



Literaturniot pregled pretstavuva osvrt na literaturnite referenci od ponov i postar datum, koi davaat pridones vo tolkuvawe i razre{uvawe na odredeni aspekti vo oblata na kompozitite so jaglerodni vlakna, preku prou~uvawe na faktorite koi vlijaat vrz krajnite osobini. Bidej}}i kompozitite so jaglerodni vlakna naj~esto se upotrebuvaat za izrabotka na odgovorni sklopovi nameneti za raketnata, avionskata, voenata industrija i drugi specijalni celi, vo nau~no- stru~nata literatura se referiraat samo generalni podatoci.

Konceptot za kriti~na dol`ina na vlaknata kaj kompozitite zajaknati so kratki vlakna go istra`uvale **Kelly i Tyson [36]**. Tie go opredeluvale vlijaniето na dol`inata na vlaknata vrz mehani~kite svojstva na kompozitite zajaknati so kratki vlakna. Kriti~nata dol`ina ja definirale kako minimalna dol`ina na vlaknata koja obezbeduva maksimalni ja~ini kaj kompozitite. Tie zaklu~ile deka pri dol`ina na vlaknata pomala od kriti~nata se namaluva efektot na zajaknuvawe, dodeka pri pogolema dol`ina od kriti~nata, svojstvata na kompozitot postepeno se pribli`uvaat do svojstvata na onie so kontinuirani vlakna.

B.Wielage, A.G.Odeshi, H.Mucha [25] gi ispituvale zajaknatite plastici so jaglerodni vlakna i fenolna smola. Cel na nivnata studija bilo otkrivawe na vlijaniето na sistematski modificiranite po~etni surovini i potoa vlijaniето na razli~nite uslovi na procesirawe vrz mehani~kite svojstva i strukturnata morfologija na krajnite kompoziti. Tie zaklu~ile deka na strukturata i svojstvata na krajnite kompoziti zna~ajno vlijaat karakteristikite na dodadenata smola kako {to se so dr`ina na sloboden fenol, so dr`ina na suva materija i rastvoruva~. Za da se postigne visoka ja~ina na kompozitite, zaklu~ile deka optimalna temperatura na vmre`uvawe e 150°C. So porast na so dr`inata na jaglerod od 40% do 48% vo kompozitot, zabele`ale deka ja~inata na

istegnuvawe se zgolemuva nad 38%. Isto taka zabele`ale deka na svojstvata na termi~ka ekspanzija i mehani~kite svojstva vlijae i orientiranosta na jaglerodnite vlakna.

S. Varghese, P. Yadav, S.K. Nema [37] gi ispituvale termi~kite svojstva na kompozitite so jaglerodni vlakna i fenol-epoksidna smola. Zajaknatite kompoziti so jaglerodni vlakna i fenol-epoksidna matrica se neodamna otkrieni. Za ostvaruvawe na celta vo ova studija bile pripremeni kompoziti vrz baza na fenol-epoksidna matrica zajaknata so jaglerodni vlakna i toa so razli~en odnos na fenolna i epoksidna smola. Bila menuvana sodr`inata na epoksidna smola vo odnos na sto te`inski delovi fenolna smola. Se sporeduvani termi~kite svojstva na matricite i nivnite kompoziti zajaknati so jaglerodni vlakna. Bila sprovedena kombinirana TGA-FTIR studija za da se odredi gubitokot na isparlivi materii za vreme na pripremaneto na prepresize i za da se izvr{i nivna karakterizacija. Termi~kata stabilnost na matricite i nivnite kompoziti zajaknati so jaglerod ja ocenile so termogravimetriska analiza. Tie zaklu~ile deka povisoka termi~ka stabilnost poka`uva fenol-epoksidnata matrica otkolku samo fenolnata, me|utoa nivnite kompoziti zajaknati so jaglerod poka`uvaat ne{to poniska termi~ka stabilnost.

Vo referencata [38] e studirano vlijanieto na matricata na ja~inata na kinewe na jaglerodnite vlakna. So cel prou~uvawe na vlijanieto na matricata na ja~inata na kinewe, ispituvani bile razli~ni tipovi jaglerodni vlakna vo kombinacija so razli~ni polimerni sistemi. Od rezultatite {to bile dobieni pri ispituvawata, bilo zaklu~eno deka e golemo vlijanieto na me|usebnata athezija na vlaknata so polimernata matrica.

Vo referencata [39] e studirano vlijanieto na apsorpcijata na voda vrz mehani~kite svojstva na kompozitite so fenolna matrica. Kompozitite proizvedeni so vmre`uvawe na temperaturi poniski od 100°C imaat povisoki vrednosti za apsorpcija na voda i poniski vrednosti za mehani~kite svojstva.

