

### III. REZULTATI I DISKUSIJA

#### III.1. REZULTATI OD ISPITUVANATA NA POLIMERNITE MATRICI

##### III.1.1. TERMI^KA KARAKTERIZACIJA NA POLIMERNITE MATRICI

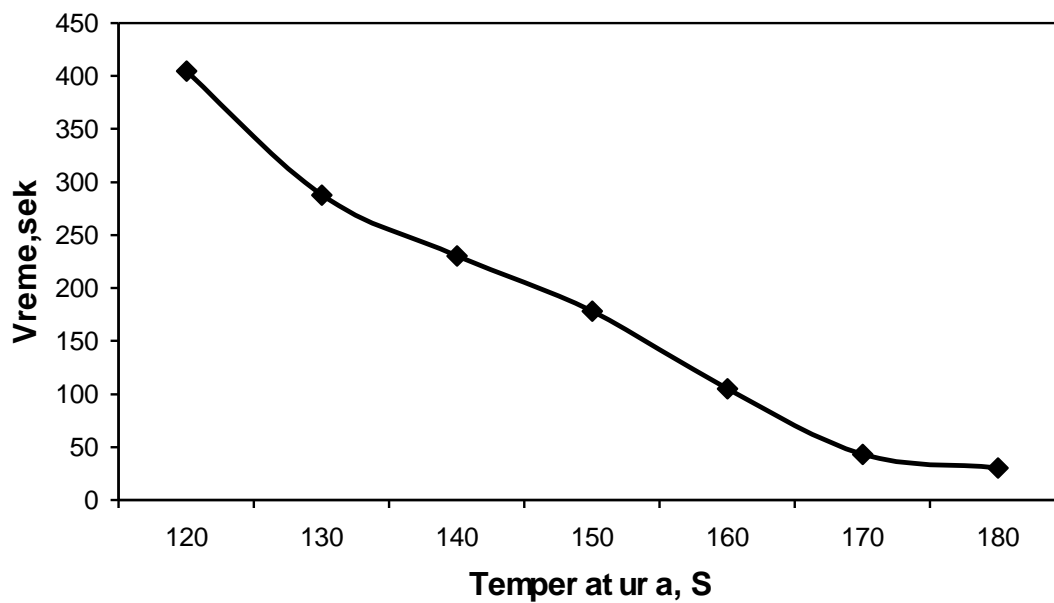
Primenata na termoreaktivnite polimeri dominira pred se zaradi pogodnosti so procesirane na te~niot oligomer pri preodot od A vo B-stadium. Na sobna temperatura termoreaktivnite polimeri se viskozni te~nosti. Pri zagrevane se odvivaat nepovratni hemiski reakcii, vo rezultat na koi se sozdava vmre`ena struktura na polimerot.

Fenol formaldehidnite smoli koi se dostapni na pazarot, so dr`at razli~ni dodatoci - modifikatori: rastvoriva~i koi mo`at da bidat inertni i reaktivni, katalizatori, kako i razli~ni tipovi na termoplasti~ni polimeri. Vo zavisnost od stehiometrikiot odnos i funkcionalnosta na reaktivnite molekuli, doaja do zgolemuwane na molekulskata masa - razgranuvane na molekulite, odnosno do vmre`uvane. Po~etokot na formirane na beskonena mre`a na polimernite molekuli pretstavuva to~ka na `elirane (gel point). Posle `eliraweto vcvrsnuvaweto prodol`uva, rasti gustinata na vmre`uvane i se dobiva potpolno vmre`ena struktura na polimerot [48].

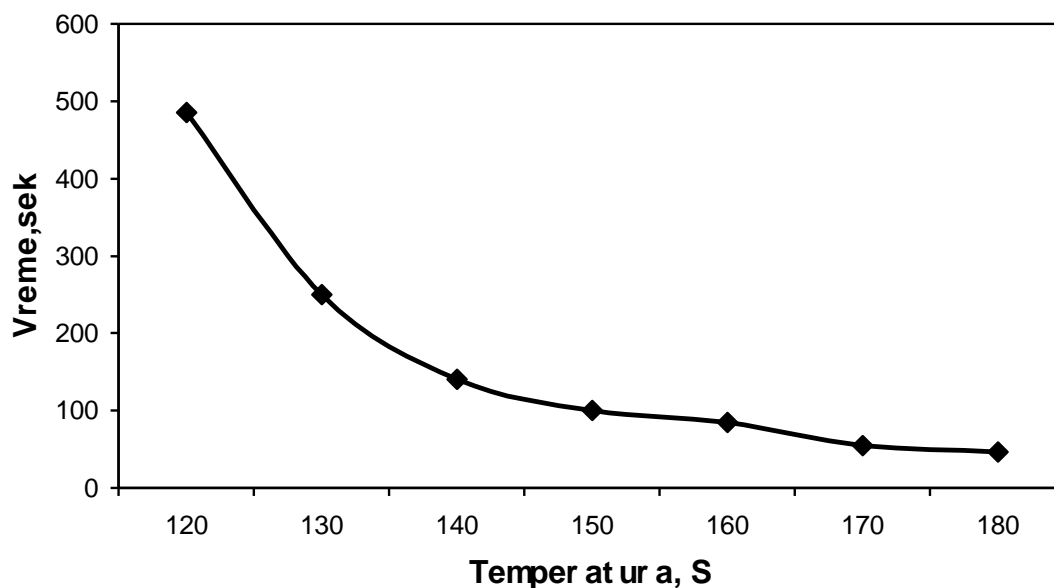
Vo ovoj trud sporedeni se dva rezolni tipa na fenol formaldehidna smola: **Borofen DX 30** rastvorena vo izopropil alkohol i **Borofen BF 5** modificirana so termoplast i rastvorena vo metanol i izopropil alkohol.

