

Uzroci nastajanja šupljina u polimernim kompozitima

Vancaš, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2007

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:050515>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Ana Vancaš

Zagreb, 2007.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Đurđica Španiček

Ana Vancaš

Zagreb, 2007.

ZAVRŠNI PROJEKT – ZADATAK

Naslov:

UZROCI NASTAJANJA ŠUPLJINA U POLIMERNIM KOMPOZITIMA

Opis zadatka:

Temeljem dostupne literature navesti uobičajene postupke pripreme kompozitnih materijala i navesti glavne uzročnike pojave šupljina kao posljedice postupka pripreme. Posebno proučiti metode određivanja sadržaja šupljina i probleme vezane uz njih.

U cilju karakterizacije kompozitnog materijala u radu je potrebno provesti sljedeće:

1. pripremiti izbruske za mikroskopiranje
2. primjenom optičkog mikroskopa odrediti sadržaj šupljina
3. za isti kompozit odrediti sadržaj šupljina i računskim putem
4. usporediti dobivene rezultate
5. komentirati primijenjene metode i dobivene rezultate.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Sadržaj

Zadatak.....	3
I .Uvod.....	5
II. Matrice u suvremenim kompozitima.....	6
1. Epoksidne smole.....	6
2. Nezasićene poliesterske smole.....	7
3. Vinil esterske smole.....	8
4. Poliimidne smole.....	9
III. Ojačala u suvremenim kompozitima.....	12
1. Staklena vlakna.....	12
2. Borova vlakna.....	12
3. Ugljična vlakna.....	13
4. Aramidna vlakna.....	14
5. Vlakna od α -glinice.....	15
6. Kontinuirana keramička vlakna.....	16
IV. Proizvodnja kompozitnih materijala.....	17
1. Proizvodnja preprega.....	17
2. Namotavanje.....	17
3. Lijevanje.....	18
4. Trake.....	18
5. Pultrudiranje.....	18
6. Deformiranje i difuzijsko povezivanje.....	18
V. Eksperimentalni dio.....	19
1. Izrada kompozitnog materijala.....	19
2. Priprema izbruska za mikroskopiranje.....	20
3. Određivanje sadržaja šupljina primjenom optičkog mikroskopa.....	22
4. Određivanje sadržaja šupljina primjenom računske metode.....	26
5. Utjecaj šupljina na mehanička svojstva polimernih kompozita.....	28
VI. Literatura.....	30

I. UVOD

Kompozitni materijali jesu materijali sastavljeni od najmanje dva bitno različita materijala koji zajedničkim djelovanjem daju kompozitu takva svojstva kakva nije moguće postići zasebnim djelovanjem njegovih pojedinih komponenti. Ovisno o matrici, dijele se na metalne, keramičke i polimerne, a u ovom radu razmatrat će se vlaknima ojačani polimerni kompoziti. Vlakna nose većinu opterećenja, koja se na njih prenose pomoću duktilnije matrice. Matrica također štiti pojedinačna vlakna od površinskog oštećenja uslijed abrazije ili djelovanja okolnog medija.

Značajnija uporaba kompozita započela je nakon drugog svjetskog rata, ali puni potencijal te vrste materijala ostvaren je tek nakon razvoja posebne vrste ojačane plastike – suvremenih kompozita, koji uključuju visokomodulna vlakna, poput grafitnih i borovih vlakana, ili nižemodulna vlakna u kombinaciji sa matricama dobrih svojstava, kao što su epoksidne smole, vinil esterske smole, itd. Kombinacijom tih svojstava postižu se jedinstvena svojstva superiornija onima mnogih tradicionalnih materijala, uključujući aluminij i čelik. Primjerice, kompoziti imaju više specifične čvrstoće i specifične module elastičnosti u odnosu na tradicionalne materijale, što omogućuje smanjenje težine. To pak rezultira s porastom efikasnosti strukture, smanjenjem troškova energije i materijala. Dodatne prednosti kompozita su i otpornost na umor i koroziju, niski troškovi proizvodnje, mogućnost podešavanja toplinskih karakteristika (toplinska istezljivost i vodljivost), prigušivanje vibracija, te fleksibilnost konstrukcije. Vlaknima ojačani kompoziti mogu biti izotropni, ortotropni ili anizotropni, a slojeviti kompoziti (laminati i sendvič konstrukcije) uglavnom su anizotropnih svojstava.

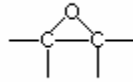
Prva uporaba suvremenih kompozita ostvarena je sa sendvič konstrukcijom koja je imala jezgru od drveta i ploče poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima, a koristila se za izradu trupa aviona. Uskoro se ta tehnologija proširila u mnogim disciplinama, ali moderno doba suvremenih kompozita započelo je oko 1960. s razvojem borovih vlakana, koja su osim visoke specifične čvrstoće nudila i visoku specifičnu krutost. Daljnji razvitak raznih vrsta vlakana bio je popraćen i razvojem tehnologije matričnih smola.

Svojstva kompozita mogu se podesiti tako da zadovoljavaju široki spektar zahtijevanih karakteristika, te se zato koriste u raznim područjima, kao što su zrakoplovstvo, svemirska i automobilska industrija, elektronika, itd. Budući da se ta svojstva postižu kombiniranjem odgovarajućih matrica i vlakana, najvažnije među njima biti će opisane u slijedećoj točki.

II. MATRICE U SUVREMENIM KOMPOZITIMA

1. Epoksidne smole

Epoksidne smole su duromerne smole sa karakterističnom epoksidnom funkcionalnom skupinom:



Uz primjenu topline kemijski stvaraju netopivu i netaljivu matricu umrežene strukture (adicijska reakcija bez razvoja hlapivih nusprodukata). Trenutno su epoksidne smole najčešća matrica za suvremene kompozite. Imaju odlična adhezijska svojstva, što je važno za prijenos naprezanja u kompozitima, te dobra mehanička svojstva (visok modul elastičnosti) i kemijsku postojanost. Dostupan je širok spektar epoksidnih smola, ojačala, katalizatora i aditiva, ovisno o zahtijevanim svojstvima i proizvodnim karakteristikama.

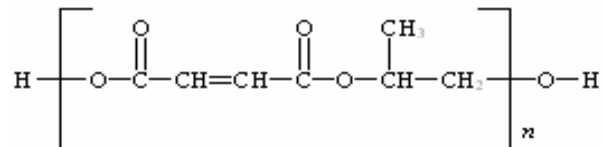
Kompoziti sa epoksidnom matricom proizvode se na dva načina; jedan od njih uključuje predimpregnirane kompozitne oblike. Prvo se vlakna impregniraju sa smolom kako bi nastao prepreg, koji se onda oblikuje u skladu sa željenom geometrijom. Zatim se odvija očvršćivanje, najčešće uz povišenu temperaturu i tlak, čime se dobiva krajnji proizvod. Drugi način podrazumijeva smolu u kapljevitom stanju. Postoji više varijanti tog postupka. U jednoj od njih se jednoslojnu 'plahu' vlakana (npr. mat) oblikuje i impregnira sa kapljevitom smolom, nakon čega se odvija povezivanje i umreživanje. Ostale varijante ovog procesa su tehnike kalupljenja, pa se npr. u jednoj od njih vlakna u kalupu oblikuju u konačan oblik, a smola se prenosi u kalup kako bi okvasila vlakna. Krajnji korak u svim ovim postupcima proizvodnje kompozita je očvršćivanje, koje se, ako je riječ o epoksidnim smolama, sastoji od reakcije epoksidne smole s ojačalom, u cilju postizanja umrežene strukture, tj. trodimenzionalne polimerne mreže koja je netopiva i netaljiva. Uobičajeno se provodi pod utjecajem temperature i tlaka.

