



УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ - ШТИП
ТЕХНОЛОШКО-ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ИНДУСТРИСКИ ДИЗАЈН НА ТЕКСТИЛ
ШТИП

НАТАША МИРЧЕСКА

**ТЕКСТИЛ ЗА БАЛИСТИЧКА ЗАШТИТНА ОБЛЕКА - АПЛИКАЦИЈА И
ПЕРФОРМАНСИ**

МАГИСТЕРСКИ ТРУД

ШТИП, НОЕМВРИ, 2017 година

Наташа Мирческа

Текстил за балистичка заштитна облека - апликација и перформанси

Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип

Комисија за оценка и одбрана

Ментор: **Д-р Димко Димески**
Вонреден професор на Технолошко-технички факултет,
Универзитет Гоце Делчев - Штип

Член: **Д-р Винета Сребренкоска**
Редовен професор на Технолошко-технички факултет,
Универзитет Гоце Делчев - Штип

Член: **Д-р Светлана Ристеска**
Вонреден професор на Институтот за современи композити
и роботика во Прилеп

Научно поле: Текстилно инженерство (223)

Научна област: Текстилни и технички влакна (22300),
Хемија на текстилот (22302)

Датум на одбрана: _____

ПОСВЕТА И БЛАГОДАРНОСТ

- Чест и задоволство ми е да изразам искрена и огромна благодарност на мојот ментор **проф. д-р Димко Димески** за неизмерната и безрезервна поддршка во текот на целокупното мое студирање, како и за поддршката и стручните совети во текот на изработката на магистерската работа, за укажаната помош, за стручните совети, за изборот на методите и насоките и за конечното оформување на овој магистерски труд.
- Изразувам благодарност до членовите на комисијата за поддршката и стручните совети во текот на изработката на магистерската работа.
- На крајот сакам да изразам благодарност до моето семејство кое безрезервно ме поддржуваше и ми помагаше при изработката на магистерскиот труд.

Рецензирани и објавени трудови

1. Dimeski.D, Srebrenkoska.V, Mirčeska.N, (2015). Ballistic impact resistance of woven fabrics andtheir composites, International Journal of Engineering Research / Technology (IJRET), Vol. 4 Issue 12 December 2015, ISSN 2278-0181

ТЕКСТИЛ ЗА БАЛИСТИЧКА ЗАШТИТНА ОБЛЕКА - АПЛИКАЦИЈА И ПЕРФОРМАНСИ

Апстракт

Предмет на овој магистерски труд се композитните материјали врз база на зајакнувачки влакна и полимерна матрица наменети за лична балистичка заштита. Извршен е избор на термореактивна полимерна матрица, погодна за импрегнација на зајакнувачки ткаенини во индустриски услови на производство. Заради своите поволни технички карактеристики, достапноста и цената на чинење, избрана е фенол-формалдехидна смола од резолен тип за општа намена. За прилагодување кон дадената намена потребно беше да се отстрани „вродената“ кртост на смолата. Тоа е сторено со нејзина модификација со различни концентрации на поливинилбутирал (PVB). Испитувањето на силата на смолкнување и на балистичките карактеристики на композитите покажа дека најдобри резултати се постигнуваат кога односите на сувите супстанции на фенолната смола и PVB е 1:1.

Испитувањето на зависноста на балистичката јакост од површинската маса кај сите композити покажа нејзино линеарно зголемување со зголемувањето на површинската маса без разлика на односот на конститuentите во композитот. Испитувањето на влијанието на содржината на конститuentите покажа дека односот смола/зајакнувач од 20/80 поседува најдобри балистички карактеристики. Со зголемување на содржината на смолата од 20% до 50% балистичката јакост кај сите композити значително се намалува што потврдува дека влакната кај композитите имаат носечка улога за нивните балистички перформанси. Како зајакнувачки влакна во композитите се користени арамидни и високоперформансни полиетиленски влакна, исткаени во ткаенини со платнен преплет. Испитувањето на композитите покажа дека најдобри балистички перформанси покажуваат композитите врз база на високоперформансни полиетиленски влакна, а незнатно послаби перформанси покажаа арамидните. Испитувањето на влијанието на притисокот на пресување покажа зголемување на балистичката јакост кај еднонасочните композити со зголемување на притисокот, додека кај двонасочните композити не е забележена закономерна промена. При еднаква површинска маса еднонасочните композити покажаа повисоки вредности за карактеристиката V_{50} од двонасочните. Мерењето на трауматолошкиот ефект кај двонасочните композити покажа помала површина и поголема длабина за разлика од еднонасочните каде што беше зафатена поголема површина, но со помала деформација на задната страна од композитот.