Zavisnosta na vremeto na `elirane (**B**-vreme) od temperaturata vo podra~jeto od 120<sup>0</sup>S-180<sup>0</sup>S e prika`ana na slika III.1 i slika III.2.

Rezultatite za gubitokot na masa na smolata pri zagrevaweto se pretstaveni na slika III.3 i III.4.



**slika III.1.** Zavisnost na B-vremeto na razli~ni temperaturi za polimernata matrica Borofen BF 5



**Slika III.2.** Zavisnost na B-vremeto na razli~ni temperaturi za polimernata matrica Borofen DX 30

Dobene rezultati za vremeto na `elirawe na dve smoli vo temperaturnoto podra~je od 120 °C do 150 °C se dadeni i vo tabela III.1 dodeka vo tabela III.2 se dadeni gubitocite na masa na smolata BF 5 i smolata DX 30 do temperatura od 550 °C.

**Tabela III.1.** Vreme na `elirawe na smolite

T, °C	B- vreme, sec	
	Borofen BF 5	Borofen DX 30
120	405	485
130	288	250
140	230	140
150	178	100
160	105	85
170	43	55
180	30	46

**Tabela III.2.** Gubitok na masa na smolite

T, °C	Δ m, %	
	Borofen BF 5	Borofen DX 30
0-250	7	15
250-350	3	1,4
350-450	15	4,6
450-550	18,4	12

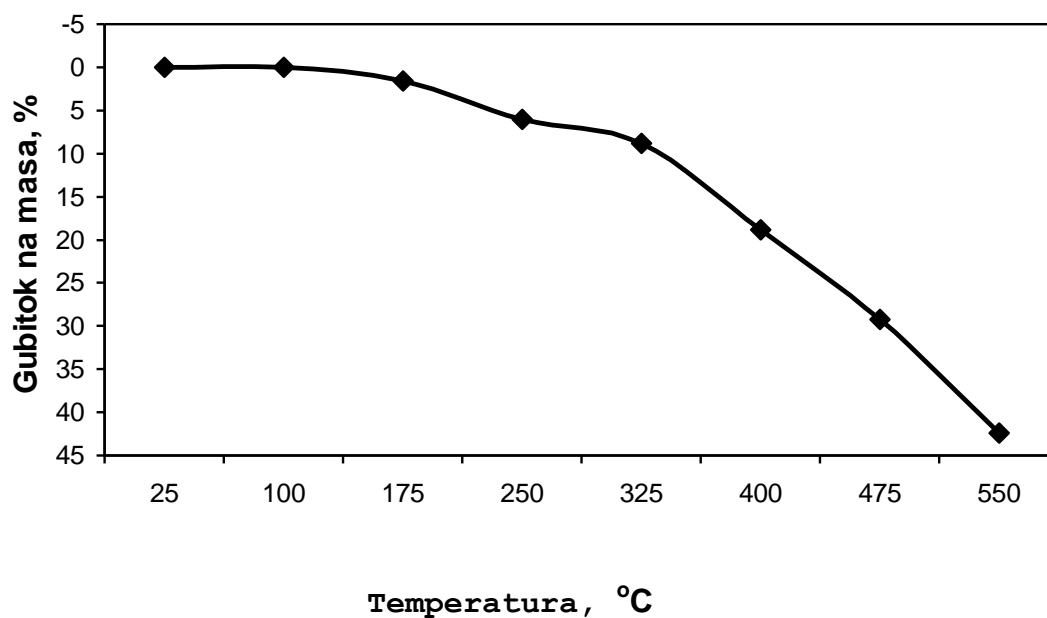
B-vremeto na vcvrsnuvawe na ablativni fenol formaldehidni smoli na 150 °C iznesuva od 1min do 3min, dodeka TGA na smolata t.e gubitokot na masa na temperatura povisoka od 500 °C iznesuva najmnogu 40 %, odnosno gubitokot na masa vo temperaturniot interval od 380–490 °C iznesuva 6,2% ili vo temperaturniot interval od 490–1000 °C iznesuva 22,8% [41].

Kako {to se gleda od slikata III.1 i III.2 i tabela III.1 vremeto na `elirawe na dvete smoli se dvi`i od 500 do 30 sekundi vo temperaturnoto podra~je od 120 °C do 180 °C. Drasti~no namaluvawe na vremeto na `elirawe kaj dvete smoli nastapuva na temperatura nad 140 °C.

