tim radi na pronalaženju materijala za vojničku odeću koja će, u oružanoj borbi, pružati i visok nivo sigurnosti od bioloških agenasa ili hemijskih supstanci, s obzirom na to da se pretpostavlja da će različiti nanovirusi i mikropore biti upotrebljene od strane protivnika u budućem oružanom sukobu.

U drugom poglavlju dat je prikaz zaštitnih pancirnih-balističkih sistema nove generacije. Primenom nanotehnologije napravljenje su nove generacije pancira. Adekvatnim izborom nano čestica metala i keramike koje su dispergovane u odgovarajućim fluidima i pokazuju pseudodilatantni efekat. Osnova ovog mehanizma je interakcija modifikovane površine nanočestica i fluida. Kad zrno ili geler udari "nanomodifikovani kompozit", nanočestice se skupe u klaster (buket) i fluid se momentalno pretvori u tvrdi kompozitni materijal. Proces prelaza iz tečnog stanja u čvrst materijal se događa trenutno, u milisekundi. Što je jači udar, tj. veća je energija i brzina projektila, pancir postaje automatski čvršći i tvrdi. Po prestanku udara pancir se vraća u prvobitnu fleksibilnu formu. Kao nanočestice za ovu namenu najčešće se koriste silika čestice a kao tečna faza poli (etilen glikol). Brojna su istraživanja sa primenom nanovlakana od keramike i karbonskih nanocevi na pronalaženju najefikasnijeg nano-materijala za zaštitne prsluke ili pancire. Novi materijal služi za izradu tzv. mekih neprobojnih prsluka, načinjenih od fleksibilnog tkanja aramidnih vlakana, a najviši nivo zaštite postiže se ugradnjom dodatnih nanomodifikovanih krutih pancirnih ploča koja su bila predmet istraživanja ove doktorske disertacije.

U trećem poglavlju data je teorijska analiza dizajniranja strukture i dobijanje nanokompozitnih balističkih materijala sa gledišta poboljšanja njihovih svojstava otpornosti pri udarima visoke energije. Kompozitni materijali imaju široku primenu u zaštiti od balističkog udara zbog svoje složene strukture. Prodiranje projektila u materijal je povezano sa mehanizmom oštećenja koje je potrebno detaljno proučiti. Opterećenja udara se dele na tri grupe u zavisnosti od brzine kretanja projektila: a) male brzine udara; b) velike brzine udara; i c) hipervelike brzine udara. Razlog za ovu podelu se nalazi u prelazu energije sa projektila na metu, energetskog rasipanja i mehanizma širenja oštećenja koji se drastično menja u zavisnosti od brzine kretanja projektila. Polimerni hibridni nanokompozitni materijali su otporni na udar a pripadaju grupi balističkih funkcionalnih materijala u kojima su nanočestice ojačanja dispergovane ili u ojačavajućoj tkanini ili u osnovnoj polimernoj matrici. U polimernim nanokompozitima čestice značajno menjaju svojstva polimera, što zavisi od udela, oblika i veličine čestica, kao i njihove međusobne interakcije. Ugrađivanje metalnih i neorganskih čestica nano dimanzija predstavlja atraktivan način za značajno modifikovanje mehaničkih, optičkih i termičkih svojstava polimernih nanokompozita čak i kad njihov udeo ne prelazi nekoliko procenata. Svojstva kompozita zavise od svojstava konstituenata, sadržaja konstituenata, interakcije konstituenata (sinergistički efekat), raspodele konstituenata, geometrije i orijentacije ojačanja. Step en uticaja na svojstva kompozita zavisi od: zapreminskog udela, prečnika, oblika, raspodele i orijentacije dispergovane faze.

