

UDARNA ŽILAVOST LAMINARNIH TERMOPLASTIČNIH KOMPOZITNIH MATERIJALA OJAČANIH ARAMIDNIM VLAKNIMA

Irena D. ŽIVKOVIĆ, Predrag I. PERIŠIĆ; Petar USKOKOVIĆ, Radoslav R. ALEKSIĆ*; Zijah H. BURZIĆ**

Institut bezbednosti, Kraljice Ane bb, 11000 Beograd

*Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, 11000 Beograd

**Vojnotehnički institut, Katanićeva 15, 11000 Beograd

(Primljen 17. januara 2002., prihvaćen 4. marta 2002.)

Sadržaj - Sa ciljem dobijanja materijala poboljšane otpornosti na prodor balističkog projektila napravljen je laminarni kompozitni materijal sa termoplastičnom matricom ojačan poli(p-fenilentereftalamidom). U ovom radu je opisan način izrade pomenutog kompozitnog materijala kao i njegovo ponašanje prilikom balističkih i mikromehaničkih ispitivanja. Analiza rezultata dobijenih ispitivanjem udarne žilavosti balistički testirane i netestirane kompozitne ploče, pokazala je poboljšanu sposobnost apsorpcije mehaničke energije u materijalu usled uticaja jakih aramidnih vlakana, duktilne termoplastične matrice i ostvarene granične površine između njih koja sa jedne strane omogućuje prenos opterećenja između konstituenata tako da se koristi sposobnost ojačanja kao nosioca opterećenja, a sa druge strane deflektuje propagaciju prslina u materijalu i na taj način doprinosi povećanju žilavosti kompozita.

Ključne reči: aramidno vlakno, udarna žilavost, termoplastična matrica, laminarni kompozitni materijal.

Impact Toughness of Aramid Fibre Reinforced Laminar Thermoplastic Composite Materials

Abstract - In order to obtain a composite material with desired improved resistance to penetration of ballistic projectile, a poly(p-phenyleneterephthalamide) reinforced laminar thermoplastic composite material has been made. This paper describes the procedure of manufacturing such composite material, and its behavior during the ballistically and micromechanically testing as well. The analysis of impact resistance results obtained from ballistically tested and untested composite panel specimens has shown an improved mechanical energy absorption capability due to effect of strong aramid fibers, ductile thermoplastic matrix and interface between fiber and matrix. This interface enables load transfer between the two constituents using high load-bearing capacity of the reinforcement. Another feature of the interface is deflection of propagating cracks within the material and thus raising toughness.

Key words: aramide fibre, impact toughness, thermoplastic matrix, laminar composite material.

1. Uvod

Para-aramidno vlakno je poznato po svojim izuzetnim osobinama: dobroj toplotnoj otpornosti, velikoj zateznoj čvrstoći i velikoj žilavosti [1-4], te se u kombinaciji sa termoreaktivnom smolom kao matricom veoma često koristi kao ojačanje kod kompozitnih materijala upotrebljivih za balističku zaštitu [5-9].

Sa ciljem povećanja žilavosti materijala za balističku zaštitu napravljen je polimerni kompozitni materijal sa para-aramidnim vlaknima kao ojačanjem i termoplastičnom smolom (poli(vinil butiralom)) kao matricom.

U okviru ovog rada razvijen je tehnološki postupak izrade polimernog kompozitnog materijala para-aramidno vlakno - poli(vinil butiral) i urađena su njegova balistička ispitivanja, ispitivanja udarne žilavosti i ispitivanja rendgenskim zracima.

Teorijska razmatranja i eksperimentalna ispitivanja su izvedena radi posmatranja odgovora pomenutog kompozitnog materijala na udar velike brzine kao i analize njegovog ponašanja prilikom ponovnog udara [10]. Takođe je vršeno i poređenje vrednosti udarne žilavosti za kompozitni materijal sa termo-

plastičnom i termoreaktivnom matricom kao i poređenje za balistički ispitivan i neispitivan materijal [11,12].

2. Materijal

2.1. Prikaz svojstava ojačanja

Kao ojačanje je korišćeno para-aramidno vlakno Kevlar 129 u obliku tkanine. Svojstva aramidne tkanine su data u tabeli 1.

Tabela 1. Svojstva aramidne tkanine.

Širina [cm]	160
Prepletaj	platno 1/1
Površinska masa [g/m ²]	280
Prekidna sila [N/5cm]	
-osnova	182,4
-potka	252,6
Prekidno izduženje [%]	
-osnova	9,0
-potka	7,5
Gustina žica [br. žica/10cm]	
-osnova	120
-potka	130
Finoća prediva [dtex]	
-osnova	1123×1
-potka	1111×1
Broj fibrila	1090

2.2. Prikaz svojstava matrice

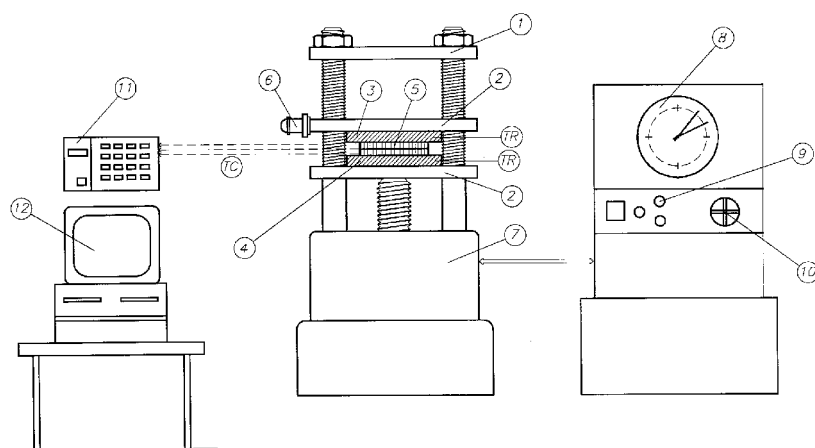
Kao matrica korišćena je folija poli(vinil butirala). Svojstva polimerne matrice data su u tabeli 2.