Svojstva epoksidnih smola određena su kemijskom prirodom molekula koje sudjeluju u reakciji, veličinom molekula između poprečnih veza (molekulna masa između poprečnih veza) i brojem poprečnih veza po jedinici volumena (gustoća poprečnih veza). Kao i ostale duromerne smole, ni epoksidne ne mekšaju zagrijavanjem kao plastomerne, ali imaju gornju temperaturu uporabe pri kojoj im se smanjuje krutost. Ta temperatura određena je temperaturom staklastog prijelaza smole.

Zbog odličnih fizikalnih svojstava kompoziti s epoksidnom matricom imaju veliku primjenu. Koriste se čak i za vrlo zahtjevne konstrukcije kao što su avionske, posude pod tlakom, itd.

2. Nezasićene poliesterske smole

Nezasićene poliesterske smole su duromerne smole koje u prisutnosti katalizatora peroksida stvaraju netopive, netajive i umrežene smole. Tipična smola te vrste dobiva se reakcijom glikola (diol), poput etilen ili propilen glikola, i anhidrida, npr. maleinskog, ili dvobazne kiseline. Time se dobiva struktura:



Ovaj tip smole se, u prisutnosti katalizatora peroksida, umrežava reakcijama na mjestima nezasićenih dvostrukih veza. Polimerizacija je adicijskog tipa, bez oslobađanja lako hlapivih nusprodukata, što omogućava jednostavniju obradu. Ove smole se najčešće kombiniraju s nezasićenim, reaktivnim monomernim otapalima, najčešće stirenom, radi dobivanja niskoviskozne, lako obradive tekuće smole.

Slično kao i epoksidne, poliesterske smole mogu biti načinjene tako da zadovolje zahtjeve raznih primjena. Poliesterske formulacije koje se koriste u suvremenim kompozitima uobičajeno sadrže osnovnu poliestersku smolu, reaktivne razrjeđivače, katalizator, ubrzavalo, punila i inhibitore. Dostupne su različite poliesterske smole obzirom na različite monomerne komponente od kojih nastaju. Punila mogu biti u obliku gline, minerala, plastomera, itd, a koriste se za postizanje specifičnih karakteristika smola, npr. za smanjenje gorivosti, kontrolu skupljanja, otpornost na udarno opterećenje, itd. Peroksidi su katalizatori sa slobodnim radikalima koji se koriste za umreživanje poliesterskih smola. Najčešći su metil-etil keton peroksid, benzoil peroksid i t-butil perbenzoat. Često se uz njih dodaju i ubrzavala koja kataliziraju prekid rada katalizatora. Primjeri za ubrzavala su kobaltov oktoat, kobaltov naftenoat, itd. Inhibitori služe za zaustavljanje polimerizacije, te sprečavanje starenja i preranog reagiranja smole. Tipični inhibitor je hidrokinon. Radi bolje kontrole roka uporabe smole, temperature početka polimerizacije i vremena polimerizacije, poželjno je odabrati optimalni sustav katalizatora, ubrzavala i inhibitora.

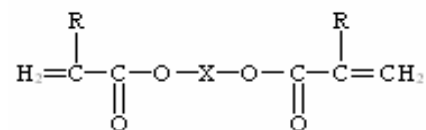
Postoje mnogi postupci proizvodnje kompozita sa matricom od nezasićenih poliesterskih smola. Oni se mogu kategorizirati u postupke kalupljenja, prevlačenja i lijevanja. Mnogi od tih postupaka su visokoproduktivni postupci koji se osnivaju na brznoj polimerizaciji.

Najčešća ojačala za ove smole su staklena vlakna, a koriste se i s ugljičnim vlaknima, što omogućuje širok spektar mehaničkih i fizikalnih svojstava.

Poliesterski kompoziti primjenjuju se za automobilske komponente, čamce, ribičke štapove, teniske reketi, avionske dijelove, kućišta strojeva, itd.

3. Vinil-esterske smole

Vinil-esterske smole su duromerne smole koje u prisutnosti katalizatora ili radijacije stvaraju netopivu, netaljivu i umreženu matričnu smolu. Nude poboljšanu kemijsku postojanost, više temperature toplinske distorzije i bolju ravnotežu svojstava u odnosu na uobičajene nezasićene poliesterske smole. Imaju kemijsku strukturu slijedećeg tipa:



X je osnova polimerne molekule, a R može biti –H ili –CH₃.

U usporedbi sa nezasićenim poliesterima koji imaju nezasićenu vezu duž polimerne molekule, a na krajevima nemaju, vinil-esteri imaju samo reaktivnu nezasićenu vezu na kraju molekule.

Pretežno se dobivaju kemijskom reakcijom akrilne ili metakrilne kiseline s epoksidnim smolom. Osnova polimerne molekule, a time i fizikalna i mehanička svojstva smole, mogu se mijenjati uporabom različitih epoksidnih smola. Analogno nezasićenim poliesterskim smolama i vinil-esterske se najčešće kombiniraju s nezasićenim, reaktivnim otapalima (npr. stiren) kako bi se smanjila viskoznost, poboljšala obradivost i reaktivnost smole.

Odabirom kemijske osnove smole, reaktivne skupine na kraju molekule, katalizatora, ubrzavala, punila i drugih dodataka, s obzirom na specifičnu primjenu, moguće je postići brojne proizvodne karakteristike i zahtijevana svojstva. Tako npr. metakrilna skupina na kraju molekule osigurava optimalnu kemijsku postojanost smole.

Polimerizacija je analogna onoj za nezasićene poliesterske smole. Umreživanje se odvija preko njihovih nezasićenih reaktivnih vinilnih grupa, pomoću slobodnih radikala od kemijskih katalizatora, te toplinskih ili radijacijskih izvora. Ne dolazi do razvijanja lako hlapivih nusprodukata. Uobičajeni katalizatori koji se koriste za ove smole su metil-etil keton peroksid i benzoil peroksid, koji se obično koriste s ubrzavalima kao što su kobaltov naftenoat i dimetilanilin.

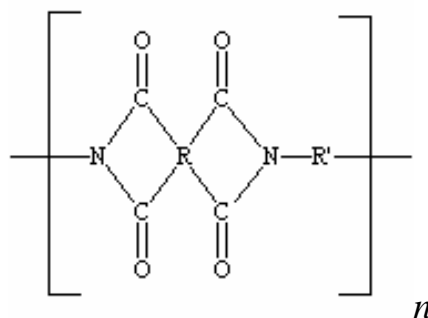
Za očvršćivanje se koriste razni izvori zračenja, uključujući i UV i elektronsko zračenje, a za takav postupak pogodniji su akrilni esteri jer su reaktivniji. Isto je tako bolje koristiti zračenje nego perokside, zbog smanjene potrošnje energije, manjeg skupljanja, kraćeg vremena obrade i očvršćivanja pri okolišnoj temperaturi.

Kompoziti na osnovi ovih smola proizvode se na slične načine kao i oni sa poliesterskom matricom jer imaju mnoge zajedničke karakteristike očvršćivanja. Jedina osobitost je već spomenuta: učestala primjena zračenja. To je prednost pogotovo kod postupaka prevlačenja zbog smanjene energije i visoke stope proizvodnje.