II. EKSPERIMENTALEN DEL

**II.1. KARAKTERIZACIJA NA KONSTITUENTITE:
ablativna termoreaktivna fenolna smola - jaglerodni
vlakna**

Vo industrijata na kompozitnite materijali dominiraat tradicionalnite termoreaktivni polimeri, koi go ozna~ile i po~etokot na polimernite kompoziti, zaradi pogodnostite so procesirawe na te~niot oligomer pri preodot od A vo B-stadium, dostapnosta na tehnolo{kata oprema prilagodena za termoreaktantite, postoeweto na ogromni bazi na podatoci za komercijalnite termoreaktanti, kako i zaradi niskite ceni na surovinite. Primenata na termoreaktivnite sistemi dominira osobeno za proizvodstvo na kompoziti od koi se bara visoka izdr`livost na mehani~kite svojstva za izработка na konstrukcioni delovi.

Vo ovoj magisterski trud sporedeni se dva tipa na fenolna smola so cel da se proizvedat kompoziti za visokotemperaturna namena i vrz baza na dobienite rezultati za termi~kite i mehani~kite karakteristiki da se odredi soodvetnata smola za ablativna aplikacija.

Novite tipovi na fenol formaldehidni smoli, dostapni na pazarot, sodr`at razli~ni dodatoci odnosno modifikatori. Tuka spa|aat rastvoruva~ite, koi po svojata priroda mo`at da bidat inertni ili reaktivni, katalizatorite na vmre`uvawe, kako i opredeleni tipovi na termoplasti~ni polimeri, koi se me{aat so termoreaktivnata smola.

Po preporaka na proizvoditelot na sinteti~ki smoli "Fenolit" Slovenija, kako vrzivo za jaglerodni vlakna mo`e da se koristi fenol formaldehidnata smola od rezolen tip - Borofen DX 30. Isto taka za izработка na bakelitni masi prepora~ana e i smolata Borofen BF 5.

Vo ovoj magisterski trud izbrani se jaglerodni vlakna, koi kaj kompozitot obezbeduvaat [40-42]:

- Visoka ja~ina i visoki moduli,
- Trajna cvrstina (granica na zamor), otpornost na distorzija i abewe,
- Gustina $\rho=1,7 \text{ g/cm}^3$,
- Termi~ka stabilnost,
- Otpornost na korozija (visoka otpornost na alkalii, kisellini i organski rastvoruva~i),
- Elektri~na provodljivost i elektromagnetna za{tita.

Tabela II.1. Karakteristiki na smolite

Karakteristik i	Fenol-formaldehidna smola Borofen DX 30 od rezolen tip, rastvorena vo izopropil alkohol	Fenol-formaldehidna smola Borofen BF 5 od rezolen tip, modificirana so termoplast i rastvorena vo metanol i izopropil alkohol
Sodr`ina na suva materija (%)	68-72	46-50
Viskozitet po Ford (s)	140-160	120-240
Sodr`ina na sloboden fenol (%)	max 6	max 6
Sodr`ina na sloboden formaldehid (%)	max 2	max 1,5
B - vreme (min) 120 °C	8-11 1-1,5	5-7 1-3

150 °C		
pH - vrednost	7,3-7,8	7,3-7,8
Izgled	bistra temno crvenkasta te~nost	bistro-`oltenikava te~nost

Toray jaglerodnite vlakna se klasificirani vo tri kategorii na produkti: **T&TH** visoka ja~ina, sredni moduli, **M** niska ja~ina, visoki moduli i **MJ** povisoka ja~ina, visoki moduli [42].

Izbranite jaglerodni vlakna za ovoj magisterski trud spa|aat vo grupata **T&TH**, so visoka ja~ina i sredni moduli.

Tabela II.2. Karakteristiki na jaglerodnite vlakna

Karakteristiki	Jaglerodni vlakna
Komercijalna oznaka	“ Toray “ T800H
Firma proizvo~itel	Toray Industries, Inc.
Broj na filamenti	12 000
Gustina (g/cm ³)	1,81
Finost (g/1000m)	445
Dijametar na filamentot (μ)	8
Ja~ina na istegnuvawe (MPa)	5,49
Modul pri istegnuvawe (GPa)	294
Izdol`uvawe (%)	1,9

II.1.1. TERMI^KA KARAKTERIZACIJA NA SMOLITE

Termi~kata karakterizacija na smolite e izvr{ena so termogravimetriska analiza, TGA i preku opredeluvawe na vremeto na `elirawe na razli~ni temperaturi.

Za TGA karakterizacija upotreben e TG- analizator Du Pont de Numerous, a snimawata se vr{eni pri brzina na zagrevawe 20°C/min, vo inertna atmosfera.

Odredena e zavisnosta na vremeto na `elirawe od temperatura vo podra~jeto od 120⁰S-180⁰S.