Tabela 2. Svojstva termoplastične matrice.

Specifična težina	1,058
Indeks refrakcije	1,48
Zatezna čvrstoća [MPa]	23
Izduženje [%]	210
Modul elastičnosti [MPa]	5
Otpornost na cepanje [MPa]	3
Poasonov odnos	±0,5
Tvrdoća, Shore "A"	64
Specifična toplota [J/kgK]	2100
Temperatura staklastog prelaza [°C]	16
Toplotna provodljivost [W/mK]	0,21
Dielektrična konstanta na 1kHz	4
Faktor disipacije na 1kHz	1,8 10 ⁻⁴

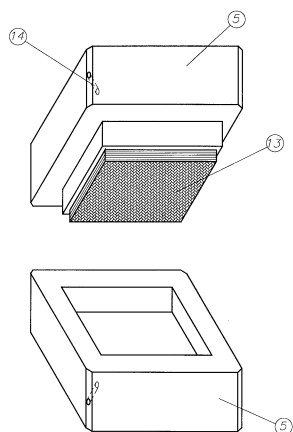
3. Opis korišćene opreme

Na slici 1 prikazana je hidraulička topla presa sa sistemom za prikupljanje procesnih parametara u kojoj je napravljen slojevit kompozitni materijal.



Slika 1. Uređaj za toplu presovanje slojevitog polimernog kompozitnog materijala. Aparatura se sastoji od sledećih delova: 1 - nosači ploča sa navojem; 2 - presne ploče; 3 - gornja grejna ploča; 4 - donja grejna ploča; 5 - kalup za presovanje; 6 - držač gornje ploče; 7 - telo prese; 8 - skala za merenje pritiska; 9 - regulacija položaja ploče; 10 - regulacija pritiska; 11 - A/D pretvarač; 12 - računar sa sistemom za akviziciju; TR - regulator temperature; TC - indikator temperature.

Na slici 2 prikazana je skica kalupa u kome je izvršeno toplo presovanje slojevitog kompozitnog materijala (na skici označen brojem 13). U kalupu je izbušen kanal (označen brojem 14) za termosprej tipa J kojim je vršeno merenje temperature.



Slika 2. Aksonometrijski prikaz alata za presovanje ploča slojevitog kompozitnog materijala.

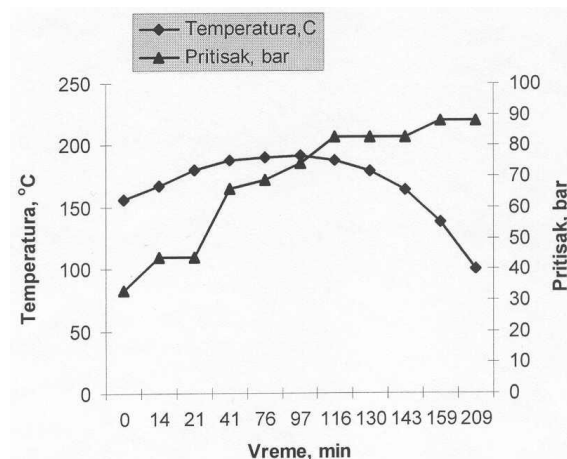
4. Opis procesa oblikovanja

Izabrani materijali (poli(p-fenilentereftalamid) i poli(vinil butiral)) su kombinovani ravnomernim sla-ganjem slojeva svakog od materijala a dobijeni sendviči su presovani u kalupu koji je obložen teflonskim sprejom. Dobijeni uzorci su hlađeni u alatu pod opterećenjem, do temperature od 100°C nakon čega su vađeni iz kalupa i ponovo podvrgavani opterećenju sve do potpunog hlađenja. Presovanje je vrše-no optimizacijom tri parametra: temperature, pritiska i vremena. Uslovi optimalnog presovanja su prikazani na slici 3.

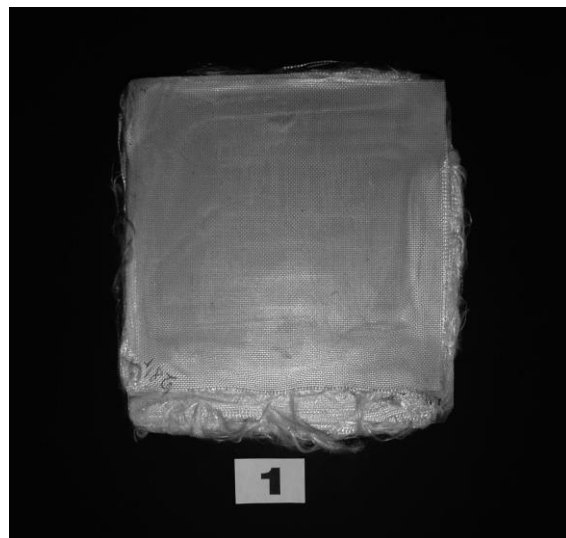
Eksperiment je urađen na setu od 14 uzoraka pripremljenih pod različitim uslovima temperature i pritiska, sa optimalnim sadržajem smole i broja slojeva para-aramidne tkanine. Na slici 4 prikazana je fotografija gotovog uzorka kompozitne ploče pripremljene pod optimalnim uslovima.