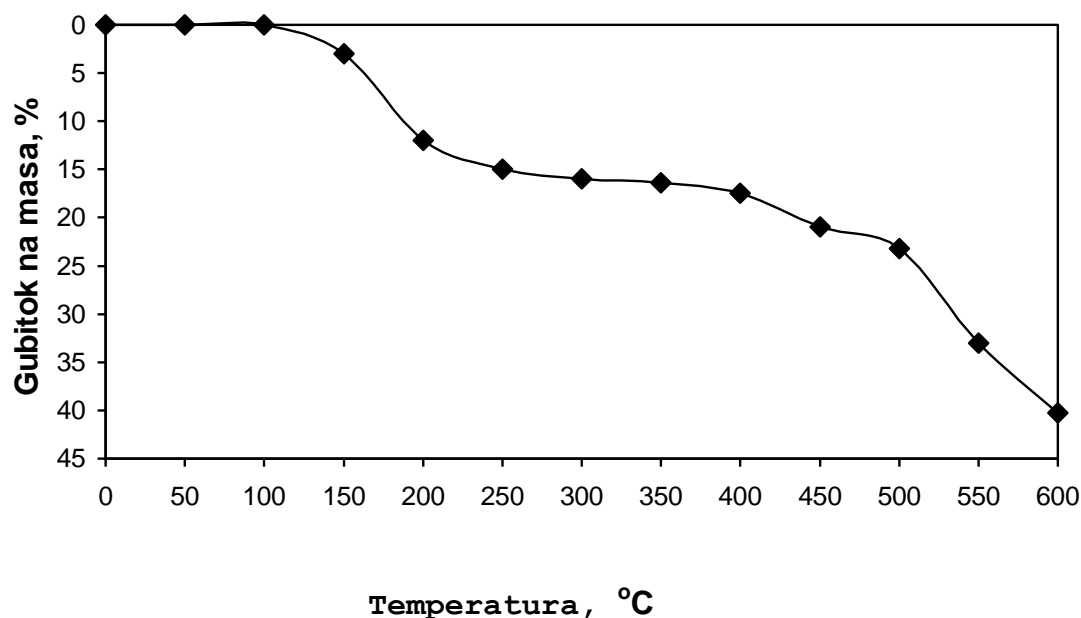
Od tehnolo{ki aspekt opredeluvaweto na vremeto na `elirawe na smolata e od interes, zatoa {to e povrzano so procesot na vmre`uvawe na istata, odnosno so fazniot preod te~na-cvrsta smola. Vrz baza na ovie preliminarni ispituvawa, opredeleno e podra~jeto na temperatura pri procesiraweto na kompozitot.

Od TGA (slika III.3 i III.4 i tabela III.2) mo`e da se zabele`i deka dvete ispituvani smoli o~igledno imaat razli~en mehanizam na termi~ka destrukcija. Treba da se odbele`i deka do temperatura od 200 °C gubitokot na masa na smolata BF 5 e re~isi dvojno pomal vo sporedba so smolata DX 30. Me|utoa vo temperaturnoto podra~je od 230 °C do 400 °C gubitocite na masa na smolata DX 30 se

zna~itелno pomali vo sporedba so smolata BF 5. Isto taka pri temperatura od 550 °C gubitokot na masa na smolata DX 30 iznesuva 33%, dodeka kaj smolata BF 5 destrukcijata iznesuva 43%.



Slika III.3. Termi~ka degradacija na polimernata matrica BF  
- 5



**Slika III.4.** Termička degradacija na polimernata matrica DX  
30

Vmre`uvaweto na termoreaktivnite polimeri e mnogu egzotermno. Ova e najkarakteristi~no koga se presuvaat podebeli delovi. **Addabbo et al [42]** go studirale vmre`uvaweto na termoreaktivnite smoli vo zagrean alat i poka`ale postoeve na kriti~na debelina pod koja {to vremeto na presuvawe ne zavisi od debelinata na delot. **Williams et al [43]** otkrile deka naj`e{kata ramnina ne koincidira (ne se poklopuva) sekoga{ so sredinata na otpresokot i deka vremeto na vmre`uvawe ne e sekoga{ proporcionalno na debelinata na delot kako {to obi~no se smeta. Va`no e da se odredi optimalna temperatura od yidot na alatot taka da toj se napolni bez da dojde do predvremeno `elirawe na smolata. Isto taka va`no e maksimalnata temperatura na delot da ostane pod temperatura pri koja {to degradacija ili nesakani strani~ni efekti mo`at da nastanat. Koga vremeto na vmre`uvawe se opredeluva preku temperaturata na yidot od alatot va`no e da ne se preceni kriti~nata konverzija (preminot od **B** vo **C** sestojba) neophodna za da se isfrli delot od alatot. Materijalot mora da go

postigne kriti~noto konverziono nivo pri koe {to e dimenzionalno stabilen za da mo`e da se odstrani od alatot bez da se izobli~i ili pak da se o{teti negovata povr{ina. Ova ~esto se tolkuva kako kraj na vmre`uvaweto t.e. pe~eweto.

Voobi~aeno slednive metodi se koristat za opredeluvawe na stepenot na vmre`enost:

- Se meri temperaturata na materijalot, pri {to zavr{etokot na vmre`uvaweto se indicira so naglo porast na temperaturata vo materijalot,
- Se meri pritisokot vo alatot, pri {to zavr{etokot na vmre`uvaweto se indicira so pad na pritisokot {to nastanuva kako rezultat na naglo sobirawe na smolata [12,44,45].

### **III.1.2. REZULTATI OD DRUGI ISPITUVANI SVOJSTVA NA POLIMERNITE MATRICI**

Odredena e sodr`inata na suva materija na dvete ispituvani smoli i dobienite rezultati se vo granici dadeni od proizvuditelot:

- sodr`inata na suva materija na smolata **BF 5** e 46-50% i
- sodr`inata na suva materija na smolata **DX 30** e 68-72%.

### **III.2. REZULTATI OD ISPITUVANITE SVOJSTVA NA DOBIENATA PRES MASA**

Izraboteni se pres masi so razli~en soodnos na jaglerodni vlakna i fenol formaldehidna smola i so razli~na dol`ina na vlakna.