U četvrtom poglavlju performanse nanokompozitnih struktura su analizirane sa aspekta više parametara među kojima su svojstvo aramidne pređe, struktura tkanine, oblik i brzina projektila, interakcija među slojevima, polje graničnih uslova, trenje pređa između sebe i trenje pređa i projektila i uslova modifikacije nanopunila u nanokompozitnim vlaknima. Analizirani su optimalni uslovi modifikovanja keramičkih nanočestica silanima i sinteza prekursora za dobijanje nanokompozitnih vlakana za vezivanje aramidnih tkanina koloidnom disperzijom nanočestica gline, SiO_2 , Al_2O_3 , CeO_2 , SiC i nanokarbonskih cevčica u različitim disperznim sredstvima. Svojstva polimernog materijala mogu se značajno menjati dodatakom neorganskih punila. Punila nano dimenzija, velike specifične površine, ostvaruju s obzirom na dodatnu količinu veliki kontakt s polimernom matricom, te stoga već i mala količina nanopunila značajno utice na svojstva kompozita. Značajan problem u pripremi nanokompozita predstavlja postizanje ravnomerne raspodele čestica punila u polimernoj matrici. Osim svojstava dodatih komponenata na svojstva kompozita značajno utiče međudejstvo na kontaktu matrica-punilo. Modifikacija površine punila različitim sredstvima omogućava kreiranje svojstava međupovršine, što utiče na konačna svojstva kompozita. Najčešće korišćeni vezujući agensi za čestice SiO_2 su silicijumorganska jedinjenja - silani. Silanizacija je opšte korišćen metod za poboljšanje disperzije nanočestica, smanjenje aglomeracije i povećanje kompatibilnosti nanočestica sa polimernim matricama.

U petom poglavlju dati su mehanizmi loma kompozitnih materijala pri balističkom udaru sa aspekta poboljšanja njihovih performansi nanomodifikovanjem. Razaranje u balističkim polimernim kompozitima je kompleksan proces, usled anizotropije svojstava i mikrostrukturne nehomogenosti. Proces oštećenja konstituenata kompozita, vlakana i matrice je složena kombinacija fenomena mikroloma u kompozitima koja zavisi od načina delovanja udarnih naprezanja male ili velike energije. Proces razaranja kompozita je postupan i dovodi na kraju do potpunog razaranja ili bar do gubitka sposobnosti nošenja mehaničkih opterećenja. Velika žilavost kompozitnih materijala je posledica kompleksnosti prostiranja nastalih prslina u njima. Razaranje kompozita se inicira i širi na više mesta i kada dostigne kritičan nivo oštećenja odvija se postepeno kroz širenje prslina koja ima mnogo složeniji karakter od prslina u homogenim materijalima. Rast prslina se usporava prisustvom međupovršina na mikroskopskom nivou između vlakna i matrice i na makroskopskom nivou na međupovršinama između lamina u laminatu. Lom kompozita obuhvata ne samo prekid vlakana i pucanje matrice, nego i složeno skretanje prslina duž međupovršina između slojeva i vlakna i matrice (takozvani debonding). Prslina raste prostiranjem kroz matricu i stupa u interakciju sa vlaknima. Sa porastom primenjenog opterećenja matrica i vlakna pokušavaju da se deformišu u skladu sa svojim različitim elastičnim svojstvima, pa usled toga, na kontaktu vlakno-matrica niču velika lokalna naprezanja. Ovo dovodi do razdvajanja vlakana od matrice, obrazovanja i prostiranja prslina kroz međupovršinu vlakno-smola. Ovaj proces se smanjuje sa povećavanjem jačine međupovršinske veze i povećava sa smanjenjem jačine ove veze. Razdvajanje može da dovede do skretanja vrha prslina duž vlakana u većoj meri što se manifestuje kao praktično zaustavljanje prslina. Pucanje može zatim da se nastavi na ravni udaljenoj od početne ravni loma, što ima za posledicu složeniji izgled loma. Posle dešavanja razdvajanja kontinualno vlakno je praktično podvrguto testu istezanja sa mernom dužinom jednakom dužini debondinga. Vlakno se kida u nekoj tački na ovoj "mernoj dužini", uz vrednost čvrstoće vlakna karakterističnoj za datu mernu dužinu. Ovaj mehanizam se naziva deformacija i lom vlakana. Posle loma vlakna, prelomljeni krajevi su i dalje vezani za matricu i da bi došlo do daljeg otvaranje prslina, odnosno do konačnog odvajanja dva dela epruvete, krajevi vlakna se izvlače i ovaj mehanizam razaranja se naziva izvlačenje vlakana. Poprečno pucanje kroz matricu i/ili kroz međupovršinu vlakno-matrica u realnim kompozitima je retko prosto ili pojedinačno. Mnogo češće dolazi do obrazovanja više poprečnih prslina kroz aksijalno opterećenu zapreminu tzv. višestruki prelom.