Radi poređenja napravljen je na uobičajen način i jedan uzorak sa istim ojačanjem ali sa termoreaktivnom matricom. Kao matrica korišćema je epoksidna smola CIBA AY 103 sa očvršćivačem HY 956. Uzorak je pripremljen ravnomernim premazivanjem

para-aramidne tkanine a zatim je opterećen masom od 10 kg u trajanju od 24 časa na sobnoj temperaturi. Konačna masa uzorka je 214 g, a udeo smole je 23.5%.



Slika 3. Optimalni režim toplog presovanja laminarnog kompozitnog materijala.



Slika 4. Fotografija kompozitne ploče.

5. Eksperimentalni rezultati ispitivanja

5.1. Ispitivanje kompozitnog materijala na udar velike brzine

Nakon potpunog hlađenja uzorci su balistički ispitivani, pištoljskom municijom, na proboj prema

standardu NIJ 0101.03. Za ispitivanje dobijenog kompozitnog materijala je korišćen revolver RUGER .44 MAGNUM 6" i municija tipa .44 REMINGTON MAGNUM FPJ zrno 15.6 g (240grain) pri relativnoj vlažnosti 70% i temperaturi vazduha od 19.5°C.

Rastojanje od usta cevi oružja do uzorka je 5 m a ugao ispitivanja je 90°. Iza kompozitne ploče je postavljen plastelin koji omogućava merenje dimenzija deformacije, sa zadnje strane kompozitne ploče, posle balističkog ispitivanja.

Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 3 gde **h** označava dubinu a **D** širinu otiska u plastelinu.

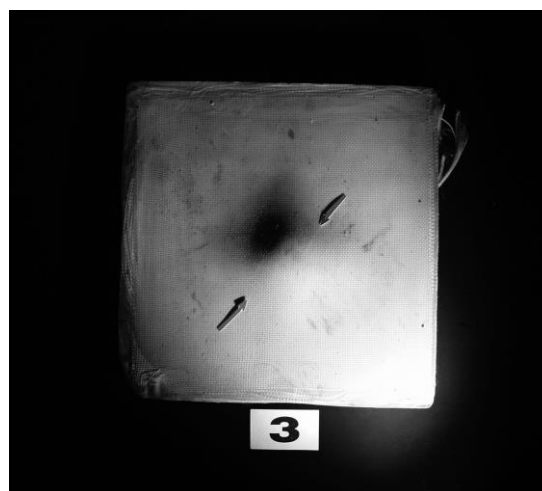
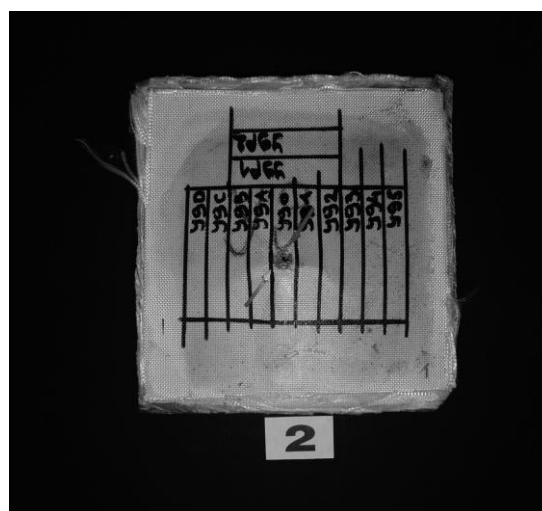
Tabela 3. Balističko testiranje kompozitnog materijala.

Uzorak	Ponašanje pri udaru [mm]		Brzina zrna [m/s]	Površinska masa [kg/m ²]	Udeo smole [%]
	h	D			
U0	15	60	418	11,20	40,0
U1	25	80	410	9,93	34,1
U2	27	82	440	10,25	36,2
U3	18	73	411	10,34	39,5
U6	27	64	425	10,41	36,0
U7	26	88	427	9,73	33,5
U9	24	86	423	9,96	34,0
U10	19	70	415	9,80	33,7
U11	27	83	418	10,18	34,8
U12	26	84	425	9,88	32,9
U13	26	75	422	9,68	31,7
U14	Proboj		430	9,25	28,5
U16	Proboj		425	8,99	29,4
U17	Proboj		428	9,04	28,9

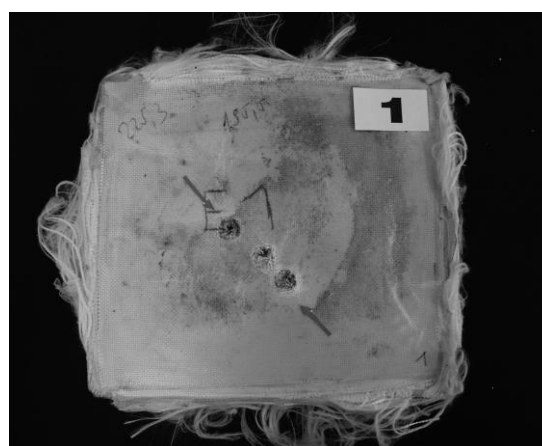
Fotografije balistički ispitivanih uzoraka su prikazane na slici 5.

Sa ciljem utvrđivanja preostale moći apsorpcije energije kompozitnog materijala sa termoplastičnom matricom urađeno je i balističko ispitivanje na tri uzastopna udara velike brzine.

Rezultati ispitivanja su prikazani na slici 6 na kojima se vidi da je materijal izdržao sva tri udara.



Slika 5. Fotografije balistički ispitivanog uzorka bez proboja sa prednje strane(2) i zadnje strane(3).