Vinil-esterske smole imaju dobra mehanička svojstva, odličnu kemijsku postojanost i dobru otpornost na povišene temperature, pa su njihovi kompoziti prisutni u brojnim primjenama, kao što su automobilski dijelovi, kućišta strojeva, cijevi, kanali, korozijski postojeane oplata, spremnici, itd.

4. Poliimidne smole

Poliimidne smole su aromatske heterociklične polimerne smole koje nastaju reakcijama umrežavanja ili linearnim reakcijama (produžavanje lanca) radi postizanja kompozitnih matrica otpornih na visoke temperature. Sposobne su za rad pri temperaturama koje daleko premašuju radne temperature do sad spominjanih materijala. Tako je npr. maksimalna temperatura uporabe epoksidnih smola oko 200 ° C, dok se poliimidne mogu koristiti pri temperaturama do 370 ° C. Povišena temperaturna stabilnost omogućena je aromatskom heterocikličnom strukturom osnove polimerne molekule:



R i R' mogu se mijenjati. Ovakva struktura je vrlo termooksidacijski stabilna, te omogućuje visoke temperature staklastog prijelaza. Postoje tri bitne skupine poliimidnih smola za suvremene kompozite: a) kondenzacijske smole, b) smole kod kojih polimeriziraju monomerni reaktanti i c) bismaleimidne smole.

a) Kondenzacijske poliimidne smole

Tipična smola ovog tipa pripravlja se reakcijom aromatskog tetrakarboksilnog dianhidrida i aromatskog diamina. Reakcija polimerizacije sastoji se od dva koraka. U prvoj reakciji nastaje poliamična kiselina visoke molekulne mase. Otopina ove kiseline u otapalima s visokom točkom tališta koristi se za impregnaciju staklenih ili ugljičnih ojačala, i tako nastaju preprezi. Iduća reakcija je očvršćivanje, pri čemu nastaje konačna struktura imidnog prstena. To

je popraćeno oslobađanjem produkata kondenzacije, kao što je voda, i gubitkom zaostalog otapala ili lako hlapivih spojeva. Upravo je razvijanje ovih lako hlapivih spojeva tijekom proizvodnje uzrok vrlo teškom postizanju niskog udjela šupljina u ovim materijalima. Poroznost se može smanjiti pomno osmišljenim ciklusima očvršćivanja, koji uključuju duga vremena držanja na različitim temperaturama kako bi se omogućio postepeni razvitak lako hlapivih spojeva, uz uporabu tlaka u određenim trenucima ciklusa. Obično se koriste i dugi, postepeni ciklusi naknadnog očvršćivanja, čija je konačna temperatura određena maksimalnom temperaturom uporabe dijela.

Kondenzacijski poliimidni kompoziti upotrebljavaju se za vrlo zahtjevne primjene koje uključuju rad pri visokim temperaturama. Primjeri primjene su dijelovi motora za avionske i svemirske letjelice.

b) Smole kod kojih polimeriziraju monomerni reaktanti

Ove smole sadrže monomerne reaktante koji su topivi u lako uklonjivim otapalima s niskom točkom tališta, kao što su etanol i metanol. To rezultira lakšom proizvodnjom kompozita u odnosu na proizvodnju kompozita s kondenzacijskim poliimidima. Otopina monomera služi za impregnaciju ojačala. Dobiveni preprezi se oblikuju u željenu geometriju, a zatim slijedi očvršćivanje. Proizvodnja preprega odvija se u nekoliko koraka. U prvom koraku se otapalo (alkohol) uklanja pri relativno niskoj temperaturi (50 – 120 ° C). Tijekom očvršćivanja reagiraju monomeri i počinje imidizacija pri 205 ° C. Konačne reakcije umrežavanja u smoli odvijaju se pri visokim temperaturama (275 – 350 °C). To je adicijska reakcija bez razvijanja lako hlapivih produkata, što omogućava lakšu proizvodnju. Obično se provodi naknadno očvršćivanje. Maksimalna temperatura očvršćivanja i naknadnog očvršćivanja je 325 ° C, što je i maksimalna temperatura uporabe kompozita s ovakvom matricom. Oni zadržavaju svojstva i nakon više od 1000 sati izloženosti toj temperaturi. Primjena im je ista kao i kondenzacijskim kompozitima.

c) Bismaleimidne (BMI) smole

Bismaleimid kao osnovna komponenta nastaje reakcijom diamina (aromatski ili alifatski) s maleinskim anhidridom, a može se koristiti sam ili s drugim bismaleimidima i diaminima, kako bi nastala konačna smola. Očvršćivanje takve smole ovisi o njenom sastavu. Ako su korišteni amini, očvršćivanje se odvija u dva koraka. Prvi je adicijska reakcija diamina na mjestu dvostruke veze, a drugi polimerizacija pomoću slobodnih radikala. Ako u reakciji ne sudjeluju diamini, očvršćivanje se odvija samo preko slobodnih radikala.

BMI monomeri mogu tvoriti otopine za impregnaciju vlakana, ili im se mogu dodati reaktivna otapala, slično kao i za nezasićene poliesterske smole. Početna forma za proizvodnju kompozita može biti prepreg ili produkt kalupljenja, što

utječe i na očvršćivanje. Tako temperatura očvršćivanja, ovisno o tom obliku, varira od 175 ° C do oko 290 ° C. Često se koristi i naknadno očvršćivanje. Općenito BMI nisu toliko toplinski stabilni kao prethodne dvije skupine poliimidnih smola, ali su ipak puno toplinski stabilniji od epoksidnih smola. Kompoziti s BMI matricom imaju sličnu proizvodnju i mehanička svojstva pri sobnoj temperaturi kao i epoksidni kompoziti, uz istovremenu bolju otpornost na povišene temperature i vlagu.

Upotrebljavaju se u avionskoj industriji za krila i trupove aviona, ali i za mnoge druge primjene.

III. OJAČALA U SUVREMENIM KOMPOZITIMA

1. Staklena vlakna

Poliesterska smola ojačana staklenim vlaknima bila je prvi upotrebljavani suvremeni kompozit, koji je imao superiorna svojstva u odnosu na tradicionalne materijale. Danas je staklo još uvijek ojačalo koje se najviše upotrebljava u suvremenim kompozitima.

U kompozitnoj industriji značajne su dvije vrste staklenih vlakana, kontinuirana i diskontinuirana. Njihova proizvodnja započinje s dovođenjem rastaljenog stakla u peć za izvlačenje vlakana, gdje prolazi kroz nekoliko otvora kako bi sa formirala pojedinačna vlakna. Ako se radi o kontinuiranim vlaknima, onda se ona nakon ovakvog ekstrudiranja sakupe zajedno, ohlade i najčešće prevuku sa zaštitnim vezivom, te se daljnjim koracima proizvodnje dobiva željeni proizvod (npr. roving). Diskontinuirana vlakna se proizvode prolaskom kontinuiranih vlakana kroz uređaj za rezanje kako bi se dobila kratka vlakna željene dužine. Variranjem otvora u peći za vučenje i uvjeta vučenja mogu se proizvesti vlakna različitih promjera.