Vrz osnova na dobienite rezultati za dve smoli, odbrana e smolata koja e popogodna za namenata od interes vo ovoj magisterski trud.

II.1.2. DRUGI ISPITUVANI SVOJSTVA NA SMOLITE

II.1.2.1. Odreduvawe so dr`ina na suva materija

Vo `areno i izmereno porcelansko lon~e se meri odredena koli~ina od smolata i se stava vo su{ara na temperatura od 135 °C za vreme od 3 ~asa. Posle toa lon~eto se stava vo eksikator i koga }e se izladi se meri na analiti~ka vaga. Od razlikite na te`inata se presmetuva so dr`inata na suva materija po formulata:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m - m_2} \times 100$$

kade:

X - so dr`ina na suva materija, %,

m - masa na lon~eto so smolata pred su{ewe, g,

m_1 - masa na lon~eto so smolata po su{ewe, g,

m_2 - masa na lon~eto, g.

II.2. DOBIVAWE NA PRES MASA ZA KOMPOZIT

Se vr{i podgotovka na konstituentite na pres masata: jaglerodnite vlakna se seckaat vo razli~ni dol`ini od 25 do 50 mm, a smolata se razreduva so alkohol vo odnos

1:0,2-0,5. Se merat soodvetnitate koli~ini na surovinite za izrabortka na pres masi so razli~en soodnos vlakna / matrica i so razli~na dol`ina na vlakna.

Me{aweto na prigitvenata smola so jaglerodnite vlakna se vr{i vo univerzalna me{alka **Werner Pfliderer** so dve **S-perki**, koi mo`at da se vrtat vo dva smeru, a na~inot na praznewe e kiperski. Re`imot na me{awe e sledniot: se vnesuva polovina od koli~estvoto na jaglerodnite vlakna, a potoa polovina od koli~estvoto na smolata. Se me{a 2-3 minuti i potoa se stava drugata polovina od jaglerodnite vlakna i smola. Vkupnoto vreme na me{awe e 60 **min**, i toa 10 minuti dvi`ewe na perkite od me{alkata edna nasproti druga, a pet minuti vo obratna nasoka. Re`imot na me{awe e izbran vrz baza na prethodno iskustvo od industriskata praksa i preliminarni eksperimenti so ispituvanata pres masa. Izme{anata pres masa se rasporeduva vo plehovi, taka {to visinata na slojot da bide 50 **mm**, ramnomerno raspredelen. Dobienata pres masa se su{i vo su{ara na temperatura od 80 ^oC. Vkupnoto vreme na su{ewe iznesuva 90 **min**, i toa 60 **min** od ednata strana i 20 **min** od drugata strana. Po izgled dobienata masa e rastresita vlaknеста struktura so crna boja. Ne e dozvoleno prisustvo na neimpregnirani vlakna, prisustvo na ne~istotii od drugi materii, drugi primesi, kako i prisustvo na vlakna slepeni vo grutki, {to se kontrolira vo po~etokot vizuelno.

Slika II.1. Izgled na me{alkata za me{awe i doblenata pres masa

II.2.1. SVOJSTVA NA DOBIENATA PRES MASA

II.2.1.1. Odreduvawe na so dr`inata na vlaga i isparlivi materii

Vo `areno i izmereno porcelansko lon~e se stava odredena koli~ina od pres masata i se su{i na temperatura od 105 °C za vreme od 2 ~asa. Potoa lon~eto se meri na analiti~ka vaga. Od razlikite na te`inata se presmetuva so dr`inata na isparlivi materii po formulata:

$$X = \frac{m - m_1}{m - m_2} \times 100$$

kade:

X - so dr`ina na suva materija, %,

m - masa na lon~eto so primerok pred su{ewe, g,

m_1 - masa na lon~eto so primerok po su{ewe, g,

m_2 - masa na lon~eto, g.

II.2.1.2. Odreduvawe so dr`ina na smola

Na filterna hartija prethodno izmerena so to~nost od 0,002 g se meri odredeno koli~estvo od pres masata. Se zavitkuva vo filternata hartija i se stava vo Soksletov aparat, vo koj so pomo{ na aceton se ekstrahira smolata. Ekstrakcijata se izveduva 7-8 ~asa. Se vadi filternata hartija so pres masata i se stava vo su{ara 60 min na 105 °C do konstantna masa. Procentot na smola se presmetuva po slednata formula:

$$\% \text{ na smola} = \frac{G_2 - G_3}{G_2 - G_1} \times 100$$

kade:

G_1 - te`ina na filterna hartija, g,

G_2 - te`ina na filterna hartija so primerokot, g,

G_3 - te`ina na filterna hartija so primerokot po su{ewe, g.