U šestom poglavlju dat je kratak prikaz eksperimentalnih metoda koje su korišćene u okviru ove disertacije. Detaljno su opisane dinamičko-mehanička analiza (DMA) i metoda ispitivanja kompozitnih materijala udarima velikih brzina i energije, kao i svojstva koja se primenom tih metoda dobijaju.

U sedmoj glavi dat je prikaz eksperimentalnih istraživanja dinamičko-mehaničkih svojstava poli (vinil butiral) ojačan nanočesticama SiO_2 i TiO_2 . Dat je prikaz dobijanja SiO_2 i TiO_2 /poli (vinil butiral) nanokompozita sa poboljšanim dinamičko-mehaničkim karakteristikama. Ojačavanje matrice nanočesticama SiO_2 i TiO_2 urađeno je na dva načina: umešavanjem nanočestica u rastvoru poli (vinil butirala) u etanolu i umešavanjem nanočestica u rastopu poli (vinil butirala). Nanomodifikovana poli (vinil butiral) matrica sa SiO_2 i TiO_2 česticama korišćena je za izradu laminatnih kompozita p-aramid/PVB. Dat je prikaz diskusije rezultata termo-mehaničkih merenja dobijenih kompozita.

U osmoj glavi dat je prikaz eksperimentalnih istraživanja modifikacije polimerne matrice nanočesticama SiO_2 koje su tretirane silanima pri dobijanju multiaksijalnih laminatnih kompozita sa aramidnim vlaknima. Silanizacija je opšte korišćen metod za poboljšanje disperzije punioca u organskim fluidima, smanjenje aglomeracije i poboljšanje kompatibilnosti i vezivanja sa organskim matricama. Silani kao vezujući agensi imaju višefaznu ulogu pri dobijanju kompozita i veoma je važna njihova uloga u smislu da poboljšaju mehanička svojstva, obezbede hemijsku stabilnost tokom prerade, poboljšaju umešavanje i tečljivost smeše sirovih materijala itd. Glavna funkcija vezujućih agenasa je da poboljšaju disperziju i adheziju hidrofilnog punioca i hidrofobne polimerne matrice. Silan kao vezujući agens može se koristiti u svim slučajevima kada je neophodno formirati vezu između organskih polimera i neorganskih materijala, kao što su punioci i ojačani materijali ili staklene i metalne površine. Efekat primene silana kao vezujućeg agensa je poboljšanje mehaničkih i električnih svojstava kompozitnih materijala, kao što su zatezna čvrstoća, modul elastičnosti, električna konstanta itd. Dat je prikaz eksperimentalnih rezultata modifikovanja i karakterisanja nanočestica, izrade multiaksijalnih kompozita i karakterisanje njihovih viskoelastičnih i balističkih svojstava. Uvođenje 5 mas.% SiO_2 nanočestica u sastavu p-aramid-poli (vinil butiral) je dovela do značajnih poboljšanja u mehaničkim svojstvima. Uvođenje silana dovelo do bolje disperzije i deaglomeracije SiO_2 čestica i do formiranja hemijskih veza između organskih i neorganskih sastojaka.