Glavni kemijski sastojak stakla je SiO_2 , uz dodatke drugih oksida. Razlikujemo tri važna tipa staklenih ojačala, E-staklo, S-staklo i kvarc. E-staklo (aluminoborosilikat) čini najveći dio proizvodnje staklenih vlakana. S-staklo (magnezijev aluminoborosilikat) ima veću vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti i uporabnu temperaturu od E-stakla, a njegov je razvoj proizašao iz zahtjeva avionske i svemirske tehnike. Otpornije je na djelovanje jakih kiselina, a sukladni tome i manje otporno na djelovanje jakih lužina. Strukturna kvarcna vlakna koriste se u područjima elektrotehnike i visokih temperatura, a cijena im je oko sto puta viša od E-stakla.

Glavne karakteristike staklenih vlakana su niska cijena, odlična električna svojstva (niska vodljivost), dobra kemijska postojanost i otpornost na vlagu, visoka čvrstoća, ali niska krutost, te dobra otpornost na povišene temperature. Dostupna su u različitim oblicima, npr. mat, roving, itd. Svi oblici mogu se kombinirati s raznim smolama.

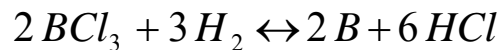
Staklenim vlaknima ojačani kompoziti koriste se u automobilskoj i avionskoj industriji, za boce pod tlakom, spremnike, sportsku opremu, cijevi, kućišta, itd.

2. Borova vlakna

Poput staklenih, i borova vlakna posjeduju visoku specifičnu čvrstoću, ali također i visoki specifični modul elastičnosti, što kod staklenih vlakana nije slučaj. Kompozitni materijali sa staklenim ojačanjem imaju mnoge prednosti nad klasičnim materijalima u avionskoj industriji, ali to se prvenstveno odnosi na nekritično opterećene strukture, jer takvi kompoziti nemaju visoku krutost potrebnu za kritično opterećene konstrukcije, kao što su npr. krila. Zato se za

takve konstrukcije koriste kompoziti sa borovim vlaknima, koji imaju visoku krutost.

Borova vlakna proizvode se CVD postupkom, odnosno prevlačenjem volframovog supstrata borom, u procesu koji se izvodi kontinuirano u reaktoru. Volframovo vlakno promjera oko 0,01 mm se zagrijava uz pomoć električnog otpora, u prisutnosti reaktivnih plinova (borovog triklorida i hidrogena) kako bi se odvila slijedeća reakcija:



Elementarni bor koji pritom nastaje taloži se na zagrijani volframov supstrat.

Borova vlakna se proizvode u tri promjera – 0.1 mm, 0.15 mm i 0.2 mm. Najčešće se koristi vlakno promjera 0.1 mm. Tijekom proizvodnje vlakana mogu se pojaviti greške koje onda utječu na povišenje naprezanja u vlaknima, što negativno utječe na mehanička svojstva. Zato je nužno kontrolirati te greške tijekom proizvodnje kako bi se osigurala visoka kvaliteta vlakana.

Borova vlakna otporna su na vlažnu i korozivnu atmosferu, a uz to posjeduju i odlična svojstva na povišenim temperaturama. Dostupna su samo u kontinuiranom obliku, a kompoziti se dobivaju pomoću tehnologije preprenske trake (borova vlakna se prevode u kontinuirane borove trake, predimpregnirane najčešće sa epoksidnom smolom).

Osim u avionskoj industriji primjenu nalaze i u izradi sportske opreme (oprema za golf, teniski reketi, ribički štapovi). Mogu se kombinirati i s drugim vlaknima, npr. ugljičnim, čime se dobivaju hibridni kompoziti koji koriste jedinstvene prednosti borovih vlakana.

3. Ugljična vlakna

Ugljična vlakna predstavljaju nadmoćno ojačanje u današnjim suvremenim kompozitima. Posjeduju visoka specifična svojstva kao i borova vlakna, ali su istovremeno jeftinija i jednostavnija za rukovanje. Lagana su, imaju visoku čvrstoću i modul elastičnosti. Proizvode se ili iz organskih vlakana ili iz smole, uz pomoć pirolize. Ranije su se koristila rayon organska vlakna koja su poslije zamijenjena sa poliakrilonitrilnim (PAN). Proces pretvorbe PAN vlakana u grafitna sastoji se od slijedećih koraka:

- priprema PAN vlakna; vlakna se rastežu radi orijentiranja strukture i poboljšanja mehaničkih svojstava,
- stabilizacija; PAN se stabilizira da ne bi došlo do omekšavanja polimera tijekom narednih procesa u kojima se koristi povišena temperatura, a odvija se u oksidirajućoj atmosferi,
- karbonizacija; stabilizirani PAN se pirolizira u ugljična vlakna, što se izvodi u inertnoj atmosferi, pri 1000 – 1500 ° C,

- grafitizacija na 2500 – 3000 ° C; postižu se veći sadržaj ugljika i izrazitije grafitna mikrostruktura nego u prethodnom koraku.

Ako se vlakna rade iz smole, koraci su:

- pretvorba smole u međufaznu smolu; smola je aromatski nusprodukt destilacije petroleja, visoke molekulne mase. Ona se zagrijava u inertnoj atmosferi, tijekom čega dolazi do transformacije amorfne smole u visoko uređeno, tekuće kristalno stanje-međufaznu smolu,
- prevođenje međufazne smole u vlakna; tekuća kristalna smola se ekstrudira kroz matricu kako bi se proizvela vlakna,
- stabilizacija, karbonizacija i grafitizacija; slični procesi kao i za PAN.

Kristal grafita se sastoji od planarnih slojeva ugljikovih atoma složenih jedni na druge. Unutar slojeva su ugljikovi atomi povezani jakim kovalentnim vezama. Ovi slojevi su orijentirani u smjeru osi vlakna, kao rezultat proizvodnje vlakna. Mijenjanjem orijentacije mijenjaju se i svojstva vlakana, pogotovo modul elastičnosti. Završni korak je površinska obrada u kojoj se vlakna najčešće podvrgavaju površinskoj oksidaciji uporabom tekućih oksidacijskih agensa, kao što je otopina dušične kiseline. Taj postupak rezultira povećanom adhezijom smole na vlakna, što pozitivno utječe na svojstva kompozita. Često se koriste i organske prevlake kao zaštita za vlakna, a koje ujedno i poboljšavaju kvašenje vlakana smolom.

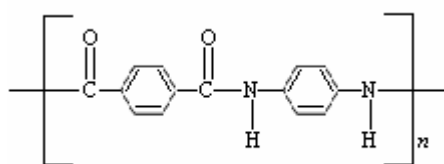
Ugljična vlakna su dostupna u raznim oblicima koji se mogu kombinirati s raznim smolama, pri čemu se dobivaju proizvodi različitih oblika, od kojih je najčešća preprežna traka.

Kompoziti s ugljičnim vlaknima posjeduju odličnu otpornost na umor (bolju od aluminijskog i čelika) i puzanje, a dodatna zanimljivost je i to da se može postići takva struktura da im je koeficijent toplinske istezljivosti gotovo nula. Prigušenje vibracija im je puno bolje nego kod aluminijskog i čelika.

Visoka vlačna čvrstoća, modul elastičnosti, te niska gustoća vlakana razlog su visoke specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti kompozita s takvim vlaknima, pa se oni koriste za zahtjevne avionske konstrukcije (krila, trupovi, svemirske letjelice, projektili). Upotrebljavaju se još i za sportsku opremu, opremu za upravljanje materijalima, medicinske naprave, itd.