Izraboteni se slednite primeroci pres masi:

**Tabela III.3.** Primeroci pres masi

Prime- rok pres masa	Dol`. na jaglero d. vlakna, l, mm	vl. /sm. vo pres masa, % mas.		Prime- rok pres masa	Dol`. na jaglero d. vlakna, l, mm	vl. /sm. vo pres masa, % mas.
1	25	25/75		1	50	25/75
2	25	45/55		2	50	45/55
3	25	57/43		3	50	57/43
4	25	67/33		4	50	67/33
5	25	75/25		5	50	75/25

Za site pres masi ispitana e so dr`inata na vlaga i isparlivi materii i so dr`inata na smola i vlakna.

Dobiena e so dr`ina na vlaga i isparlivi materii vo granici od **2,5%** do **5 %**.

**III.3. REZULTATI OD ISPITUVANITE SVOJSTVA NA PROIZVEDENITE  
KOMPOZITI OD PRES MASATA**



### III.3.1. MEHANI^KI SVOJSTVA NA PROIZVEDENITE KOMPOZITI OD PRES MASATA

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

Od izvr{enite merewa na mehani~kite svojstva, i nivnite sredni vrednosti, presmetani se srednite kvadratni odstapuvawa, **SD**, i koeficientite na varijacija, **Cv**, koi se dadeni vo tabelite III.4- III.13.

**Tabela III.4.** Ja~ina na udar an 10 ( $\sigma_{10}$ ) za kompoziti so razli~na sodr`ina na jaglerodni vlakna so dol`ina **l=25 mm**

Broj na merewa	$\sigma_{10}$ , KJ/m <sup>2</sup>				
	Sodr`ina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	113,7	129,4	135,5	110,9	141,4
2	108,5	123,5	132,9	114,0	142,1
3	98,6	118,7	141,2	130,0	123,8
4	95,3	109,8	138,8	124,8	126,3
5	110,2	117,7	131,7	132,5	130,7

<b>X<sub>sr</sub></b>	105,3	119,8	136,0	122,4	132,9
<b>SD</b>	7,9	7,3	4	9,6	8,5
<b>C<sub>v</sub></b>	7,5	6	2,9	7,8	6,4

**Tabela III.5.** Jačina na udar an 10 ( $\sigma_{10}$ ) za kompoziti so različna  
sadržina na jaglerodni vlakna so dolžina  $l=50$  mm

Broj na merewa	$\sigma_{10}$ , KJ/m <sup>2</sup>				
	Sadržina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	135,9	136,5	160,7	116,2	157,3
2	132,4	133,2	162,3	137,1	159,4
3	119,3	121,9	171,1	127,6	152,4
4	122,9	125,3	159,7	120,8	161,1
5	131,2	132,3	163,1	123,5	151,9

<b>x<sub>sr</sub></b>	128,3	129,8	163,4	125	156,4
<b>SD</b>	6,9	6	4,5	7,9	4,1
<b>C<sub>v</sub></b>	5,4	4,6	2,8	6,3	2,6

**Tabela III.6.** Jačina na udar an 15 ( $\sigma_{15}$ ) za kompoziti so različna  
sadržina na jaglerodni vlakna so dolžina  $l=25$  mm

Broj na merewa	$\sigma_{15}$ , KJ/m <sup>2</sup>				
	Sadržina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	93,7	97,1	80,5	123,3	95,1
2	91,4	95,0	91,5	116,8	100,4
3	80,8	86,3	83,7	86,9	84,5
4	84,5	111,7	75,3	97,6	88,9
5	86,9	103,2	94,4	99,7	102,2

<b>x<sub>sr</sub></b>	87,5	98,7	85,1	104,9	94,2
<b>SD</b>	5,2	9,5	7,8	14,9	7,5
<b>C<sub>v</sub></b>	5,9	9,6	9,2	14,2	8

**Tabela III.7.** Jačina na udar an 15 ( $\sigma_{15}$ ) za kompoziti so različna  
sadržina na jaglerodni vlakna so dolžina  $l=50$  mm

Broj na merewa	$\sigma_{15}$ , KJ/m <sup>2</sup>				
	Sadržina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	83,8	93,8	109,6	99,1	103,6
2	92,3	91,5	105,7	104,3	107,5
3	67,3	80,7	114,3	119,4	89,4
4	75,7	84,3	128,4	103,2	97,3
5	72,3	85,9	121,9	120,3	92,1

<b>X<sub>Sr</sub></b>	78,3	87,2	116	109,3	98
<b>SD</b>	9,9	5,3	9,2	9,9	7,6
<b>C<sub>v</sub></b>	12,6	6,1	7,9	9,06	7,7

**Tabela III.8.** Jačina na pritisok ( $\sigma$ ) za kompoziti so različna  
sadržina na jaglerodni vlakna so dolžina  $l=25$  mm

Broj na merewa	$\sigma$ , MPa				
	Sadržina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	153,4	160,0	163,9	179,5	142,9
2	154,7	159,0	162,6	175,2	145,7
3	151,9	158,7	165,8	181,2	149,2
4	150,8	159,1	166,1	180,7	139,2
5	152,5	157,9	164,2	178,6	136,1

<b>X<sub>Sr</sub></b>	152,7	158,9	164,5	179	142,6
<b>SD</b>	1,5	0,8	1,4	2,4	5,2

<b>C<sub>v</sub></b>	1	0,5	0,9	1,3	3,6
----------------------	---	-----	-----	-----	-----