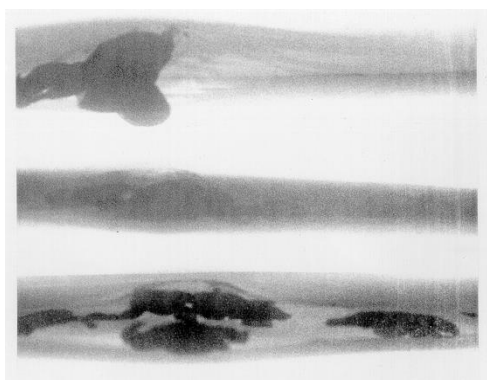
Slika 6. Fotografije prednje(1) i zadnje strane kompozitne ploče podvrgnute trostrukom uzastopnom balističkom ispitivanju.

5.2. Ispitivanje X-zracima

Nakon balističkog testiranja vršeno je ispitivanje kompozitne ploče rendgenskim zracima.



(a)



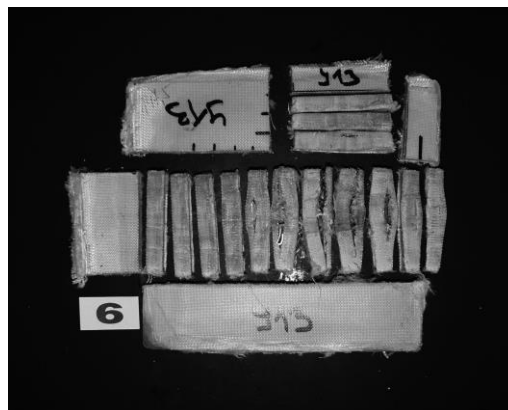
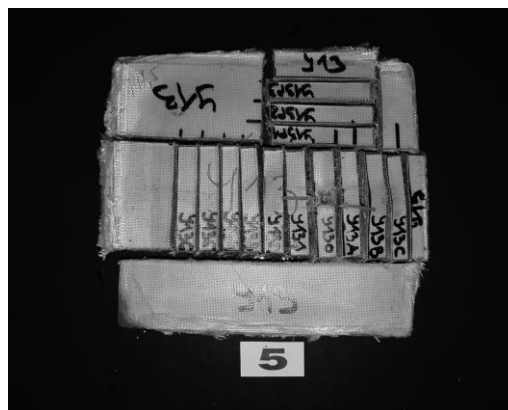
(b)

Slika 7. Rendgenski snimci kompozitnih ploča sa prednje strane (a) i bočno (b).

Ovo ispitivanje je vršeno sa ciljem utvrđivanja oblika balističkog zrna nakon prodiranja u kompozitnu ploču. Za analizu X zracima korišćen je rendgenski uređaj BALTOBLOK 200kV/10mA i FILM LAND tip 57 osetljivosti ASA 3000 ili 36 DIN. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 7 na kojoj se jasno vidi razućenost zrna nakon prodora u kompozitni materijal.

5.3. Ispitivanje udarne žilavosti

Fotografije epruveta isečenih iz balistički ispitivane kompozitne ploče, pripremljene za ispitivanje udarne žilavosti prikazane su na slici 8.



Slika 8. Fotografije isečene balistički ispitivane kompozitne ploče kao i poprečnih preseka; tokom ispitivanja nije došlo do proboja.

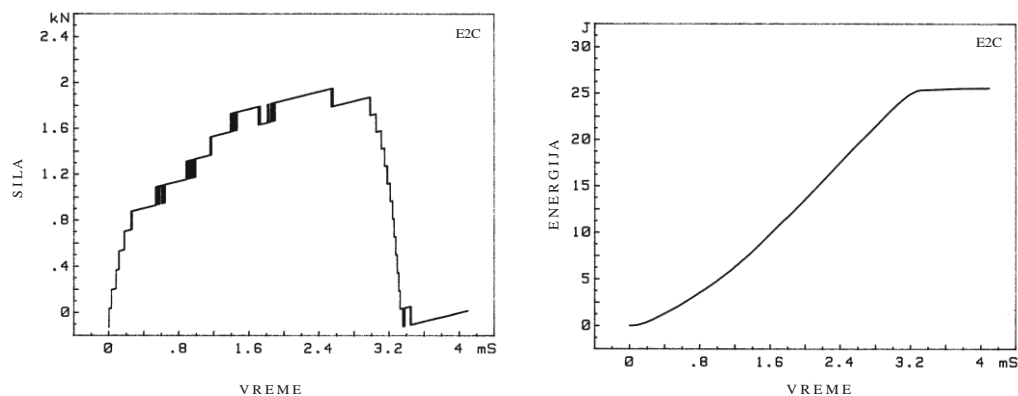
U tabeli 4 prikazani su rezultati ispitivanja udarne žilavosti uzorka E2. Uzorak je napravljen sa termoplastičnim poli(vinil butiralom) i nije ispitivan balistički. Epruvete sa oznakom L su ispitivane u

longitudinalno-transverzalnom (LT) pravcu. Na slici 9 i 10 prikazani su dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni ispitivanjem na instrumentalnom klatnu sa osciloskopom za epruvete isečene iz uzorka