II.3. PROIZVODSTVO NA KOMPOZITI OD PRES MASATA

II.3.1. Preliminarni ispituvawa

Vrz osnova na soznanijata pri proizvodstvo na fenolni pres masi, zastapeni vo proizvodnata programa na *Eurokompozit* - Prilep i vrz osnova na dobienite rezultati od ispituvawata na smolata, opredeleni se parametrite za procesirawe na pres masata.

Termo-presuvaweto na site primeroci e izvr{eno na poluindustrijska presa pri slednite uslovi:

R = 75 bar,

T = 160 °C,

t = 20 min.

Od pres masite so razli`en soodnos vlakno/matrica i so razli`na dol`ina na vlakna, napraveni se otpresoci i ispitani se site fizi`ki, termi`ki i mehani`ki osobini na kompozitite.

II.3.2 OPREDELUVAWE OPTIMALNI PROCESNI PARAMETRI ZA PROIZVODSTVO NA KOMPOZITI

II.3.2.1. Metod na planiran eksperiment

So cel da se izvr{i modelirawe na procesot za dobivawe na kompoziten materijal (fenol - formaldehidna smola so jaglerodni vlakna kako zajaknuva~), koristen e metodot na planiran eksperiment, odnosno poln tri-

faktoren eksperimentalen dizajn, so varirawe na faktorite na dva nivoa:

- Temperatura na presuvawe na kompozitot, $T=140-160$ °S,
- Dol`ina na jaglerodni vlakna, $l=25-50$ mm,
- Vreme na presuvawe na kompozitot, $t=15-35$ min.

Soglasno plan-matricata (Tabela II.3), izvedeni se osum eksperimenti so varirawe na nivoto na site tri parametri. Ispitani se mehani~kite i termi~kite osobini na dobienite kompoziti.

Tabela II.3. Plan-matrica na eksperimentot

br. na eks .	matrica na planot na eksperimentot								karakteristiki (uslovi na eksperimentot)		
	h_0	h_1	h_2	h_3	h_1 h_2	h_1 h_3	h_2 h_3	h_1 h_2 h_3	h_1 (°S) h_2 Temp. na presuva -we	h_2 (mm)) Dol`. na vlakn a	h_3 (min) Vreme na presuva -we
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	140	25	15
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	160	25	15
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	140	50	15
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	160	50	15
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	140	25	35
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	160	25	35
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	140	50	35
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	160	50	35

osnovno nivo	$h_1=150$	$h_2=37,5$	$h_3=25$
interval na varijacija	10	12,5	10
gorno nivo	160	50	35
dolno nivo	140	25	15

II.4. OPREDELUVAVE NA OSNOVNITE SVOJSTVA NA KOMPOZITITE

Za opredeluvawe na osnovnite svojstva na kompozitite so razli~en soodnos vlakno/matrice i so razli~na dol`ina na vlakna i na kompozitite dobieni soglasno plan-matricata, koristeneni se pove~e metodi i postapki za karakterizacija na istite.

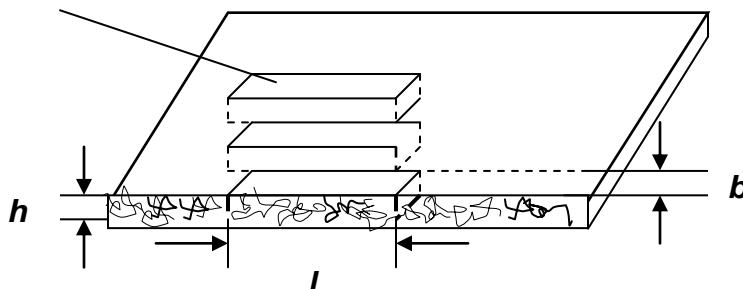
II.4.1. ISPITUVAVE NA FIZI^KO MEHANI^KITE SVOJSTVA NA KOMPOZITITE

II.4.1.1. JA^INA NA SVITKUVAVE I MODUL NA ELASTI^NOST PRI SVITKUVAVE

Ispituvaweto na svitkuvawe se koristi za opredeluvawe na cvrstinata i promenata na formata pri optovaruvawa na svitkuvawe na kompozitniot materijal.