**Tabela III.9.** Jačina na pritisok ( $\sigma$ ) za kompoziti so različna  $l=50$  mm  
sodrina na jaglerodni vlakna so dolžina  $l=50$  mm

Broj na merewa	$\sigma$ , MPa				
	Sodrina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	135,6	130,7	187,7	141,2	148,1
2	131,0	137,1	140,8	140,8	144,4
3	140,2	119,8	181,4	121,8	136,5
4	136,3	125,7	179,8	120,9	132,9
5	133,8	128,2	170,5	132,7	143,2

<b>X<sub>sr</sub></b>	135,4	128,3	172,0	131,5	141,0
<b>SD</b>	3,4	6,4	18,5	10	6,2
<b>C<sub>v</sub></b>	2,5	5	10,8	7,5	4,4

**Tabela III.10.** Jačina na svitkuvawe ( $\sigma$ ) za kompoziti so različna  $l=25$  mm  
sodrina na jaglerodni vlakna so dolžina  $l=25$  mm

Broj na merewa	$\sigma$ , MPa				
	Sodrina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	137,2	236,8	252,1	201,7	163,7
2	138,4	242,1	249,5	187,6	187,5
3	150,3	228,2	234,6	218,6	180,2
4	151,1	200,5	257,2	196,3	173,1
5	156,4	209,5	229,5	224,2	181,5

<b>X<sub>sr</sub></b>	146,7	223,4	244,6	205,7	177,2
<b>SD</b>	8,4	17,8	11,9	15,3	9,1
<b>C<sub>v</sub></b>	5,8	8	4,9	7,4	5,1

**Tabela III.11.** Jačina na svitkuvawe ( $\sigma$ ) za kompoziti so različna sodrčina na jaglerodni vlakna so dolžina  $l=50$  mm

Broj na merewa	$\sigma$ , MPa				
	Sodrčina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	128,2	168,2	196,3	179,2	134,5
2	142,8	180,3	216,5	187,2	150,5
3	123,2	184,1	187,2	205,3	153,8
4	147,3	170,5	210,3	203,3	138,7
5	132,4	165,3	208,1	190,5	145,4

<b>X<sub>sr</sub></b>	134,8	173,7	203,7	193,1	144,6
<b>SD</b>	10	8,1	11,8	11	8
<b>C<sub>v</sub></b>	7,5	4,7	5,8	5,7	5,6

**Tabela III.12.** Modul na elastičnost pri svitkuvawe ( $E$ ) za kompoziti so različna sodrčina na jaglerodni vlakna so dolžina  $l=25$  mm

Broj na merewa	$E$ , GPa				
	Sodrčina na vlakna vo kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	15,7	24,1	26,8	21,6	22,1
2	16,4	23,9	27,8	21,9	21,9

3	18,3	25,3	27,6	23,1	21,2
4	17,8	24,7	26,9	22,7	19,8
5	16,1	24,3	26,5	22,5	20,6

<b>X<sub>Sr</sub></b>	16,9	24,5	27,1	22,4	21,1
<b>SD</b>	1,1	0,6	0,5	0,6	1,0
<b>C<sub>v</sub></b>	6,7	2,3	2,0	2,7	4,5

**Tabela III.13.** Modul na elastičnost pri svitkovanju (E) za kompoziti so različna vsebina na ogljikovodni vlakna so dolžina **l=50 mm**

Broj na merewa	E, GPa				
	Sodržina na vlakna v kompozitot, %				
	25	45	57	67	75
1	14,0	18,4	21,9	21,6	16,9
2	14,2	19,2	22,8	19,8	15,5
3	14,8	18,9	21,9	21,1	12,6
4	15,3	19,6	22,6	20,4	18,8
5	15,1	19,0	21,4	20,9	15,2

<b>X<sub>Sr</sub></b>	14,7	19	22,1	20,8	15,8
<b>SD</b>	0,6	0,4	0,6	0,7	2,3
<b>C<sub>v</sub></b>	3,9	2,2	2,6	3,3	14,5

Svojstva na kompozitite zajaknati so kratki vlakna mnogu zavisat od vsebinata i raspredelbata na orientacijata na vlaknata kako i od adhezijata medu vlaknata i matricata. Vsebinata na vlaknata obično dosta precizno se kontrolira iako može da dojde do segregacija na vlaknata i smolata za vreme na proizvodstvoto. Orientacijata na vlaknata se promenuva koga je se promenat i uslovite na presuvanje, no toa e teško da se kontrolira.

Analizata na mehničke osobine na kompozitite zajaknati so kratki vlakna e mnogu poslovena otkolku kaj

kompozitite zajaknati so naso~eni kontinuirani vlakna. Postojat dve pri~ini za toa. Prvo prenesuvaweto na napregaweto me|u vlaknata i matricata ne e uniformno (podednakvo) po dol`inata na vlaknata, i poradi toa postojat nekakvi krajni efekti koi mo`at da bidat zanemareni kaj kompozitite so kontinuirani vlakna, no tie efekti se va`ni kaj kompozitite so kratki vlakna. Vtoro vlaknata nikoga{ ne se to~no paralelni edni vo odnos na drugi i naj~esto imaat haoti~na raspredelba kaj kompozitite so kratki vlakna. (Ima predlo`eno metodi za odreduvawe na orientiranosta na vlaknata koi baraat merewe na raspredelbata na orientiranosta na vlaknata i kompjuterska presmetka).