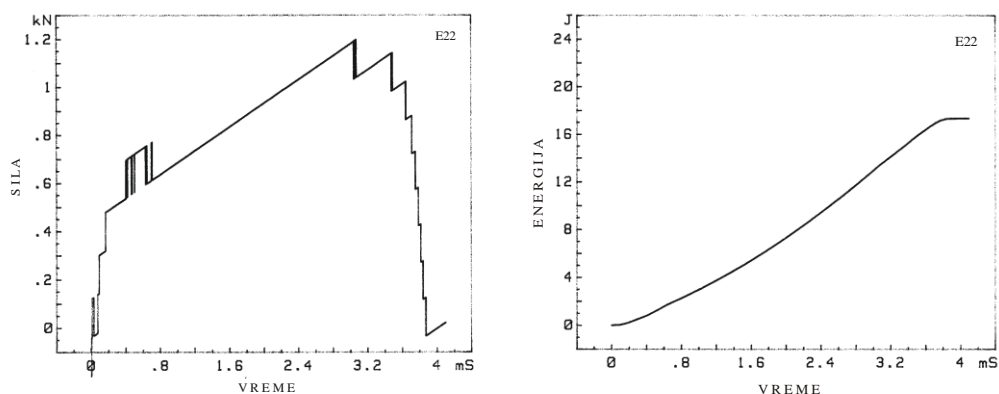
E2. Poređenjem rezultata dobijenih ispitivanjem epruvete E2C u pravcu poprečnom na vlakna i rezultata dobijenih ispitivanjem epruvete E22 u pravcu vlakana vidi se da su vrednosti energije udara i ugiba nešto veće pri ispitivanju u LT pravcu.

Tabela 4. Rezultati udarnih ispitivanja uzorka E2.

Oznaka epruvete	E_{uk} očitano [J]	Ukupna energija udara E_{uk} [J]	Energija stvaranja prsline E_{inc} [J]	Energija širenja prsline E_{tom} [J]	Ugib D_f [mm]
E2C	36,7	26	22,5	3,5	18,60
E2B	29,3	19	17,5	1,5	18,10
E2A	32,1	21	20,0	1,0	18,75
E20	25,1	14	13,5	0,5	17,75
E2P1	35,1	21	19,0	2,0	16,88
E21L	44,4	18	13,0	5,0	21,50
E22L	32,5	17	16,5	0,5	21,00
E23L	26,3	13	12,5	0,5	18,75
E24L	26,5	16	15,0	1,0	20,10
E2P2L	60,0	26	19,0	7,0	21,50



Slika 9. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete E2C u pravcu poprečnom na pravac vlakana.



Slika 10. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete E22 u LT pravcu.

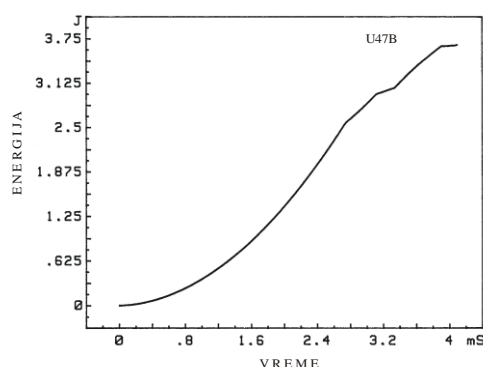
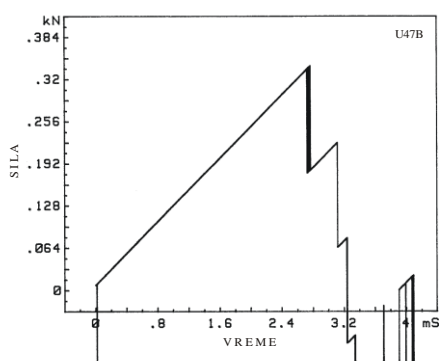
U tabeli 5 prikazani su rezultati ispitivanja udarne žilavosti uzorka U47. Uzorak je napravljen sa termoreaktivnom epoksidnom smolom i nije ispitivan balistički. Epruvete sa oznakom L su ispitivane u longitudinalno-transverzalnom (LT) pravcu vlakana.

Na slici 11 i 12 prikazani su dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni ispitivanjem na instrumen-

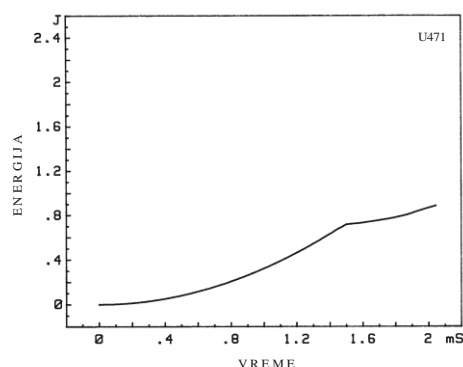
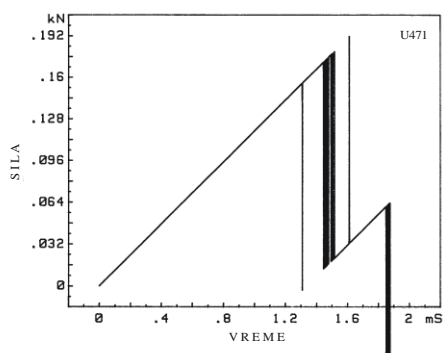
talnom klatnu sa osciloskopom za epruvete isečene iz uzorka U47. Poređenjem rezultata dobijenih ispitivanjem epruvete U471 u pravcu poprečnom na vlakna i rezultata dobijenih ispitivanjem epruvete U47B u LT pravcu primećuje se da su isto kao i kod uzorka E2 vrednosti energije udara nešto veće pri ispitivanju u LT pravcu. Vrednosti ugiba su takođe veće kod ispitivanja u LT pravcu.

Tabela 5. Rezultati udarnih ispitivanja uzorka U47.

Oznaka uzorka	E_{uk} očitano [J]	Ukupna energija udara E_{uk} [J]	Energija stvaranja prsline E_{inc} [J]	Energija širenja prsline E_{lom} [J]	Ugib D_f [mm]
U47CL	14,0	5,3	4,7	1,4	17,5
U47BL	13,5	3,7	2,6	1,1	17,5
U47AL	14,4	6,1	5,6	0,5	16,0
U471	8,8	2,0	0,7	1,3	10,0
U472	10,0	2,3	1,1	1,2	11,0
U473	6,8	1,5	0,3	1,2	5,25



Slika 11. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijen udarnim ispitivanjem epruvete U47B u pravcu poprečnom na pravac vlakana.