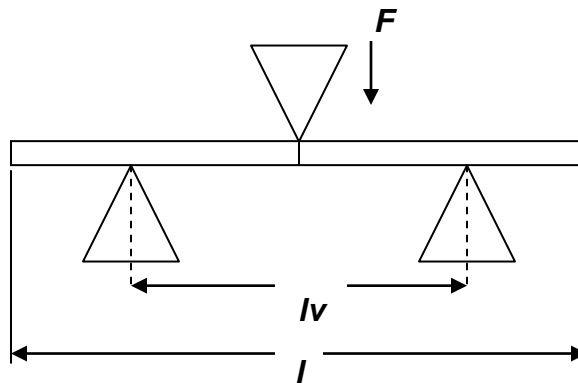
Dimenziite na ispituvanite epruveti, kako i nivnata izработка zavisi od vidot na materijalot koj se ispituva. Pri ispituvawe na kompoziten materijal (otpresok) od pres masa, standardnite propi{ani dimenzii na ispituvanite epruveti spored DIN 53457 ($b \times l \times$ debelinata na epruvetata, kade b e {irina na epruvetata, l e dol`ina na istata), se 15 h 120 \times debelinata na epruvetata (mm). Debelinata na epruvetata e 10 mm. Se ispituvaat po pet epruveti od sredinata na sekoja ispitna plo~a - otpresok (vidi slika II.2).

ispitna epruveta



Slika II.2. Polo`ba na ispituvanata epruveta vo edna anizotropna plo`a

Modulot na elasti~nost pri ispituvawa na svitkuvawa ja opi{uva zavisnosta pome|u napregaweto, σ i deformacijata, ε . So cel da se opredelat ja~inata i modulot na svitkuvawe, epruvetite se izlo`uvaat na dejstvo na sila. Za opredeluvawe na modulot na elasti~nost postojat dve ispitni metodi i toa: metoda so 3 to~ki na svitkuvawe (3 point bending test) i metoda so 4 to~ki na svitkuvawe (4 point bending test). Ispituvawata vo ramkite na ovoj magisterski trud se raboteni spored metodot so 3 to~ki na svitkuvawe (slika II.3).



Slika II.3. Metoda so tri to~ki na svitkuvawe

Pri ispituvawe na epruvetite so pravoagolen popre~en presek, napregaweto na svitkuvawe se opredeluva od izrazot:

$$\sigma = \frac{M_S}{W} (N/mm^2)$$

kade:

M_S - e moment na svitkuvawe i se opredeluva od izrazot:

$$M_S = \frac{Fl_v}{4} (Nmm)$$

kade:

l_V - e rastojanieto pome|u dvete potpori na koi se postavuva ispituvanata epruveta i zavisi od dimenziite na epruvetata. Spored DIN 53457 rastojanieto na potporite treba da bide $l_V = (16 \pm 1)h$.

Otporniot moment se opredeluva od izrazot:

$$W = \frac{bh^2}{6} (\text{mm}^3)$$

kade:

b - {irina na ispituvanata epruveta,

h - visina na ispituvanata epruveta.

Od prethodno iznesenoto sleduva deka napregaweto na svitkuvawe mo`e da se izrazi kako:

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{Fl_V}{bh^2} (\text{N/mm}^2)$$

Deformacijata pri svitkuvawe (ε) se opredeluva od izrazot:

$$\varepsilon = \frac{600hf}{l_V}$$

kade:

f - e nagibot na ispituvanata epruveta vo sredinata na rastojanieto l_V , odnosno na sredinata od dol`inata (l) na ispituvanata epruveta.

Modulot na elasti~nost pri svitkuvawe e daden so izrazot:

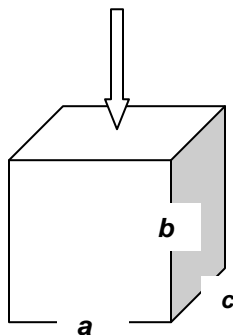
$$E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{4} \frac{Fl_V}{bh^3f} (\text{N/mm}^2)$$

II.4.1.2. jA^INA NA PRITISOK

Pod ja~ina na pritisok se podrazbira otpornosta {to ja pru`a ispituvanata epruveta po edinica povr{ina od

nejziniot naprežen presek pri opredeleni uslovi na ispituvawe (temperatura, vla`nost, brzina i drugo).

Pri ispituvawe na kompoziten materijal (otpresok) od pres masa, standardnite propi{ani dimenzii na ispituvanite epruveti spored DIN 53454 ($axbxc$) iznesuvaat 10 x 10 x 10 (mm). Epruvetite se se`eni od plo`i, pri {to se analizirani po pet ispitni epruveti od sredinata na sekoja ispitna plo`a - otpreso **F**



Slika II.4. Dejstvo na optovaruvawe na ispitnite epruveti

Ja`inata na pritisok se opredeluva od izrazot:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{ab} (N/mm^2)$$

kade:

F - sila koja dejstvuvava na ispituvanata epruveta, N,
A₀ - povr{ina na naprežen presek na ispituvanata epruveta na povr{inata (axb) na koja dejstvuvava optovaruvaweto, mm^2 .

II.4.1.3. JA`INA NA UDAR

Pod ja`ina na udar se podrazbira vkupnata energija na udar {to ispituvanata epruveta mo`e da ja apsorбира po edinica povr{ina. Ja`inata na udar kaj kompozitnite materijali naj`esto se ispituvava po metodot na **Charpy**.