U Zaključku su sažeti postignuti rezultati istraživanja koji odgovaraju zadatim ciljevima disertacije. U prilogu su dati rezultati ispitivanja nanomodifikovanih kompozitnih materijala u realnom balističkom udaru prema standardizovanim metodama u balističkom tunelu. Na kraju je dat spisak korišćene literature.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost, originalnost i značaj

Prethodnih godina nano- SiO_2 i nano- TiO_2 čestice su privukle veliku pažnju za potencionalne primene u polimernim nanokompozitima. Odgovarajuća niska površinska energija, hidrofilna svojstva nanosilika čestica je neophodna za modifikaciju površine nanočestica da bi se izbegla njihova aglomeracija i obezbedila odgovarajuća međufazna adhezija između nanosilika čestica i hidrofobne polimerne matrice. Silani kao konvencionalni površinski vezujući agensi su hemijski agens koji može da hemijski i fizički modifikuje nanosilika čestice kako bi se postigla bolja disperzija punioca i pospešila kompatibilnost sa matricom.

Savremena istraživanja u ovoj oblasti usmerena su u pronalaženju mehanizama zaustavljanja rasta prslina modifikovanjem strukture na nano nivou što je i predmet ove doktorske disertacije. Proučavanja u okviru ove disertacije bila su usmerena na istraživanja mehanizama apsorpcije energije u nanokompozitima pri udarnim opterećenjima visoke energije i ponašanje nano čestica kao konstituenata u strukturi hibridnih kompozitnih materijala. Sinteza ovih nanokompozitnih materijala izvršiće se primenom koloidnih suspenzija koje se karakterišu ekstremnim porastom viskoznosti pri velikim brzinama smicanja kojima su izloženi pri udarnim naprezanjima.

Originalnost ideje se ogleda što je princip hibridizacije primenjen na izradu laminatnih balističkih ploča sa laminama koje su različito nanomodifikovane a samim tim i sa različitim svojstvima. Značaj ove ideje je što različito nanomodifikovane lamine omogućavaju izradu funkcionalno gradijentnih kompozitnih materijala od nano do mikro nivoa. Ovakav pristup omogućava razvoj strukturno veoma kompleksnih višefunkcionalnih materijala u kojima dizajniranje strukture se prostire od nano nivoa-nanokompozitni materijali, do makro nivoa. Višefunkcionalni kompozitni materijali mogu se shvatiti kao kompleksni materijalni sistemi sastavljeni od više komponenata širokog spektra svojstava koji obavljaju više različitih funkcija - kao senzori za detektovanje promene strukture i svojstava kompozita, kao materijali sa efektom "samoizlečenja" i kao "inteligentne" konstrukcije sa efektom naglog poboljšanja svojstava kao odgovora na iznenadni spoljni uticaj kojim je izložen materijal.

3.2. Navedena istraživanja izvedena su u cilju:

Ciljevi ove disertacije su višestruki: 1) proučavanje mehanizama procesiranja nano prahova različitih oksida u različitim disperzionim sredstvima prema klasičnim metodama i savremenim metodama modifikovanja površine čestica; 2) eksperimentalna istraživanje uticaja procesnih uslova brizganja i toplog presovanja hibridnih nanokompozita sa tkaninama od aramidnih vlakana sa različitim udelom modifikovanih nanočestica na njihova dinamičko-mehanička svojstva (modul

sačuvane i izgubljene energije i tangens gubitaka) u različitom temperaturnom intervalu pri različitim frekvencijama); 3) eksperimentalna istraživanja uticaja procesnih uslova brizganja i toplog presovanja hibridnih laminatnih nonokompozita sa matricom od poli (vinil butirala) sa različitim udelom modifikovanih čestica silicijum dioksida na makromehanička svojstva (Jungov modul elastičnosti, zatezna čvrstoća, prekidno izduženje); 4) eksperimentalna ispitivanja otpornosti na razaranje dobijenih hibridnih nanokompozitnih materijala na udar velikim energijama i brzinama (standardna balistička ispitivanja sa municijom u realnim uslovima).