Slika 12. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijen udarnim ispitivanjem epruvete U471 u LT pravcu.

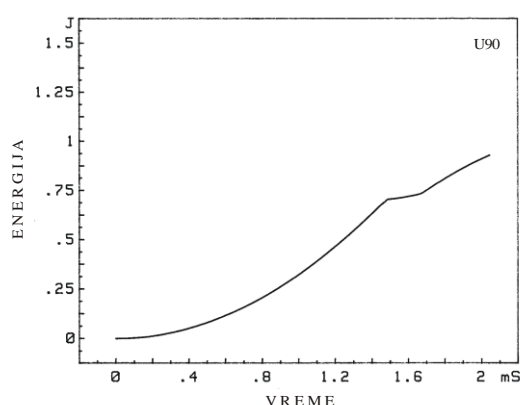
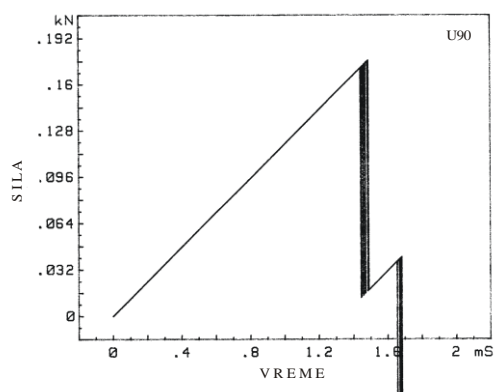
Poređenjem rezultata ispitivanja energije udara uzorka E2 sa termoplastičnom matricom i U47 sa termoreaktivnom matricom uočavaju se znatno veće vrednosti za kompozitni materijal sa termoplastičnom matricom. Takođe se može primetiti da su kod uzorka E2 vrednosti energija stvaranja prsline uvek veće od vrednosti energija širenja prsline, što ukazu-je na duktilno ponašanje materijala. Isti odgovor se može uočiti kod uzorka U47 ispitivanog u pravcu poprečno na pravac vlakana, međutim, kod ispitivanja U47 u LT pravcu može se primetiti da su vrednosti energija širenja prsline veće od vrednosti energija potrebnih za njeno stvaranje. Drugim reči-ma, materijal nema duktilno ponašanje jer matrica dobro

ne prenosi opterećenje sa sloja na sloj. U tabeli 6 prikazani su rezultati ispitivanja udarne žilavosti uzorka U9. Uzorak je napravljen sa termoplastičnim poli(vinil butiralom) i ispitivan je balistički. Tokom ispitivanja nije došlo do proboja.

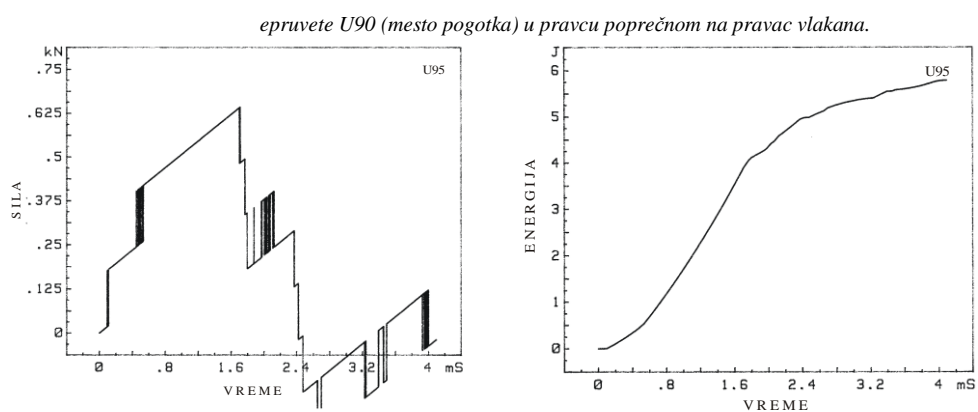
Na slikama 13, 14 i 15 prikazani su dijagrami sila-vreme, energija-vreme i sila-ugib dobijeni ispitivanjem na instrumentalnom klatnu sa osciloskopom za epruvete isečene iz uzorka U9. Sve epruvete su ispitivane u pravcu vlakana. Primećeno je da shodno očekivanjima, energija udara i ugib rastu sa porastom rastojanja od mesta prodora zrna.

Tabela 6. Rezultati udarnih ispitivanja uzorka U9.