Ispitnite epruveti spored DIN 53453 se so isti dimenzii 15x120x10 (mm) kako tie {to se koristat pri

ispituvawe na ja~ina na svitkuvawe. Otporot na udar (impact resistance) se presmetuva od energijata apsorbirana vo momentot koga klatното udara (so poznata energija) i ja kr{i epruvetata (so poznat popre~en presek). Ispituvawata se vr{at taka {to epruvetata edna{ se postavuva na povr{inata na udar an15, a drug pat an10, vo zavisnost od toa vrz koja strana na epruvetata se deluva so klatното.

Ja~inata na udar se opredeluva od izrazot:

$$\sigma = \frac{A_n}{bh} (kJ/m^2)$$

kade:

A_n - energija na udar {to ja apsorбира ispituvanata epruveta, kJ,

b, h - dimenzii na napre~niot presek na epruvetata, m.

II.4.2. OPREDELUVawe NA TEORETSKATA GUSTINA I SODR@INATA NA PORI VO KOMPOZITOT

Teoretskata gustina na kompozitot e opredelena so primena na standardot ASTM-D 2734-70, koristej}i gi podatocite za maseniot udel na vlaknata i polimernata matrica vo kompozitniot materijal, spored ravenkata:

$$\rho_t = (m_{vl} / \rho_{vl} + m_{pm} / \rho_{pm})$$

kade:

ρ_t - teoretska gustina na kompozitot,

m_{vl} - masen udel na vlaknata vo kompozitot,

m_{pm} - masen udel na smolata vo kompozitot,

$\rho_{vl} = 1,81 (g/cm^3)$ - gustina na vlaknata,

$\rho_{pm} = 1,127 (g/cm^3)$ - gustina na polimernata matrica.

Primenuvaj}i go istiot standard mo`e da se presmeta i sodr`inata na pori vo kompozitot spored izrazot:

$$V_p = 100(\rho_t - \rho_m) / \rho_t$$

kade:

ρ_m -eksperimentalno opredelena vrednost na gustinata na kompozitot, g/cm³,

V_p - volumen na pori vo kompozitot, %.

ρ_m se opredeluva so merewe na masata i dimenziite na primerokot.

II.4.3. TERMI^KI SVOJSTVA NA KOMPOZITITE

Terminite ispituvawa na kompozitite se izvedeni so termogravimetriska analiza, TGA (spored postapkata opi{ana vo II.1.1.). Opredelena e i temperaturna izdr`livost po Martens (DIN 53462).

Ispituvawata na temperaturnata izdr`livost po Martens slu`at za odreduvawe na postojanosta na formata kaj ispitnite epruveti koi pod statiko optovaruvawe postepeno se zagrevaat. Postojanosta po Martens ja odrazuva sposobnosta na materijalot da ja zadr`i formata do odredena temperatura. Taa se ozna~uva kako temperatura na koja progresivno zagreanata ispitna epruveta pod dejstvo na sila se svitkuva za odredena vrednost. Pri ispituvawe na kompoziten materijal (otpresok) od pres masa, standardnite propi{ani dimenzii na ispituvanite epruveti iznesuvaat 15 h 120 x 10 (mm) i se ispituvaat tri epruveti.

II.5. MATEMATI^KA OPTIMIZACIJA NA PROCESOT

II.5.1. Matemati~ko pretstavuvawe na procesot

Pod matemati~ko opi{uvawe na procesot se podrazbira sistem na ravenki od vidot :

$$(n^x \dots s^x, r^x)_i \bar{y} = i \bar{y}$$

kade :

$j=1,2,\dots,n$ - se funkcii na odziv povrzani so faktorite koi vlijaat na niv. So pomo{ na matemati~kite metodi za optimalno planirawe na eksperiment, mo`e da se dobie matemati~ki model za daden proces i vo odsustvo na podatoci za mehanizmite na procesot.

Uspe{nosta na pretstavuvaweto na procesot so matemati~ki modeli se sostoi vo sledново:

- se dobivaat informacii za vlijanieto na oddelnite parametri vo funkcijata na odzivot,
- kvantitativno se opredeluva zna~eweto na funkcijata na odziv pri zadaden re`im na vodewe na procesot;
- matemati~koto opi{uvawe na procesot mo`e da poslu`i kako osnova za optimizacija na procesot.

II.5.2. Proverka na reproducibilnosta na ravenkite

Vo postapkata za matemati~ko modelirawe na procesot, pred da se pristapi kon planirawe na eksperimentite, potrebno e da se znae kakva e reproducibilnosta na ravenkite. Za taa cel se sproveduvaat nekolku serii na paralelni eksperimenti vo oblata na menuvawe na vlijatelните faktori. Rezultatite dobieni od

$$(n \dots s, r = i)_i \bar{y} \sum_{r=i}^k \frac{r}{k} = i \bar{y}$$

eksperimentite se vnesuvaat vo tabela.