4. Aramidna vlakna

Aramidna vlakna su organska vlakna koja posjeduju visoku vlačnu čvrstoću i krutost, kao rezultat visoko uređenih polimernih molekula. Uz to posjeduju i relativno nisku gustoću, dakle i visoka specifična svojstva. Primjer su vlakna trgovačkog naziva Kevlar (aromatski poliamid, p-fenilen-tereftalamid), proizvođača du Ponta, čija je kemijska formula:



Ona često zbog svojeg visokog specifičnog modula i jednostavnosti za rukovanje zamjenjuju staklena vlakna u brojnim primjenama, ali nisu zadovoljavajuća zamjena za ugljična vlakna u zahtjevnim primjenama poput primarnih avionskih konstrukcija. Razlog tome je njihova niska tlačna čvrstoća. Imaju visoku žilavost, a kombiniranjem sa ugljičnim vlaknima nastaju hibridni kompoziti otporniji na oštećenje.

Aramidna vlakna proizvode se postupkom ekstruzije. Polimer, koji je otopljen u jakoj kiselini, kao što je koncentrirana sumporna, ekstrudira se u hladnu vodu, temeljito ispiru i suši. Postupci proizvodnje vlakana uzrokuju orijentiranje molekula u aksijalnom smjeru vlakna. U tom su smjeru polimerni lanci međusobno povezani jakim kovalentnim vezama, dok su u transverzalnom smjeru povezani vodikovim vezama. Zato je vlakno anizotropno, tj. ima visoku aksijalnu čvrstoću i, u usporedbi s njom, nisku poprečnu čvrstoću.

Aramidna vlakna dobro zadržavaju svojstva i pri povišenim temperaturama, imaju dobru kemijsku postojanost i otpornost na umor. Jedno od vlakana ovog tipa je Kevlar 49. Njegova svojstva zaslužna su za visoku specifičnu vlačnu čvrstoću i specifični vlačni modul njegovih kompozita. Kompoziti sačinjeni od Kevlar 49 vlakana i epoksidne smole pokazuju i odličnu otpornost umoru, usporedivu sa otpornošću kompozita borova vlakna/epoksidna smola, a bolju od kompozita staklena vlakna/epoksidna smola.

Kompoziti s aramidnim vlaknima koriste se za izradu posuda pod tlakom, u avionskoj i automobilskoj industriji, za zaštitna odijela, gume, itd. Također se koriste i u hibridnim kompozitima koji postižu optimalnu ravnotežu svojstava.

Ostala važnija vlakna su:

5. Vlakna od α -glinice

Više od 99 % sastava ovih vlakana čini α -glinica. Pogodna su za ojačanje matrica od organskih smola, metala i keramike. Od njihovih svojstava značajnija su odlična kemijska postojanost, vrlo visok modul elastičnosti, dobra električna izolacija i vrlo visoka temperaturna stabilnost.

6. Kontinuirana keramička vlakna

Kontinuirana keramička vlakna (polikristalični metalni oksidi) koriste se za ojačanje raznih materijala. Posjeduju visoku temperaturnu stabilnost, vrlo dobru električnu i toplinsku izolaciju i odličnu otpornost na abraziju.

IV. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH MATERIJALA

Ispočetka su se kompoziti proizvodili isključivo ručno, stavljanjem ojačanja u kalup, a zatim dodavanjem smole. No od tada se njihova proizvodnja razvila u industriju visoke tehnologije. Danas postoje razni strojevi koji se koriste za proizvodnju kompozita, a njihovi proizvodi mogu se pronaći u gotovo svakoj industriji i aktivnosti, uključujući sport i rekreaciju, električne komponente, namještaj, materijale za građevinarstvo, za cijevi i tankove, prijevoz, aeronautiku, svemirsku tehniku, itd.

Najbolja postiziva svojstva moguće je dobiti samo uz odgovarajući raspored vlakana u matrici. Kontinuirana vlakna najčešće se raspoređuju jednosmjerno (npr. trake), ortogonalno (npr. tkanine) i namotavanjem, dok se diskontinuirana vlakna mogu orijentirati slučajno ili na željeni način. U ovoj će točki biti iznesen kratak opis važnijih tehnika proizvodnje.

1. Proizvodnja preprega

Prepezima nazivamo ojačanja u obliku kontinuiranih vlakana, predimpregnirana s djelomično otvrdnutom polimernim smolom. Postupak kojim se dobivaju preprezi odvija se u nekoliko koraka. Prvi je odmatanje strukova vlakana s kalemova i njihovo slaganje u "sendvič", koji se u svrhu oblikovanja podvrgava postupku kalandriranja. Impregnacija vlakana omogućena je nanesenim slojem otopine niskoviskozne smole na papir koji oblaže sendvič. Nakon kalandriranja slijedi nanošenje jednolikog sloja smole, čime nastaje konačni proizvod – traka, debljine od 0.08 do 0.25 mm i širine od 25 do 1525 mm, sačinjena od usmjerenih vlakana u djelomično otvrdnutoj smoli. Kod natapanja slojeva tkanine matricom bitno je da matrica ne polimerizira. Budući da duromerna matrica otvrdnjava i pri sobnoj temperaturi, preprezi se skladište na temperaturi nižoj ili jednakoj 0 ° C. Rok uporabe duromernih preprega iznosi najmanje 6 mjeseci.

Preprežne trake dostavljaju se prerađivačima koji ih oblikuju u čvrte kompozite, odnosno konstrukcijske dijelove. Nosivi papir se odstranjuje, a slojevi preprega se slažu u kalup (jednosmjerno, poprečno ili pod kutem). Uz istodobnu primjenu zagrijavanja i prešanja odvija se očvršćivanje. Polaganje i izrezivanje trake mogu se izvesti ručno ili strojno. Strojni postupci reduciraju troškove proizvodnje.

2. Namotavanje

U ovom se postupku vlakna (u obliku individualnih snopova užadi) prvo provode kroz kupku smole, a zatim uz pomoć automatizirane opreme kontinuirano namataju na cilindrični model koji rotira, tako da oblikuju šuplji oblik. Na taj se način nanosi niz slojeva, a moguće je namatati razne oblike

(prstenasti, spiralni, polarni, itd.) radi postizanja zahtijevanih mehaničkih svojstava. Nanešeni slojevi očvršćuju u peći ili pri sobnoj temperaturi, nakon čega se uklanja model.

Ovaj postupak omogućuje visoki omjer čvrstoća/gustoća, uz dobru kontrolu orijentiranja. Postupak je ekonomičan, pa se brzo razvija, a upotrebljava se za oplata raketnih motora, spremnike, cijevi, posude pod tlakom, itd.

3. Lijevanje

U ovom se postupku smola u obliku kapljevine unosi među vlakna i raspoređuje oko njih. To se postiže kapilarnim djelovanjem, vakuumskom infiltracijom ili tlačnim lijevanjem.

4. Trake

Ovaj postupak osniva se na kvašenju raspoređenih pojedinačnih vlakana polimernom smolom, čime nastaju trake koje se mogu spajati ako želimo dobiti veću širinu, ili slagati jedna na drugu da se dobije veća debljina.

5. Pultrudiranje

Postupak pultrudiranja koristi roving, tj. slobodna kontinuirana vlakna, izvlačena zajedno u paralelnim snopovima. Taj roving se impregnira duromernom smolom i provlači kroz čelični alat za predoblikovanje, a nakon toga kroz zagrijani alat za očvršćivanje, gdje se odvija konačno oblikovanje. Izvlačenje kroz te alate izvodi se uz pomoć uređaja za izvlačenje-izvlačila. Najčešće matrice su poliesterske, vinil esterske i epoksidne smole, a najčešća vlakna su staklena, ugljična i aramidna.