Svojstvata na termoreaktivnite kompoziti zajaknati so kratki vlakna se osetliivi na uslovite na procesirawe i delimi~no od metodot na procesirawe, osobeno onie koi se na osnova na fenolna smola, i mo`e mnogu da se razlikuvaat duri i za identi~ni otpresoci [12, 46].

Za ocenka na ja~inata na kompozitnite materijali so kratki vlakna, povtorno treba da se vratime kaj materijalite so beskone~ni vlakna. Ako vlaknata pominuvaat od eden do drug kraj na primerok kompozit, toga{ pri rastegnuvawe po dol`ina na vlaknoto i matricata i vlaknata }e se deformiraat podednakvo, dokolku pome|u niv postoji jaka atheziona ja~ina. Vo takov slu~aj optovaruvaweto koe materijalot go trpi }e bide raspredeleno me|u komponentite na materijalot proporcionalno na nivnite relativni povr{ini na napre~niot presek. Za bilo koe napregawe vo materijalot mo`e da se napi{e ravenkata:

$$\sigma = \sigma_f \varphi_f + \sigma_m (1 - \varphi_f)$$

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon; \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon$$

kade:

$\varepsilon$  - relativna deformacija na materijalot;

$\varphi_f$  - volumenski udel na vlakna;

$E_m, E_f$  - modul na elasti~nost na matricata i na vlaknata;

Ovoj soodnos va`i do ru{ewe na materijalot, koe nastanuva toga{ koga }e se dostigne grani~nata deformacija na edna od fazite. Kaj plasti~nite masi armirani so jaglerodni vlakna, obi~no prvo se ru{at vlaknata, a kaj stakloplastikata - matricata. Ako napregaweto na ru{ewe pri rastegnuvawe na vlaknata se ozna~i so  $\sigma_f$ , a soodvetniot pokazatel za matricata pri grani~na defomracija na vlaknata se ozna~i so  $\sigma'_m$ , toga{ pri rastegnuvawe na kompozitniot materijal ru{e~koto napregawe }e bide dadeno so formulata:

$$\sigma_c = \sigma_f \phi_f + \sigma'_m (1 - \phi_f)$$

Ovaa formula ne va`i pod opredelen grani~en volumenski udel na vlaknata, dokolku na dijagramot sila-deformacija na matricata se zabele`i makar i delumno odvivawe na procesi analogni na zajaknuvawe na materijalot. Vrednosta na ovaa grani~na vrednost obi~no e mnogu mala, osobeno koga ja~inata na zajaknuva~ot zna~itelno ja nadminuva ja~inata na matricata. Poslednava formula, poznata kako pravilo na sme{i, va`i samo vo slu~ai koga Poasonovite koeficienti na vlaknato i matricata, ( $\phi_f$  i  $\phi_m$ ) se ednakvi. Ako  $\phi_f$  ne e ednakov na  $\phi_m$  toga{ se vozmo`ni elasti~ni ili plasti~ni restrikcii na napre~ното sobirawe, a od ova sleduva vozmo`na pojava na volumenski-napregnata sostojba na materijalot, {to uslovuva zgolemuvawe na negovata ja~ina vo sporedba so presmetanata vrednost po prethodnata formula, koja od ovoj aspekt mo`e da se razgleduva kako dolna grani~na vrednost. No, ovie efekti obi~no se mnogu mali i formulata na praviloto na sme{i dava sosema dobri vrednosti za presmetka na ja~inata na ednonaso~nite vlaknesti kompoziti. Bidej}i ovaa formula e izvedena poa|aj}i od uslovot za ednodorno pole na napregaweto po dol`ina na vlaknata, jasno e deka taa treba da bide modificirana za presmetka na ja~inata na kompozititie so kratki vlakna za dva grani~ni slu~ai. Vo prviot slu~aj



vlaknata imaat dol`ina pogolema od kriti~nata i mo`at da bidat napregnati do ru{ewe, no pri ru{eweto srednoto napregawe vo vlaknata  $\bar{\sigma}_f$  e pomalo od  $\sigma_f$ . Realnata vrednost na  $\bar{\sigma}_f$  zavisi od to~nata slika za rapredelbata na napregawata na kraevite na vlaknoto. Ako se pretpostavi deka napregaweto na rastegnuvawe se zgolemuva od kraevite na vlaknoto spored linearna zavisnost (slika 3), toga{ srednoto efektivno ru{e~ko napregawe za vlaknoto mo`e da se presmeta po formulata:

$$\bar{\sigma}_f = (1 - l_c/2l)\sigma_f$$

kade {to  $l$  e dol`ina na vlaknoto, a ru{e~koto napregawe pri rastegnuvawe na kompozitot so orientirani kratki vlakna pri  $l > l_c$  mo`e da se presmeta po formulata:

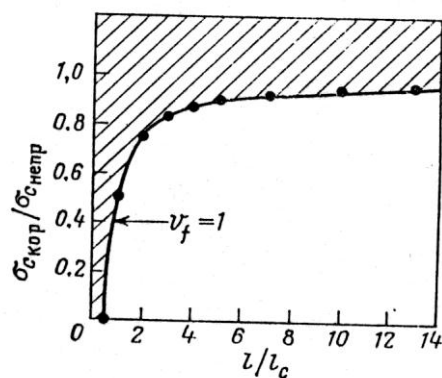
$$\sigma_c = \sigma_f \varphi_f (1 - l_c/2l) + \sigma'_m (1 - \varphi_f)$$