Pri toa za sekoja serija paralelni eksperimenti se presmetuva sredna aritmeti~ka vrednost na funkcijata na odziv.

k - e broj na paralelni eksperimenti izvedeni pri ednakvi uslovi.

y_{ij} - e funkcija na odziv.

Za sekoja serija na eksperimenti, potrebno e da se opredeli disperzija na istite:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum (y_{jk} - \bar{y}_j)^2$$

Za proverka na presmetkata na eksperimentite se nao|a odnosot na sekoja procenka na disperzijata i sumata od site procenki na disperzijata :

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^n S_j^2}$$

kade:

G_p - Kohrenov broj (Cochren), odnosno presmetana vrednost na Kohrenoviot kriterium.

Kohrenoviot broj treba da go ispolnuva uslovot :

$$G_p < G_t$$

kade :

G_t - tablicna vrednost na kriteriumot na Kohren, koja odgovara

na verovatnost od 0,95.

Za nao|awe na G_t neophodno e da se znae op{tiot broj na procenkata na disperzijata N i brojot na stepeni na sloboda f kade

($f=k-1$).

Ispolnuvaweto na gorenavedeniot uslov uka`uva na reproducibilnost na eksperimentot, a procenkata na disperzijata e homogena.

II.5.3. Presmetuvawe na gre{ki na eksperimentite

So procenkata na homogenosta na disperzijata na nekolku serii paralelni eksperimenti mo`e da se opredeli i presmeta goleminata :

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2$$

koja se narekuva procenka na disperzijata na reproducibilnosta ili procenka na disperzijata na edini~no merewe.

Srednata procenka na disperzijata se opredeluva od izrazot:

$$S_y^2 = \frac{S_y^2}{k}$$

So procenkite na disperziite e povrzan brojot na stepeni na sloboda $f_1=N(k-1)$ i $f_2=Nk-1$, soodvetno.

Koga pri sproveduvaweto na eksperimentot opitot se povtoruva, toga{ se koristi sredna vrednost na funkcijata na odziv, pa pri obrabotka na podatocite se koristi S_y^2 . Vo slu~aj koga poradi nedostatok na vreme ili te{kotii pri izvedba na eksperimentot, opitot ne se povtoruva, pri obrabotka na podatocite se koristi S_y^2 .

II.5.4. Metod na poln faktoren eksperiment

Ovoj metod dava mo`nost za matemati~ko opi{uvawe na istra`uvaniot proces vo nekoja lokalna oblast na faktorniot prostor, koja se prostira vo okolinata na odbranata to~ka so koordinati.

Vo odbranata to~ka se prenesuva po~etokot na faktornoto prostranstvo. Za taa cel se koristat novi promenlivi, kako:

$$X_i = \frac{(x_i - x_{oi})}{\Delta x_i}$$

kade :

$i=1,2,\dots,n$

X_i - e kodirana promenliva

x_i - e realna promenliva

x_{oi} - e sredna vrednost na vrednostite na realnata promenliva

Δx_i - e razlika meju srednata vrednost i realnata promenliva.

So pomo{ na polniot faktoren eksperiment se dobiva matemati~koto opi{uvawe na procesot vo vid na polinomna ravenka :

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n + \dots + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{(n-1)n} x_{n-1} x_n$$

Ovaa ravenka e regresiona ravenka, a nejzinite koeficienti - regresioni koeficienti, odnosno koeficienti na regresija. Za podobro presmetuvawe na regresionite koeficienti na site faktori od eksperimentot, koi za vreme od polinomniot faktoren eksperiment variraat na dve nivoa soodvetno im se dodavaat kodiranite promenlivi +1 i -1, odnosno maksimalna i minimalna vrednost.

Na osnova na gore iznesenoto, mo`e da se dade slednata definicija: *poln faktoren eksperiment se narekuva sistem od opiti - probi, koi gi sodr`at site vozmo`ni povtoruva~ki kombinacii na nivo na varirani faktori.*

Tabelite vo koi se navedeni uslovite na izvedba na polniot faktoren eksperiment se narekuvaat matrici na planirawe na eksperimentot i nivnata golemina zavisi od brojot na faktorite koi se zemeni vo predvid za opi{uvawe, odnosno matemati~ko definirawe na daden proces. Vo tabelata broj II.4 e dadena matricata za planirawe na dvofaktoren eksperiment, a vo tabela II.5 matrica na planirawe na tri - faktoren eksperiment.