Клучни зборови: високоперформансни полиетиленски влакна, арамидни влакна балистички композити, V_{50} , симулатори на фрагменти, лична балистичка заштита.

TEXTILES FOR BALLISTIC PROTECTION – APPLICATION AND PERFORMANCES

Abstract

The subject of this study are the composite materials based on reinforcing fibers and polymer matrix designed for personal ballistic protection. A thermosetting polymer matrix suitable for impregnating reinforcing fabrics on industrial scale of production was chosen. Because of its favourable technical properties, availability and price, a general purpose phenol-formaldehyde resin of resol type was chosen. To make the resin appropriate for the intended application it was necessary to overcome its intrinsic brittleness. It was done by modification of the resin with different quantities of polyvinylbutyral (PVB). The results of the shear strength test of the modified resin system as well as the results of the ballistic performances test have shown that the best results are achieved when the ratio of the dry content of the resin system and PVB is 1:1.

As reinforcing fibers for the composites, aramide and high-performance polyethylene, (HPPE), plain woven fabrics were used. Ballistic test of the composites have shown that the best results exhibit HPPE composites, followed by the aramide composites which show slightly lower values. The ballistic strength dependence of the areal weight of the composite panels test has shown linear increase of the ballistic strength with the increase of the areal weight in all composites indifferently of the fiber/matrix ratio.

The investigation of the influence of fiber/matrix ratio on ballistic performance has shown best results by 80/20 ratio. By increasing the resin content from 20 % to 50 % the ballistic performances, of the all four composites proportionally decrease, proving that the fibers have decisive role in ballistic performances of the composites.

The test of the influence of the molding pressure on ballistic properties has shown an right-proportional dependence of the ballistic strength of the unidirectional composites of the molding pressure, but in the case of the bidirectional composites a regular dependence wasn't noticed.

By equal areal weight, unidirectional composites exhibit higher V50 values than the bidirectional composites. Blunt trauma effect by bidirectional composites has shown smaller area but higher depth compared with unidirectional composites which show bigger area but lower depth of deflection of the back of the panel.

Key words: ballistic composites, aramide fibers, high-performance polyethylene fibers, V50, fragment simulating projectiles, personal ballistic protection.

Содржина

1. Вовед	4
1.1. Балистика	5
1.1.1. Поим и поделба на балистиката	5
1.1.2. Балистичката заштитна	6
2. Литературен преглед	10
3. Цел на магистерскиот труд	27
4. Композитни материјали за лична балистичка заштита	29
4.1. Смоли како матрица за композитните материјали	29
4.2. Влакна како зајакнувачки систем за композитните	32
4.2.1. Арамидни влакна	32
4.2.2. НРРЕ влакна	34
4.3. Балистички карактеристики на композитните материјали	36
4.3.1. Дефиниција на балистичката карактеристика V_{50}	37
4.3.2. Трауматолошки ефект	39
5. Суровини за композити за лична балистичка заштита	40
5.1. Смолен систем	40
5.1.1. Подготовка на смолниот систем	40
5.1.2. Карактеризација на смолниот систем	41
5.2. Зајакнувачки систем	44
5.2.1. Ткаенини	44
5.2.2. Еднонасочни препрези	45
6. Композити за балистичка заштита	46
7. Методи за карактеризација на балистичките	49
7.1. Испитување на V_{50}	49
7.2. Испитување на трауматолошкиот ефект	51
8. Особини на композитите	53
8.1. Механички особини на композитите	53
8.2. Балистички особини на композитите	56
9. Влијание на односот влакна/матрица врз балистичката јакост на композитите	60

10. Влијание на површинската маса при минимална и максимална содржина на матрица врз балистичката јакост	65
11. Заклучок	81
12. Литература	84
Листа на табели	91
Листа на слики	93

1. BOBED (INTRODUCTION)

Темата што е предмет на овој магистерски труд, личната балистичка заштита или балистичката заштита во општа смисла на зборот, не е доволно публикувана во споредба со другите области од доменот на композитните материјали зајакнати со влакна. За тоа постојат причини од безбедносен и од економски карактер. Балистичката заштита е предмет на интересирање првенствено на војската и на полицијата на една земја. Средствата за балистичка заштита се сметаат за производ од многу доверлив карактер така што документацијата во врска со овој предмет најчесто носи ознака „доверливо“, „тајна“, „воена тајна“ и не е за јавно објавување. Иако тие имаат „хуман“ односно дефанзивен карактер бидејќи се користат за да спасат, а не да уништат животи, во воениот конфликт се исто толку важни како и офанзивното оружје. Кога една од конфликтните страни во воен судир би знаела со каков вид заштита се штити спротивната страна, би употребила соодветно офанзивно оружје од кое не штити балистичката опрема. Затоа не е пожелно непријателот да го знае нивото односно слабите точки на балистичката заштита, без разлика дали се работи за персонална заштита или за заштита на воени добра - возила, фортификации итн.