Vo vtoriot slu~aj dol`inata na orientiranite vlakna e pomala od kriti~nata. Prakti~no toj slu~aj se javuva pri o{tetuvawe na vlaknata. Ako  $l < l_c$ , toga{ maksimalnoto napregawe vo vlaknoto e ednakvo na  $2\tau_i l/d$  (vidi ravenka 2.6.) a bidej}}i efektivnoto napregawe e ednakvo na polovina od maksimalnoto, toga{ ja~inata na kompozitniot materijal pri rastegnuvawe }e bide:

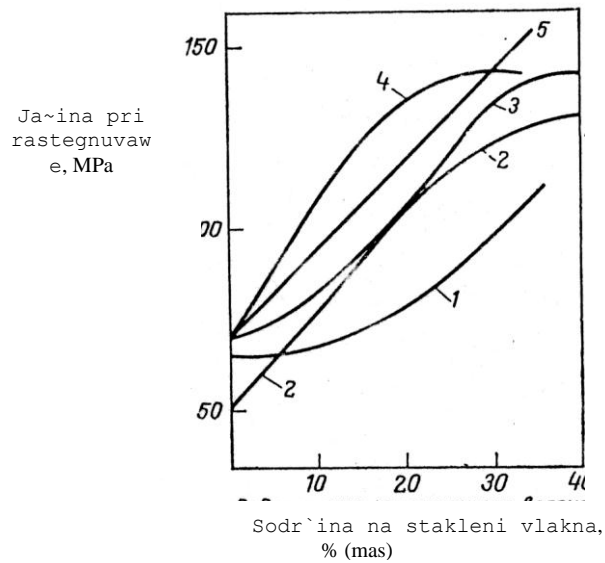
$$\sigma_c = \frac{\tau_i l}{d} \varphi_f + \sigma'_m (1 - \varphi_f)$$

Razlikata na realnata ja~ina na kompozitnite materijali so orientirani kratki vlakna od idealnata ja~ina na ednonaso~en materijal so beskon~ni vlakna najmnogu zavisi od odnosot  $l/l_c$ ; ovoj pak odnos zavisi od ja~inata i dijametarot na vlaknata, a isto taka od athezionata ja~ina ili napregaweto na triewe na granicata na razdelba vlakno-matrica. Od grafikot na zavisnosta na

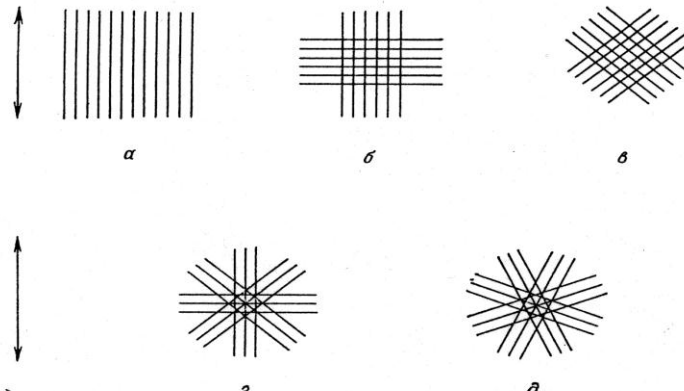
odnosot na jačinite na kompozitnitate materijali so orientirani kratki i beskončni vlakna (za eden ist tip na vlakna, ista matrica i ist volumenski udel na vlakna) od odnosnot  $l/l_c$  može da se zabeleži (slika 4) deka pri  $l/l_c > 10$  kaj kompozitite so kratki vlakna se dostignuva 95% od jačinata na kompoziti so beskončni vlakna. Krivata na ovoj grafik pretstavuva grafično rešenje na ravenkite 2.7, 2.8 i 2.9 za hipotetičen slučaj pri  $\varphi_f = 1$ . Linearna zavisnost za jačinata na kompozitniot materijal od volumenskiot udel na vlaknata može da se dobie samo vo tesen interval pri niski vrednosti na  $\varphi_f$ . Pričina za ova e faktot deka praktično e mnogu teško da se postigne orientacija na kratki vlakna pri visoki vrednosti na  $\varphi_f$ , a pri vrednosti na  $\varphi_f$  pogolemi od nekoja kritična vrednost vozmožno e ostro namaluvawe na jačinata na materijalot poradi vzaemni dejstva meju vlaknata i formirawe na pori. Pri toa kritičnata koncentracija e dotolku poniska kolku što se vlaknata pokratki. Na slika 2.5 dadeni se eksperimentalni podatoci za kompoziti so kratki stakleni vlakna.



Sl. 2.36. Zavisnost na odnosot na ručkiki napregawa vo kompozitni materijali koi sodr`at ednakov volumenski udel na kratki i beskončni vlakna ( $\varphi_f = 1$ ) od odnosot na faktičkata kon kritičnata dol`ina na vlaknoto



**S1. 2.5.** Zavisnost na jačinata pri rastegnuvawe na različni termoplasti so stakleni vlakna od sodrinata na valkna: 1-polistiren; 2-akrilonitril-butadien-stiren kopolimer; 3-kopolimer na stiren so akrilonitril; 4-polikarbonat; 5-poliamid 6.6.