Pultrudiranjem se proizvode proizvodi konstantnog poprečnog presjeka, npr. cijevi, grede, štapovi i šuplji elementi.

Ovaj postupak ima visoku proizvodnost i ekonomičnost.

6. Deformiranje i difuzijsko povezivanje

Deformiranje se koristi za spajanje slojeva traka, a razlikujemo dva postupka: vruće prešanje i valjanje. Trake složene jedna na drugu povezuju se uz pomoć povišene temperature i tlaka. Difuzijsko povezivanje koristi se i za spajanje traka vlakana i za uvođenje matrice među vlakna difuzijom atoma matrice, čime se popunjavaju šupljine na graničnim ploham a nastaje zbijen kompozit.

V. EKSPERIMENTALNI DIO

1. Izrada kompozitnog materijala

U svrhu provođenja ovog zadatka izrađen je kompozitni materijal koji spada u skupinu slojevitih kompozitnih materijala, odnosno laminata, čija je matrica nezasićena poliesterska smola, a ojačalo mat staklena vlakna.

Općenito, laminati nastaju slaganjem i međusobnim povezivanjem dvodimenzionalnih slojeva, u cilju povišene otpornosti prema agresivnim medijima, postizanja povišene čvrstoće, otpornosti na trošenje, itd. Imaju relativno visoku čvrstoću u raznim smjerovima ravnine, ali je čvrstoća u određenom smjeru manja nego što bi bila da su sva vlakna orijentirana u tom smjeru.

Kompozit je izrađen ručnim postupkom. U tekuću smolu (NORSODYNE S 25413TA) dodano je 0.5 % ubrzavala, koje sadrži 6 % kobalta, i 1 % katalizatora (katalizacijski sustav MEKP 50). Stakleni kalup premazan je s nekoliko slojeva voska za odjeljivanje (NORPOL WAX W-70). Zatim slijedi nanošenje prvog sloja odabrane smole, na koju se onda nanosi i prva tkanina staklenih vlakna, izrezana prema dimenzijama kalupa. Postupak se ponovi još nekoliko puta, s time da je završni (gornji) sloj smola. Ukupno je naslagano sedam slojeva staklenih vlakana. Mehanička svojstva odabrane smole u otvrdnutom stanju dana su u slijedećoj tablici.

Gustoća pri 20°C	1.21 g/cm ³
Vlačna čvrstoća	80 MPa
Konačno istežanje	1.9 %
Savojna čvrstoća	110 MPa
Savojni modul	3900 MPa
Volumno skupljanje	7.5 %

Tablica 1. Mehanička svojstva smole u otvrdnutom stanju

Dobiveni materijal sušio se nekoliko dana. Odrezan je mali komadić koji je zatim pripreman za mikroskopiranje.

2. Priprema izbruska za mikroskopiranje

Priprema se provodi na slijedeći način: Smjesa za zalijevanje ispitnog tijela priprema se uz pomoć praška DuroFix-2 i tekućine CitoFix. Prije odlaganja ispitka u čašicu za zalijevanje potrebno ga je odmastiti. Koristi se omjer volumena praška i tekućine 2 : 1. Smjesu se pažljivo miješa jednu minutu, a zatim pusti da odstoji 30 sekundi kako bi se izbjeglo nastajanje mjehurića zraka. Smjesa se pažljivo prelije preko ispitka i ostavi da smola otvrdne. Vrijeme otvrdnuća je oko 10 minuta, a maksimalna temperatura tijekom otvrdnuća 85 – 100 ° C. Uzorak je prije mikroskopiranja potrebno pažljivo izbrusiti. Podatci o tom postupku preuzeti su s Internet stranice www.struers.com, specijalno za nezasićenu poliestersku smolu. Brušenje je provedeno na uređaju za poliranje LaboPol, prema slijedećim podacima:

Brušenje broj	1	2	3
Brusna površina	SiC-papir #500	SiC-papir #1200	SiC-papir #2400
Lubrikant	Voda	Voda	Voda
Brzina [o/min]	300	300	300
Sila [N]	120	120	120
Vrijeme [min]	1	1	1

Tablica 2. Preporučeno brušenje za ispitno tijelo od nezasićene poliesterske smole

Struers preporučuje i poliranje, koje bi trebalo izvesti prema podacima prikazanim u slijedećoj tablici.

Poliranje broj	1	2	3
Polirna površina	MD-Mol	MD-Nap	MD-Chem
Tip abraziva	DiaPro Mol	DiaPro Nap R	OP-S, 0.04 μm
Brzina [o/min]	150	150	150
Sila [N]	180	120	60
Vrijeme [min]	3	2	1

Tablica 3. Preporučeno poliranje za ispitno tijelo od nezasićene poliesterske smole

U sklopu ovog rada poliranje nije provedeno.

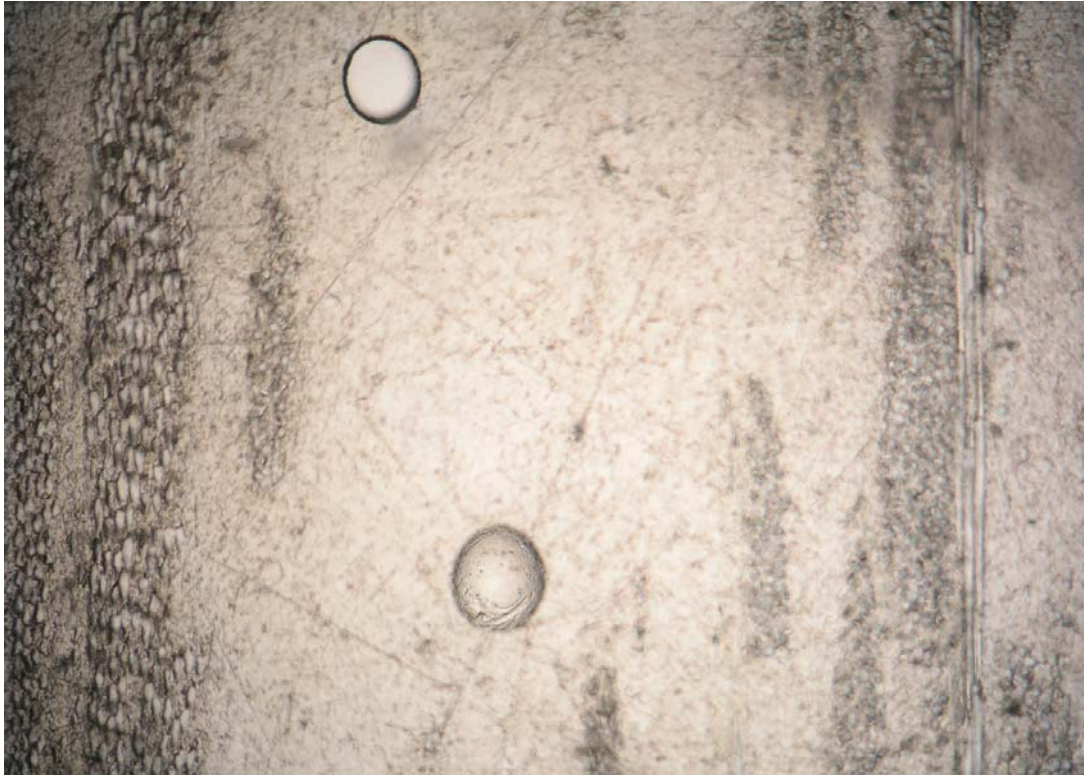
Nakon strojnog brušenja, uzorak se uz pomoć dvostruke ljepljive trake pričvrsti na posebni držač i dalje se brusi ručno, sve dok ne dosegne debljinu od svega nekoliko mikrometara. Takav izbrusak može se promatrati pod optičkim mikroskopom, uz polariziranu svjetlost.