3.3. Analiza primenjenih naučnih metoda i njihova adekvatnost za sprovedeno istraživanje

Disperzija, stepen deaglomeracije kao i mikrografije polaznih i modifikovanih nanočestica ispitani su korišćenjem transmisione elektronske mikroskopije (TEM). Proces površinske modifikacije nanočestica praćen je metodom infracrvene spektroskopije (FTIR). Morfologija, raspodela i veličina nanočestica u polimernom kompozitu određena je metodom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Termička karakterizacija dobijenih nanokompozita urađena je primenom metoda diferencijalne skenirajuće kalorimetrije (DSC). Uticaj udela ojačanja kao i jačina veze ojačanje-polimer za različite temperature i frekvencije dinamičkih naprezanja uspitan je primenom dinamičko-mehaničke analize (DMA). Zatezna mehanička svojstva nanokompozita određena su korišćenjem hidrauličke kladalice sa računarskim sistemom za pracenje rezultata merenja. Udarne balistička ispitivanja velikim energijama izvršena su u standardizovanom balističkom tunelu prema najnovijoj standardizovanoj proceduri NIJ Standard 0101.06 za materijale zaštitu ljudskog tela.

3.4. Ocena primenljivosti i verifikacije ostvarenih rezultata

Iz dosadašnje dinamike razvoja područja nanomaterijala moguće je zaključiti da će se u bliskoj budućnosti sve prednosti ovih materijala moći ekonomski iskoristiti. Pri tome se misli na zamenu današnjih materijala i poboljšanje njihovih svojstava, ali i na iskorišćenje njihovih sasvim novih svojstava. Primena ovih materijala je značajna kod materijala za balističke zaštite. Sredstva lične balističke zaštite, uniforme, taktički prsluci, maskirna oprema i dr. sa sposobnošću prilagođavanja različitim klimatskim i taktičkim uslovima upotrebe jedinica vojske i policije predmet su neprekidnih razvojnih istraživanja i inovacija. Nivoi balističke zaštite variraju prema konkretnim zahtevima i uslovima korisnika. U proizvodnji se nalaze prsluci zaštite i ploče anatomski oblikovane u trodimenzionalnoj formi. Osnovni materijali koji se koriste za proizvodnju prsluka su aramidna i poli (etilenska) vlakna (Kevlar i Dynema), i hibridna kombinacija ovih materijala sa keramičkim materijalima. Poslednja generacija balističkih materijala za personalnu zaštitu su fleksibilni balistički materijali sa STF fluidima koji su zbog niza obećavajućih komparativnih prednosti predmet prioritarnih istraživanja u ovoj oblasti u svetu (MIT, University of Delaware, US Army Research Lab.)

3.5. Ocena sposobnosti kandidata za samostalan naučni rad

U svom dosadašnjem teorijskom i eksperimentalnom radu Abdolghane M. Hussen Torki pokazao je samostalnost u kreiranju, realizaciji eksperimenata i obradi rezultata.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Doprinos rezultata ove teze može se posmatrati sa stanovišta poboljšane modifikacije površina nanočestica kao i dobijanja nanokompozita sa znatno poboljšanim termičkim, dinamičko-mehaničkim i nanomehničkim svojstvima u poređenju sa do sada objavljenim rezultatima. Analiza raspodele veličina deaglomerisanih nanočestica kao i mikrostrukturna analiza pokazuju da je primena navedene metode dovela do visokog stepena deaglomeracije nanočestica, preciznije, od primarnih aglomerata dimenzija preko 1 μm , nanosilika čestice su dovedene do dimenzija oko 60 nm (SEM). Takođe primena ove metode dovela je i do povećanja količine kovalentno vezanih silana kao kupljućih agenasa i stepena pokrivenosti površine sa procentom hemisorbovanih silana.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije pripada oblasti nanomaterijala i nanotehnologija koja je u trendu savremenih istraživanja. Posebno su intenzivna istraživanja u oblasti polimernih nanokompozita gde tradicionalno slabe strane polimera (niske vrednosti parametara mehaničke čvrstoće i loša termostabilnost) se značajno poboljšavaju primenom malog udela nano punioca i ojačanja uz neznatan porast gustine. Razvijena je metoda dizajniranja strukture nanokompozitnih balističkih materijala sa gledišta poboljšanja njihovih svojstava otpornosti pri udarima visoke energije. Proučeni su uslovi dobijanja laminatnih kompozitnih materijala p-aramid/poli (vinil butiral). Poli (vinil butiralni) sloj nanošen je u obliku disperzije poli (vinil butirala) i nano čestica SiO_2 u etil-alkoholu, pri čemu su korišćene modifikovane i nemodifikovane čestice SiO_2 sa vezujućim agensom-AMEO silanom. Na taj nači je utvrđen veliki značaj modifikacije nano čestica SiO_2 sa silanima na mehanička, termička i antibalistička svojstva dobijenih hibridnih nanokompozitnih materijala.