**S1.6.** Koeficienti na efikasnost na zajaknuvaweto  $\eta$  kaj vlaknasti kompozitni materijali so različna raspredelba na vlaknata: a- $\eta=1$ ; b- $\eta=1/2$ ; v- $\eta=1/4$ ; g- $\eta=3/8$ ; d- $\eta=3/8$ ; za ednorodna statistička raspredelba vo ramnina  $\eta=3/8$ ; za

ednorodna statisti~ka volumenska raspredelba  $\eta=1/6$ .  
Strelkite ja poka`uvaat nasokata na prilo`eno napregawe

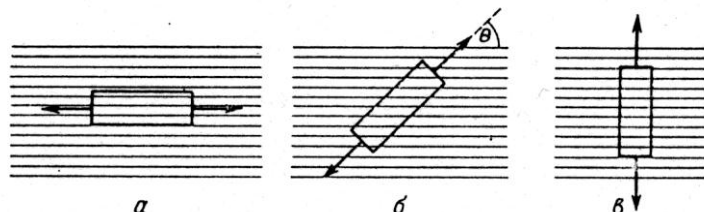
Kaj materijalite so kratki vlakna e nesporedbeno pote{ko da se postigne ednoosna orientacija na vlaknata za razlika od materijalite so beskone~ni vlakna. Taka raspredelbata na vlaknata vo termoplasti~nite kompoziti, no i vo termoreaktivnite pres masi, obi~no e haoti~na. Haoti~nata rapredelba na vlaknata mnogu ja namaluva efikasnosta na zajaknuvaweto na polimerite so kratki vlakna, bidej}i napregawata koi {to se predavaat na neorientiranite vlakna mo`e da bidat mnogu mali ili duri ednakvi na nula. Eden od na~inite da se izrazi relativnata efikasnost na zajaknuvawe e koristeweto na koeficientot na efikasnost na vlaknata so zadaden tip na orientacija. Na slika 2.6 se prika`ani ovie koeficienti za neкои idealizirani tipovi na rapredelba na vlaknata. Ako kompozitniot materijal ima soodvetna rapredelba na vlaknata negovata ja~ina mo`e da se presmeta spored slednata formula, vo koja e vklue~en i koeficientoit na efikasnost i koja va`i za  $l > l_c$ :

$$\sigma_c = \eta \phi \sigma_f \varphi_f + \sigma'_m (1 - \varphi_f)$$

kade {to  $\phi$  e koeficient na napregawata na kraevite na vlaknata.

Na primer za poliesterski pres masi (preprezi) so haoti~en raspored na vlaknata vo ramniina i so dol`ina okolu 50 mm poslednava formula pri  $\eta=1/3$  dava dobri sovpa|awa so eksperimentalnite podatici. Me|utoa, pri dol`ini pomali od  $l_c$  mo`e da se o~ekuva slab zajaknuva~ki efekt. Zatoa poliesterskite pres-masi, koi {to sodr`at stakleni vlakna so dol`ina okolu 6 mm (premiksi) imaat ja~ina mnogu bliska do ja~inata na ~istata poliesterska smola.

Spored eden drug pristap ja~inata se presmetuva poa|ajji od maksimalnoto napregawe na ru{ewe na materijalot. Na slika 2.7 prika`ani se razli~nite soodnosi me|u nasokata na dejstvoto na silata i orientacijata na vlaknata vo kompozitot, {to ovozmo`uva da se zamislat osobenostite pri ru{ewe na materijalot.



**Sl. 7.** Neko| soodnosi me|u nasokata na orientacija na vlaknata i prilo`enoto napregawe: a-nadol`na nasoka, napregawe  $\sigma_c$ ; b-nasoka pod agol  $\theta$ , napregawe  $\sigma_t$  v-transverzalna nasoka, napregawe  $\sigma_t$

Ako prilo`enoto napregawe se sovpa|a so orientacijata na vlaknata ili agolot  $\theta$  me|u niv e mal, toga{ ru{eweto na materijalot se opredeluva so rastegnuva~kite napregawa vo vlaknata. Pri golem agol  $\theta$  ostro se zgolemuvaat napregawata na smolknuvawe vo matricata i na granicata na razdelba vlakno-matrica, dodeka napregawata na rastegnuvawe vo vlaknata se namaluvaa, {to pridonesuva za promena na karakterot na ru{ewe i dominantno stanuva ru{eweto pri smolknuvawe po granicata na fazite ili vo matricata. Ako go ozna~ime ru{e~koto napregawe na ednonaso~en kompozit pod agol  $\theta$  kon nasokata na vlaknata so  $\sigma_\theta$ , nadol`nata i transverzalnata ja`ina soodvetno so  $\sigma_c$  i  $\sigma_t$ ,  $\tau_c$ -ja~inata na smolknuvawe vo ramninata na orientacijata na vlakanta, toga{ vo zavisnost od tpot na ru{ewe  $\sigma_\theta$  mo`e da se presmeta po slednite formuli:

Pri ru{ewe na vlaknata:  $\sigma_\theta = \sigma_c \sec^2 \theta$

Pri smolknuvawe paraleleno so vlaknata:  $\sigma_\theta = 2\tau_c \operatorname{cosec} 2\theta$

Pri ru{ewe vo transverzalna nasoka:  $\sigma_\theta = \sigma_t \operatorname{cosec}^2 \theta$

Rezultati i

So integracija na ravenkata 2.11 po site vrednosti za agolot  $\theta$  mo`e da se dobie formula za ru{e~koto napregawe pri rastegnuvawe na kompoziten materijal so haoti~no raspredelni vlakna:

$$\langle \sigma_c \rangle = \frac{2\tau_c}{\pi} \left[ \frac{\sigma_m}{\sigma_c} + 1 + \ln \left( \frac{\sigma_c \sigma_t}{\tau_c^2} \right) \right]$$