Од друга страна, од економска гледна точка, личната балистичка заштита е многу лукративен бизнис на една многу голема индустрија во светот, пред сè, во САД, во Западна Европа, во Израел, во Руската Федерација... Оттука, покрај безбедносните причини за непубликување од оваа област се надоврзуваат и економските, па истражувањата и резултатите од нив се класифицираат како „индустриска тајна“ односно како „економска тајна“, токму заради заштита од сè поагресивната економска односно индустриска шпионажа.

Истражувањата од оваа област најчесто се вршат по порачка односно по договор на заинтересираната страна (најчесто државна институција) со соодветна истражувачка установа така што резултатите од истражувањата не се за јавно објавување, туку се сопственост на нарачателот и се наменети за негова лична употреба. Оттука можеби не е ни толку чуден фактот што од оваа област многу малку се објавуваат резултати од истражувањата[1]. Истражувањата што се презентирани во овој труд се од апликативен карактер и се во функција на исфрлање на пазарот нов, поквалитетен и поконкурентен производ на фирмата „11Октомври-Еурокомполит“ - Прилеп.

1.1. БАЛИСТИКА

1.1.1. ПОИМ И ПОДЕЛБА НА БАЛИСТИКАТА

Балистиката е наука за движењето на телата односно проектите и ракетите во услови на гравитација и атмосферски влијанија. За потполно изучување на процесите што се одвиваат при испукувањето на еден проектил, од иницирање на неговото потисно палење, преку неговото движење во цевката, појавите што се случуваат при напуштањето на цевката или лансерот и летот во атмосферата, па сè до ударот во целта и ефектите што ги предизвикува врз целта, може да се направи една подетална поделба на балистиката како научна дисциплина на неколку поддисциплини.

- **Внатрешна балистика** се занимава со изучување на термодинамичките процеси што се одвиваат за време на согорувањето на барутното полнење како и соодветните феномени на пропација на барутните гасови во цевката или комората на оружјето.

- **Преодната балистика** се занимава со изучување на преодот од внатрешната кон надворешната балистика. Ги проучува појавите што се случуваат во близината на устата на цевката, односно дејството на барутните гасови врз проектилот на излезот од цевката од оружјето.

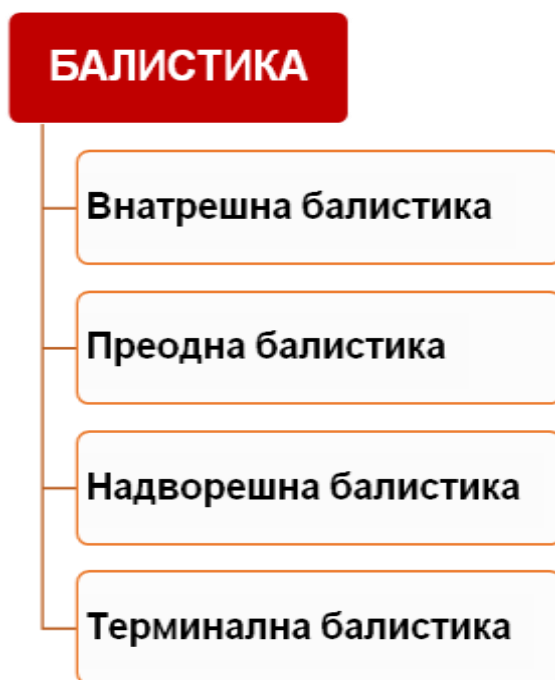
- **Надворешна балистика** се занимава со изучување на летот односно со движењето на проектилот од напуштањето на цевката на оружјето односно лансерот кога на него престанале да дејствуваат барутните гасови, па сè до ударот во целта или експлодирањето во воздух.

- **Терминалната балистика** односно балистика на целта се занимава со изучување на ефектите што ги предизвикува проектилот кога ќе удри во целта односно контраефектите што ги предизвикува целта врз проектилот при балистичкиот удар.