Tabela II.4. Matrica na poln dvo-faktoren eksperiment

br. na eksper	Matrica na planot na eksperimentot				Rezultati od probite		
	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y_1	y_2	y_3
1	+1	-1	-1	+1			
2	+1	+1	-1	-1			
3	+1	-1	+1	-1			
4	+1	+1	+1	+1			
5	+1	-1	-1	+1			
6	+1	+1	-1	-1			
7	+1	-1	+1	-1			
8	+1	+1	+1	+1			

<i>osnovno nivo</i>	h_1	h_2	h_3
<i>interval na varijacija</i>			
<i>gorno nivo</i>			
<i>dolno nivo</i>			

Tabela II.5. Matrica na planirawe na poln tri-faktoren eksperiment

br. na eks	Matrica na planot na eksperimentot								Rezultati od probite		
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_1	y_2	y_3
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1			
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1			
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1			
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1			
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1			
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1			
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1			

8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1			
---	----	----	----	----	----	----	----	----	--	--	--

osnovno nivo	h₁	h₂	h₃
interval na varijacija			
gorno nivo			
dolno nivo			

Osnovnite principi za konstrukcija na matricata na planirawe na poln faktoren eksperiment se:

- nivoata na varirawe na prviot faktor se menuvaat od opit do opit,
- za~estenosta na menuvawe na nivoata na varirawe na sekoj odreden faktor e za dva pati pomala od prethodnata.

Matricata na planirawe na poln faktoren eksperiment gi ima

$$\sum_{j=1}^N X_{ji} = 0$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ji}^2 = N(i \neq m)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ji} X_{jm} = 0(i \neq m)$$

slednive svojstva:

kade:

N - broj na opiti na poln faktoren eksperiment

j - broj na opiti ($j=1,2,\dots,N$)

i - broj na faktorot

Svojshtvoto izrazeno so poslednata ravenka se narekuva-ortogonalnost. Toa ovozmo`uva presmetuvawe na regresionite koeficienti po ednostavni formuli nezavisni edna od druga.

Vkupniot broj na opiti vo matricata na planirawe e $N=2^n$, kade

{to "n" e broj na faktorite vo faktorniot eksperiment.

Vrz osnova na polniot faktoren eksperiment mo`e da se presmetaat regresionite koeficienti so koristewe na izrazite :

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j; b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji} y_j; b_{im} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji} x_{jm} y_j (i \neq m)$$

Nekoi regresioni koeficienti mo`at da bidat zanemarливо mali, odnosno nezna~itelni po vlijanie na faktorniot eksperiment. Opreduvawe na validnosta na regresionite koeficienti se vr{i so pomo{ na **Student**-oviot

$$\frac{S_e^2}{n} = S_{dt}^2$$

kriterium, odnosno izrazot :

a koeficientot se smeta validen, ako e ispolnet uslovot:

$$|b| \geq S_{bt}$$

odnosno apsolutnata vrednost na koeficientot na regresija da e pogolem vo odnos na tabli~nata vrednost na **Student**-oviot kriterium. Vo slu~aj da ne e zadovolen kriteriumot, toga{ koeficientot na regresija se izostavuva kako nevlijatelen koeficient vo regresionata ravenka, a so toa vlijanieto na odreden faktor ili vzaemno dejstvo na odredeni faktori od faktorniot eksperiment.

Po opredeluvawe na regresionata ravenka na osnova na presmetanite koeficienti i ispitana nivna validnost, potrebno e da se ispita adekvatnosta na istata, odnosno se proveruva nejzinata podobnost za pravilno opi{uvawe na funkcijata na odziv. Za taa cel se koristi **Fisher**-oviot

$$F_p = \frac{\max(S_{ad}^2, S_y^2)}{\min(S_{ad}^2, S_y^2)}$$

kriterium :

kade:

S_{ad} - pretstavuva procenka na adekvatnosta na disperzijata.

Procenkata na adekvatnosta na disperzijata se odredeluva po formulata :

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{j=1}^N (y_j^e - y_j^p)^2$$

kade:

B - broj na koeficienti na regresija vo baranoto ravenstvo vklucuva}i go i slobodniot ~len,

$y_j^e; y_j^p$ - eksperimentalna i presmetana vrednost na funkcijata na odziv vo j - tiot opit,

N - e broj na opiti na poln faktoren eksperiment.

So procenka na adekvatnosta na disperzijata e povrzan i brojot na stepeni na sloboda:

$$f_{ad} = N - B$$

Regresionoto ravenstvo se smeta deka e adekvatno dokolku e ispolnet uslovot :

$$F_p \leq F_t$$

kade:

F_t - tablicna vrednost na Fisher-oviot kriterium.

Za da mo`e da se koristi tablicata na Fisher neophodno e da se znae brojot na stepeni na sloboda svrzani so broitelot i imenitelot na izrazot za opredeluvawe na Fisheroviot kriterium [43].