4.3. Očekivana primena rezultata u praksi

Istraživanja vezana za ovu doktorsku disertaciju su deo realizacije predmeta tehnološko razvojnog projekta TR34011- "Razvoj opreme i procesa dobijanja polimernih kompozitnih materijala sa unapred definisanim funkcionalnim svojstvima" gde je jedan od participanata domaći proizvođač multiakksijalnih aramidnih tkanina koji će biti i neposredni korisnik rezultata istraživanja do kojih se došlo izradom ove doktorske disertacije.

4.4. Verifikacija naučnih doprinosa

Iz disertacije je do sada objavljeno dva rada: jedan u vrhunskom međunarodnom časopisu M21 i jedan rad u međunarodnom časopisu M23, kao i četiri saopštenja na skupu međunarodnog značaja štampano u izvodu, M34.

M21 Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu

1. **A.M. Torki**, D.B. Stojanović, I.D. Živković, A. Marinković, S.D. Škapin, P.S. Uskoković, R.R. Aleksić, The viscoelastic properties of modified thermoplastic impregnated multiaxial aramid fabrics, *Polymer Composites*, **33** (2012) 158–168. ISSN: 0272-8397 (IF 2010 0.998 *Materials Science, Composites* 7/24).

M23 Rad u međunarodnom časopisu

1. **A.M. Torki**, I. Živković, V.R. Radmilović, D.B. Stojanović, V.J. Radojević, P.S. Uskoković, R.R. Aleksić, Dynamic-mechanical properties of nanocomposites with poly (vinyl butyral) matrix, *International Journal of Modern Physics B*, **24** (2010) 805-812. ISSN: 0217-9792 (IF 2010 0.402 *Physics, Applied* 86/96).

M34 Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu

1. **A.M. Torki**, D.B. Stojanović, I.D. Živković, M.M. Zrilić, P.S. Uskoković, R.R. Aleksić, Modified thermoplastic impregnated multiaxial aramid fabrics with nanosilica reinforcement, Thirteenth Annual Conference YUCOMAT 2011, Herceg-Novi, Montenegro, September 5-9, 2011, The Book of Abstracts, p. 149.
2. **A.M. Torki**, D.B. Stojanović, I. D. Živković, A. Marinković, P.S. Uskoković, R.R. Aleksić, Thermoplastic Impregnated Aramid Fabrics with Nanosilica Reinforcement, 2nd International Workshop, University of Belgrade Faculty of Technology and Metallurgy, October 24 - 25, 2011, The Book of Abstracts, p. 54.
3. **A.M. Torki**, D.B. Stojanovic, M. Zrilic, N. Borna, I. Živković, P.S. Uskokovic, R. Aleksić, Thermal and mechanical properties of modified hybrid composite aramid-poly (vinyl butyral), 1st International Workshop, University of Belgrade Faculty of Technology and Metallurgy, November 29 - 30, 2010, The Book of Abstracts, p. 72.
4. **A.M. Torki**, D.B. Stojanovic, J.T. Stajic-Trosic, P.S. Uskokovic, V.J. Radojevic, V.R. Radmilovic, R.R. Aleksić, Thermo-mechanical properties of poly (vinyl butyral)/titanium dioxide nanocomposites, Eleventh Annual Conference YUCOMAT 2009, Herceg-Novi, Montenegro, August 31 - September 4, 2009, The Book of Abstracts, p. 179.