Покрај оваа основна и општоприфатена поделба на балистиката илустрирана на

сликата бр. 1 кај разни автори [2] може да се сретне уште подетална поделба како: **балистика на малокалибарско (ситно) оружје** (*small arms ballistics*) којашто се занимава со изучување на балистичките феномени што ги предизвикуваат проектили испалени од малокалибарско оружје (пушки, пиштоли). Ако цел на балистичкиот удар не е тврд или течен објект, туку е човек или животно (односно биолошко ткиво) тогаш место за терминална балистика, зборуваме за **балистика на рани** (*wound ballistics*) која го проучува движењето на проектилот низ телото и дејството врз органите и коските. Блиска на оваа поддисциплина е **судската балистика** (*forensic ballistics*) којашто служи како сервис при судско-медицински вештачења.

Предмет на нашето понатамошно изучување ќе биде исклучиво терминалната балистика од малокалибарско оружје.



Слика 1. Генерална поделба на балистиката
Figure 1. General classification of ballistics

1.1.2. БАЛИСТИЧКАТА ЗАШТИТА

Балистичката заштита е предмет на изучување на терминалната балистика којашто се занимава со проучување на ефектите што ги предизвикува проектилот кога ќе удри во целта.

Во зависност од тоа што се зема како критериум за поделбата, балистичката

заштита се дели на подобласти како што е илустрирано на сликата бр. 2. Ако како критериум се зема видот на материјалот од којшто е направена балистичката заштита, таа се дели на: метална, керамичка, пластична/транспарентна и композитна/текстилна. Секоја од овие групи понатаму се дели на подгрупи. Така, на пример, металната, според видот на употребениот метал се дели на: челична, алуминиумска, титанска итн. Керамичката според типот на употребената керамика се дели на: алуминиумска (Al_2O_3), силициумова (SiC), борна(B_4C) итн.



Слика 2. Поделба на балистичката заштита
 Figure 2. Classification of ballistic protection

Пластичната заштита се дели според типот на материјалот (на пример, поликарбонатна) и според тоа дали е транспарентна или не. Композитната/текстилната заштита, според физичката состојба на материјалот, се дели на тврда и мека. Во тврдата заштита спаѓаат композитите, додека во меката спаѓаат ткаенините, филцовите и еднонасочните (UD) композитни ленти.

Ако како критериум се земе предметот на балистичката заштита, тогаш поделбата е на

- лична (персонална) балистичка заштита и
- балистичка заштита на материјални добра - сопственичка.

Личната балистичка заштита, како што покажува саатот, служи за балистичка заштита на физички лица. Во оваа заштита спаѓаат: елеци (за под одело и над одело), шлемови, штитови, инсерти за елеци и др.

Под сопственичка заштита се подразбира заштита на објекти односно сопственост, како на пример: возила, врати, прозорци, банки, шалтери, засолништа, простории итн.

Ако како критериумот се земе опасноста од којашто треба наменета да штити, персоналната балистичката заштита се дели на:

- заштита од фрагменти и
- заштита од куршуми.

Анализите што американските лекари ги правеле на повредите на војниците од различни конфликти во светот (Виетнам, Кореја) покажале дека многу повеќе повреди се предизвикани од фрагменти отколку од директни погодоци со куршуми. Обработката на тие податоци покажала дека 75-80 % од смртоносните повреди и 85 % од несмртоносните повреди биле предизвикани од фрагменти. Тоа се делови (шрапнели, парчиња) од експлодирани мини, гранати и бомби. При експлозијата на овие боеви средства се создаваат фрагменти со различна големина, облик и брзина на движење кои се смртоносни во определен радиус од тестото на експлозијата.

Типичната дистрибуција на фрагменти од експлодирани гранати е прикажана во табелата бр. 1 [3].

Табела 1. Дистрибуција на фрагменти од експлодирани артилериски гранати
 Table 1. Distribution of fragments of exploded artillery grenades

Маса на фрагментот Fragment mass	Дистрибуција на фрагментите Fragments distribution
0.1g - 1.0g	77%
1.0g - 10.0g	21%
10.0g- 140.0g	2%

Горната табела покажува колку е важна заштитата во опсегот од ~1g. Затоа и заштитната опрема (елеците, шлемовите, плочите и сл.) се тестира со стандардни фрагменти од овој опсег: 1.102g (Stanag 2920), 1.082g (US-Mil-Std-662E), 1,5g (македонскиот стандард).

На опасност од дејството на фрагменти најчесто е изложена војската и затоа балистичките елеци и шлемови што се наменети за војската треба да штитат најмногу од фрагменти. Нивното тестирање се врши со проектили што симулираат фрагменти (FSP, Fragment Simulating Projectiles). За разлика од војската, полицијата е најчесто изложена на опасност од стрелачка муниција (пиштолска и пушкина) и затоа елеците и шлемовите што се наменети за полицијата треба да штитат од ваков вид опасност. Заштитното ниво од стрелачка муниција е опишано во посебни стандарди. Најексплоатиран и највлијателен во светот е американскиот полициски стандард NIJ 0101.03.