3. Određivanje sadržaja šupljina primjenom optičkog mikroskopa

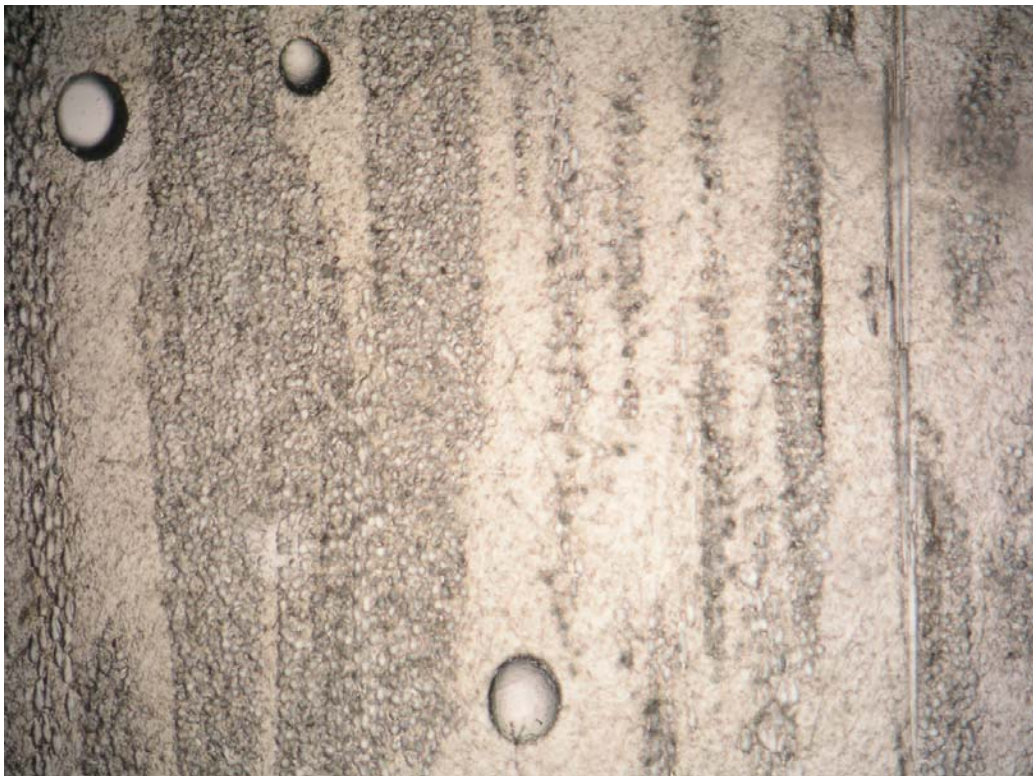
U svrhu određivanja sadržaja šupljina pomoću optičkog mikroskopa potrebno je napraviti nekoliko snimaka mikrostrukture izbruska pomoću optičkog mikroskopa, uz polarizirano svjetlo. Pritom je bitno voditi računa o tome da snimke budu uzete sa tako razmještenih položaja, koji će dobro reprezentirati cjelokupno ispitno tijelo. U sklopu postupka napravljene su slijedeće snimke mikrostrukture, uz povećanje od 100 puta:



Slika 1. Mikrostruktura laminata od nezasićene poliesterske smole i staklenih vlakana, snimak 1



Slika 2. Mikrostruktura laminata od nezasićene poliesterske smole i staklenih vlakana, snimak 2



Slika 3. Mikrostruktura laminata od nezasićene poliesterske smole i staklenih vlakana, snimak 3



Slika 4. Mikrostruktura laminata od nezasićene poliesterske smole i staklenih vlakana, snimak 4



Slika 5. Mikrostruktura laminata od nezasićene poliesterske smole i staklenih vlakana, snimak 5

Za određivanje sadržaja šupljina pogodan je kompjuterski program za analizu slike, ImageJ. Za potrebe analize slike, dobivene snimke prevode se u 8-bitni format. Na svakoj se označavaju šupljine, a zatim se uz pomoć naredbe za analizu čestica na svakoj slici određuje udio šupljina. Nakon obrade svake pojedine snimke, dobiveni su rezultati prikazani u slijedećoj tablici.

Broj snimke	Udio šupljina, %
1	0
2	1.423
3	1.437
4	2.680
5	5.681
	Aritm.sred. = 2.244

Tablica 4. Udio šupljina dobiven analizom slike

Na temelju dobivenih rezultata računa se prosječni udio šupljina, koji u ovom slučaju iznosi 2.244 %. Kompozitni materijal s ovolikim udjelom šupljina smatra se još uvijek zadovoljavajućim. Rezultat dobiven ovom metodom potrebno je usporediti s rezultatom dobivenim računskim putem.

4. Određivanje sadržaja šupljina primjenom računске metode

Kompozitni materijal, čija je izrada opisana ranije, izreže se u pet komadića, od kojih će se svakom određivati udio šupljina, prema formuli:

$$V_c = 100 \cdot \left[1 - \frac{\rho_c}{W_c} \left(\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_c - w_f}{\rho_m} \right) \right], \% \quad (1)$$

Pritom je: w_c – masa kompozita, ρ_c – gustoća kompozita, w_f – masa vlakana, ρ_f – gustoća vlakana i ρ_m – gustoća polimerne matrice.

Prvi je korak određivanje mase komadića kompozita, staklenih vlakana i prethodno izrezanih komadića čiste smole. Masu kompozita i smole određujemo vaganjem na analitičkoj vazi, uz pomoć lončića poznate mase. Zatim im određujemo gustoću pomoću Mohr-Westphalove vage (ASTM D792, B). Dobiveni su slijedeći rezultati:

Broj ispitnog tijela	Masa kompozita, g	Gustoća kompozita, g/cm ³
1	3.8127	1.4133
2	3.7176	1.4057
3	3.6887	1.4081
4	3.7179	1.4191
5	3.5878	1.3978
		Aritm.sred.= 1.4088

Tablica 5. Masa i gustoća kompozita

Broj ispitnog tijela	Masa smole, g	Gustoća smole, g/cm ³
1	2.0027	1.2118
2	1.7812	1.2148
3	1.4631	1.2141
4	1.8030	1.2141
5	1.5814	1.2133
		Aritm.sred.= 1.2136

Tablica 6. Masa i gustoća smole

Masu, maseni udio i gustoću staklenog ojačala moguće je odrediti tek nakon potpunog sagorijevanja matrice pri 600 ° C, u trajanju od 4 sata. Kad se postupak provede, staklena vlakna, koja ostaju nakon sagorijevanja, važu se

pomoću analitičke vage, u već spomenutim lončićima poznate mase. Dijeljenjem dobivenih rezultata s masom pripadajućih komadića kompozitnog materijala, dobiva se maseni udio staklenog ojačala u kompozitu. Zadnji korak je određivanje gustoće vlakana pomoću Mohr-Westphalove vage. Rezultati su sljedeći:

Broj ispitnog tijela	Masa ojačala, g	Gustoća ojačala, g/cm ³	Maseni udio ojačala, %
1	1.1273	2.4385	29.57
2	1.0937	2.5045	29.42
3	1.0893	2.4517	29.53
4	1.1231	2.4252	30.21
5	1.0506	2.4570	29.28
		Aritm.sred.= 2.4554	Aritm.sred.= 29.60

Tablica 7. Masa, gustoća i maseni udio ojačala

Na osnovu svih određivanih podataka računa se udio šupljina računskom metodom. Gustoće vlakana i smole unose se u izraz (1) u obliku srednje vrijednosti. Slijedeća tablica prikazuje na jednom mjestu sve vrijednosti koje su potrebne za računanje udjela šupljina za svaki pojedini uzorak, kao i rezultate dobivene pomoću izraza (1).