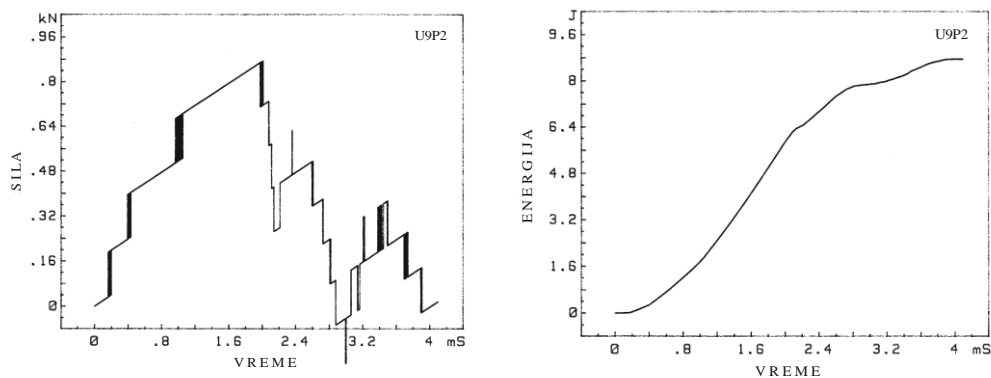
Oznaka uzorka	E_{uk} očitano [J]	Ukupna energija udara E_{uk} [J]	Energija stvaranja prsline E_{inc} [J]	Energija širenja prsline E_{lom} [J]	Ugib D_f [mm]
U9C	7,9	1,8	0,2	1,6	2,9
U90	10,0	1,4	0,7	1,1	9,1
U92	8,0	2,5	0,1	2,4	1,6
U93	11,1	2,2	1,55	0,65	13,1
U94	10,7	1,3	0,25	1,05	1,9
U95	16,3	5,8	4,00	1,80	13,5
U9P1	12,8	3,1	2,38	0,72	13,0
U9P2	21,6	8,8	5,20	3,60	16,2



Slika 13. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijen udarnim ispitivanjem



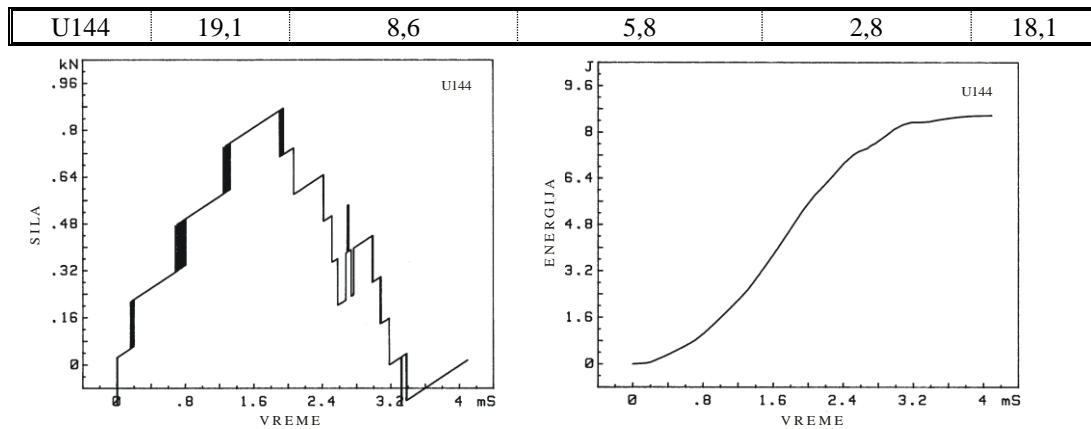
Slika 14. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete U95 (5 cm udaljene od mesta proboja) u pravcu poprečnom na pravac vlakana.



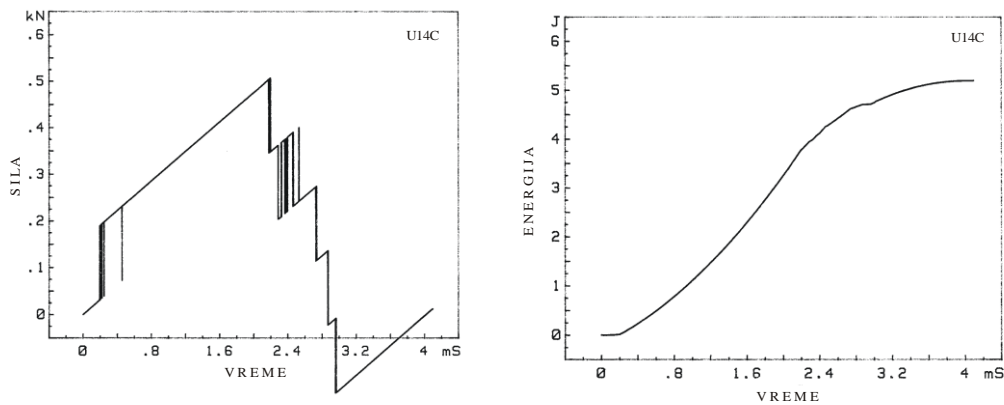
Slika 15. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete U9P2 (7 cm udaljene od mesta pogotka) u pravcu poprečnom na pravac vlakana.

Tabela 7. Ispitivani uzorak U14.

Oznaka epruvete	E_{uk} očitano [J]	Ukupna energija udara E_{uk} [J]	Energija stvaranja prsline E_{inc} [J]	Energija širenja prsline E_{lom} [J]	Ugib D_f [mm]
U14C	14,0	5,2	3,8	1,45	16,0
U14B	10,3	2,0	1,1	0,9	11,0
U1411	8,7	2,6	0,8	1,85	7,5
U1421	11,6	4,0	3,0	1,0	11,2
U1431	13,5	5,1	4,0	1,1	13,75
U14C1	19,8	11,0	9,5	1,5	20,0
U14B1	15,5	6,6	4,8	1,8	13,75
U14A1	12,2	2,3	0,45	1,85	3,75
U141	14,4	5,1	4,5	0,6	13,1
U142	16,3	5,9	3,8	2,15	15,0
U143	18,6	9,0	6,8	2,2	15,0



Slika 16. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete U144 (4 cm udaljene od mesta proboja) u pravcu poprečnom na pravac vlakana.



Slika 17. Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete U14C (2 cm udaljene od mesta proboja) u pravcu poprečnom na pravac vlakana.

U tabeli 7 prikazani su rezultati ispitivanja udarne žilavosti uzorka U14. Uzorak je napravljen sa termoplastičnim poli(vinil butiralom) i ispitivan je balistički. Tokom ispitivanja je došlo do proboja.