Deo rezultata iz rada M23 prikazan je u preglednom studiji iz balističkih kompozita, Leszek A. Utracki, Rigid ballistic composites (Review of literature), NRC/IMI/Advanced Materials Design, National Research Council Canada, 2010.

5.1. Kratak osvrt na disertaciju u celini

Rezultati istraživanja u okviru doktorske disertacije Abdolghane M. Hussen Torki doprinose povećanju nivoa znanja o strukturi i svojstvima hibridnih nanokompozitnih materijala i mogućnostima poboljšanja komercijalnih balističkih materijala dizajniranjem struktura kontrolisanog oblika i veličine na nanometarskoj skali. Ispitani su uslovi silanizacije nanoprahova SiO_2 i TiO_2 , uslovi njihove ugradnje u poli (vinil butiral) i p-aramidnu multiaksijalnu tkaninu kao i uslovi toplog presovanja i dobijanja nanomodifikovanih funkcionalnih gradijentnih laminatnih kompozita. Uradjena je kompletna karakterizacija svih nivoa strukture od nano do makro dimenzija kao i ispitivanje termomehaničkih svojstava svih konstituenata dobijenih kompozita. Dobijeni rezultati ukazali su na značajno poboljšanje mehaničkih svojstava nanomodifikovanih kompozita u odnosu na klasične balističke laminatne kompozite dobijene metodom toplog presovanja. Uproredna ispitivanja balističkih karakteristika nanomodifikovane multiaksijalne ploče sa osam slojeva i iste ploče bez nanomodifikacije dobijene toplim presovanjem su pokazali da klasična ploča nije izdržala prvi projektil a da je nano modifikovana ploča zaustavila svih osam zrna predviđenih standardom za ispitivanje klase IIIa.

Pregledom doktorske disertacije, Komisija je konstatovala da podneta doktorska disertacija ima sve neophodne sadržaje i da je napisana u skladu sa uobičajenim standardima. Izloženi materijal je sistematizovan i dobro organizovan. Predmet i ciljevi istraživanja su jasno navedeni, ostvareni rezultati i doprinos istraživanja su verifikovani kroz odgovarajući broj naučnih publikacija.

5.2. Predlog Komisije Nastavno-naučnom veću

Komisija konstatuje da disertacija ispunjava sve zakonske, formalne i suštinske uslove, kao i sve kriterijume koji se primenjuju prilikom vrednovanja doktorske disertacije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Takođe je konstatovano da doktorska disertacija predstavlja originalni naučni doprinos u oblasti Nauke o materijalima i inženjerstva materijala u okviru teme dinamičko mehanička svojstva nanomodifikovanih balističkih kompozitnih materijala.

Imajući u vidu kvalitet i obim ostvarenih rezultata, kao i njihov naučni doprinos, Komisija pozitivno ocenjuje doktorsku disertaciju i predlaže Nastavno-naučnom Veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, da doktorsku disertaciju Abdolghane M. Hussen Torki. pod nazivom "Dinamičko-mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih materijala", prihvati i odobri njenu usmenu javnu odbranu pred Komisijom u istom sastavu.

U Beogradu, 09. 04. 2012.

ČLANOVI KOMISIJE:

Dr Radoslav Aleksić, red. prof. TMF,

Dr Petar Uskoković, red.prof. TMF,

Dr Vesna Radojević, van. prof. TMF,

Dr Milorad Zrilić, docent TMF,

Dr Irena Živković, viši naučni saradnik, Institut
bezbednosti- BIA