Uzorak	$\rho(\text{kompozit}),$ g/cm ³	$\rho(\text{vlakno}),$ g/cm ³	$\rho(\text{smola}),$ g/cm ³	m(kompozit), g	m(vlakno), g	Vc, %
1	1.4133	2.4554	1.2136	3.8127	1.1273	0.98
2	1.4057	2.4554	1.2136	3.7176	1.0937	3.42
3	1.4081	2.4554	1.2136	3.6887	1.0893	3.86
4	1.4191	2.4554	1.2136	3.7179	1.1231	2.50
5	1.3978	2.4554	1.2136	3.5878	1.0506	6.72
						3.50

Tablica 8. Udio šupljina dobiven računskom metodom

Postoji određena razlika između rezultata dobivenih primjenom optičkog mikroskopa i onih dobivenih računskim postupkom. Računski postupak daje veću točnost, pa se može zaključiti da je u kompozitnom materijalu s udjelom staklenih vlakana u iznosu od 29.60 %, izrađenom u sklopu ovog zadatka, udio šupljina oko 3.50 %

5. Utjecaj šupljina na mehanička svojstva polimernih kompozita

U procesu nastajanja svakog kompozita dolazi do stvaranja šupljina, koje negativno utječu na mehanička svojstva, tj. međuslojnu čvrstoću, uzdužnu i poprečnu čvrstoću i module, te otpornost na zamor. Od svih ovih svojstava ipak najviše utječu na međuslojnu čvrstoću. U sklopu ovog podatka potrebno je definirati međusloj i međupovršinu, čimbenike s vrlo velikim utjecajem na svojstva kompozita, tj. na tlačnu čvrstoću i trajnost materijala. Oni nastaju međudjelovanjem (adhezijom) između matrice i ojačala, između kojih nastaju veze, i to u jednoj ravnini (čime nastaje međupovršina) ili se veze protežu i u matricu (nastaje međusloj). U tim su područjima svojstva matrice i ojačala promijenjena. Što je jača međupovršina ili međusloj, to su kompoziti čvršći i krući, ali također i krhkiji. Porast udjela šupljina ima negativan utjecaj na međuslojnu čvrstoću jer se u njima, zbog nedostatka veze matrica-vlakno, ne prenose naprezanja.

Postoje dva bitna uzroka za nastajanje šupljina. Jedan od njih su mjehurići zraka koji u početnoj fazi izrade kompozita ostaju zarobljeni u materijalu. Drugi razlog je oslobađanje lako hlapivih produkata tijekom očvrnuća kompozita pri visokim temperaturama.

Mehanička svojstva kompozitnog materijala, izrađenog u sklopu ovog rada, nisu određivana, ali mogu se dobro opisati pomoću rezultata pokusa opisanog u literaturi [3]. U tom pokusu ručno su izrađena dva laminata sa istom matricom, ali različitim ojačanjem, na slijedeći način:

- matrica: nezasićena poliesterska smola na bazi ortoftalne kiseline tip Colpoly (Color, Medvode, Slovenija), umreživana 28 minuta pri 20 °C sa stirenom uz maseni udjel 1.5 % katalizatora MEK P 50, te kondicionirana 16 sati pri 40 °C
- ojačanje 1: Mat ES 33, 450 gm⁻² (Skloplast, Trnava, Slovačka); maseni udio ojačanja u kompozitu je 34.13 %
- ojačanje 2: Mat ES 33, 450 gm⁻² + Roving 600 gm⁻² (Keltex d.o.o., Duga Resa); maseni udio ojačanja u kompozitu je 44.72 %

Za oba kompozita određivana su mehanička svojstva: R_{ms} (savojna čvrstoća), E_s (savojni modul elastičnosti) i τ (međuslojna čvrstoća), i to prije i nakon izlaganja djelovanju destilirane vode pri 50 °C, u trajanju od 28 dana. Također im je promatrana struktura pomoću optičkog mikroskopa uz polariziranu svjetlost i određivan udio šupljina prema ranije opisanoj računskoj metodi. Dobiveni su slijedeći rezultati:

Prije izlaganja vodi				Nakon izlaganja vodi (28 dana pri 50 °C)		
Svojstvo	R_{ms} , N/mm ²	E_s , N/mm ²	τ , N/mm ²	R_{ms} , N/mm ²	E_s , N/mm ²	τ , N/mm ²
Kompozit 1	196	3571	18	165	3451	16
Kompozit 2	302	4361	27	240	3583	22

Tablica 9. Savojna čvrstoća R_{ms} , modul elastičnosti E_s i međuslojna čvrstoća τ ispitivanih kompozita [3]

Udio šupljina, %	
Kompozit 1	Kompozit 2
1.92	2.05
1.75	1.85
1.91	1.69
2.18	1.49
1.80	1.52
$V_c = 1.9$	$V_c = 1.72$

Tablica 10. Udio šupljina (%) za kompozit 1 i 2 [3]

Također je mjerena i apsorpcija vode uz pomoć analitičke vage na kojoj su određivane promjene mase. Kako apsorpcija vode ovisi o količini šupljina, tako kompozit 1, koji ima veći sadržaj šupljina, apsorbira i više vode. Osim toga ima i niže vrijednosti mehaničkih svojstava.

Budući da je kompozit izrađen u svrhu ovog zadatka vrlo sličan kompozitu 1, može se zaključiti da bi se njegova mehanička svojstva u danim uvjetima ispitivanja mijenjala na sličan način. No, dakako, zbog većeg udjela šupljina (3.50 %) početne vrijednosti mehaničkih svojstava bile bi nešto niže, a pad mehaničkih svojstava bio bi još izraženiji jer djelovanje medija povećava negativan utjecaj šupljina na mehanička svojstva kompozita. To djelovanje je suprotno jedino u početnim fazama apsorpcije vode, u kojima apsorbirana voda zbog "efekta iscjeljivanja" (smanjenje naprezanja u kompozitu pod utjecajem vode) povećava čvrstoću, dok se veći modul elastičnosti tumači plastificirajućim djelovanjem vode.

VI. LITERATURA

[1] Margolis J. M: Advanced thermoset composites, Industrial and Commercial Applications, Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1986.

[2] Filetin T, Kovačiček F, Indof J: Svojstva i Primjena Materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[3] Španiček Đ, Smolčić Žerdik Z, Husić Š: Odnos apsorpcije vode, udjela šupljina i međuslojne čvrstoće polimernih kompozita; Polimeri, 1998, br. 19, str. 190-193.

[4] Španiček Đ, Smolčić Žerdik Z: Istraživanje utjecaja apsorpcije vode na svojstva polimernih kompozita, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.