Na slici 16 i 17 prikazani su dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni ispitivanjem na instrumentalnom klatnu sa osciloskopom za epruvete isečene iz uzorka U14. Ispitivanje je vršeno u pravcu vlakana. Kao i u prethodnom sličaju sa porastom udaljenosti od mesta proboja raste i vrednost energije udara i ugiba.

6. Zaključak

Tokom izrade slojevitog kompozitnog materijala sa termoplastičnom matricom određeni su optimalni

parametri procesa oblikovanja kao i optimalan sadržaj smole.

Eksperimentalna ispitivanja slojevitog kompozitnog materijala ukazala su na činjenicu da kompozitni materijali sa termoplastičnom matricom imaju 5.5 puta veću vrednost udarne žilavosti od kompozitnih materijala sa termoreaktivnom matricom te samim tim i veću otpornost na udar. Takođe je značajno napomenuti da kompozitni materijal sa termoplastičnom matricom nakon balističkog ispitivanja značajno gubi moć apsorpcije energije po svojoj zapremini ali su vrednosti energije udara i dalje veće

nego kod kompozitnog materijala sa termoreaktivnom matricom koji nije balistički ispitivan. Dalja balistička ispitivanja su pokazala da kompozitni materijal sa termoplastičnom matricom zadržava otpornost na udar i posle tri uzastopna ispitivanja na udar velike brzine.

Efekat razuđenosti zrna je karakterističana pojava prilikom balističkog ispitivanja materijala velike tvrdoće. Prilikom ispitivanja žilavih materijala zrno se deformiše u oblik pečurke tako da efekat razuđenosti nije očekivan ali je pozitivan i značajan.

Na osnovu mikromehaničke analize slojevitih kompozitnih materijala kao ortotropnih materijala utvrđuje se da su osnovna svojstva koja određuju ponašanje kompozitnih materijala pri prodiranju projektila u kompozitnu ploču njegova elastičnost i žilavost.

Osnovna svojstva elastičnosti kompozitnog materijala (modul elastičnosti, modul smicanja i Poissonov odnos) određeni su karakteristikama elastičnosti vlaknastog ojačanja i njegovim masenim ude-lom. Efekat unutrašnjeg prigušivanja a samim tim i disipacije energije u kompozitnom materijalu može se povećati ukoliko se koristi matrica sa izraženim viskoelastičnim svojstvima (termoplastični polimer-ni materijal) i anelastičnim svojstvima (termoplastični elastomeri).

Za povećanje žilavosti kompozitnog materijala potrebno je u njihovu strukturu ugraditi takve mehanizme koji će rasipati mehaničku energiju po velikoj zapremini što se može postići na tri načina:

1. Korišćenjem matrice sa visokom vlastitom žilavošću i dobrom čvrstoćom na smicanje.
2. Laganim snižavanjem adhezije između slojeva laminata.
3. Upotrebom ojačavajućih vlakana sa povećanim relativnim izduženjem.

Na osnovu napred iznetih kriterijuma izvršen je izbor polaznih konstituenata za izradu kompozitnih materijala otpornih na balistički udar pištoljskog zrna.

Literatura:

- [1] M. E. Tohlen; Generation of Design Allowables; *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, pp. 308-312, 1998.
- [2] M. W. Wardle; *Designing Composite Structure for Toughness*; Technical Symposium V, Design and Use of Kevlar Aramid Fiber in Composite Structures, 1984.
- [3] F.R. Jones; *Handbook of Polymer-Fibre Composites*; Longman, 29-48, 231-234, 265-285, 1994.
- [4] T. W. Clyne, F. R. Jones; Composites: Interfaces; *Encyclopedia of Materials: Science & Technology*, Part Composites, Elsevier, 2001.
- [5] J. K. Chen, D. F. Medina; The effects of projectile shape on laminated composite perforation; *Composites Science & Technology* 58(10), 1629-1639, 1998.
- [6] H. Kasano; Recent advances in high-velocity impact perforation of fiber composite laminates [Review]; *JSME International Journal Series A-Solid Mechanics & Material Engineering* 42(2), 147-157, Apr. 1999.
- [7] H.M. Wen, T.Y. Reddy, S.R. Reid, P.D. Soden; *Indentation, penetration and perforation of composite laminates and sandwich panels under quasi-static and projectile loading*; Book Editors Kim JK, Yu TX; Impact Response and Dynamic Failure of Composites and Laminate Materials, pts 1. and 2., 141-1 (Part 1-2), pp. 501-552, 1998 [Figures] [Plates].
- [8] R.H. Zee, C.Y. Hsieh; Energy absorption processes in fibrous composites; *Materials Science & Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure & Processing* 246(1-2), 161-168, May 15, 1998.
- [9] E.P. Gellert, S.D. Pattie, R.L. Woodward; Energy transfer in ballistic perforation of fibre reinforced composites; *Journal of Materials Science* 33(7), 1845-1850, Apr. 1998.
- [10] I.D. Živković, P.I. Perišić, R.R. Aleksić; Otpornost polimernih kompozitnih materijala na udar velike brzine; *21. Internacionalna konferencija*, Zbornik radova, Tara, novembar 2001.
- [11] I.D. Živković, P.I. Perišić, Z.H. Burzić, S.S. Putić, R.R. Aleksić; Aramid fiber reinforced laminar thermoplastic composite materials; *Proc.23rd SAMPE Europe Int. Conf.*, Pariz, april 2002.

- [12] I.D. Živković; *Udarna žilavost slojevitih kompozitnih materijala para-aramidno vlakno – poli(vinil butiral)*, magistarski rad, TMF Beograd, april 2002.