Треба да се знае дека опасноста од фрагменти и куршуми е сосема различна. Основната разлика меѓу фрагментите и муницијата е во тоа што зрното од муницијата има дефиниран правилен геометриски облик, има дефинирана маса и се деформира при ударот во целта, додека фрагментите немаат дефиниран облик, немаат дефинирана маса и не се деформираат при ударот во целта. Заради тоа опремата што штити од фрагменти не значи дека ќе штити и од стрелачка муниција, што е и потврдено во практиката.

2. ЛИТЕРАТУРЕН ПРЕГЛЕД (LITERATURE REVIEW)

Кога се зборува за современа балистичка заштита се мисли на заштита врз база на композити (пластика зајакната со текстилни влакна, односно текстилни ткаенини, ленти или филц). Во сите случаи се работи за апликација на текстилни влакна.

Балистичката заштитата врз база на текстилни влакна е важна од неколку причини. Бидејќи човекот користи облека во секојдневниот живот, заштитните средства коишто би можеле да се инкорпорираат во облеката овозможуваат најкомфорен, најкомпатибилен и најневпечатлив начин за остварување на таква заштита. Друга причина е што влакнестата форма дава најголема јакост и модул што може да се добие од даден синтетички полимер. Тоа се должи, главно, на процесот на извлекување кој ги ориентира молекулите по должината на оската на влакното зголемувајќи ја јакоста и крутоста од една страна, а од друга страна прави природен механизам (сгаск arresting mechanism) за спречување на проширувањето на пукнатините (односно дефектите) во материјалот [4].

Во природата, вродена „технологија“ за производство на вакви материјали, имаат свилената буба и пајакот.

Токму за производот од свилената буба има запис [5,6] дека тој е првиот текстилен материјал што се користел за лична заштита. Имено, во средниот век Јапонците користеле персонален оклоп (armor) од свилена ткаенина чија апликација до 19 век се проширува и во други делови од светот. Првите записи за користењето на мека текстилна заштита во САД потекнуваат од крајот на 19 век [7]. Во тоа време воениот естаблишмент ја разгледувал можноста за користење на мека заштита од свилена ткаенина. Но, елците направени во тоа време се покажале како ефикасни само против куршуми со мала брзина (до 120m/s), а не биле ефикасни против новата генерација на муниција која што се појавила во почетокот на 20 век и се движела со брзина поголема од 180 m/s.

И покрај овие повремени спомнувања на лична балистичка заштита (ЛБЗ) врз база на ткаенина, дури истражувањата на Carothers во лабораториите на Du Pont во раните 1930-ти години ја направија ЛБЗ врз база на ткаенини, реалност. Истражувањето на Carothers во областа на макромолекулите доведе до откривање на полиамидните односно најлонските влакна. Во исто време во фирмата Owens-Corning Glass, во 1932 година, Dale Kleist го открива стакленото влакно така што двете балистички влакна се појавуваат пред Втората светска војна. Во почетокот

на Втората светска војна најлонот имал јакост 0.6-0.7 N/tex, што била извонредна вредност за тоа време. Ткаенина врз база на ова влакно со површинска маса од 475 g/m² била употребена за изработка на пилотски џемпери, додека за завеси за пилотските кабини биле користени ткаенини со маса од 15.2 kg/m² и 7.1 kg/m². Лекарите коишто ги проучувале повредите од воените конфликти во тоа време откриле дека проектили (маса 1.1 g и калибар 5.56 mm) со брзина од 243 m/s го пробиваат човековото месо, а со брзина од 373 m/s ги пробиваат коските. За жал таквиот пешадиски елек штител само од проектили со помали брзини од овие.

Многу истражувања се вршени за да се определи релативната балистичка отпорност од различни влакнести материјали во корелација со нивните механички особини. Weiner и Vadala [8] при Natic Research and Development Command (САД) проучувале два типа ацетатни (Fortisan и X- 36) влакна и најлонски и стаклени влакна преработени во ткаенини. Најлоши балистички карактеристики покажала стаклената ткаенина со вредности помали од 335 m/s за површинска маса од 7.6 kg/m². Најдобри карактеристики покажале најлонските влакна издржувајќи брзини од 372- 384 m/s (во зависност од видот на ткаенината), а блиску до нив биле ацетатните влакна со вредност од 370 m/s. Механичките испитувања што ги вршеле на стаклените влакна покажале многу мало издолжување при прекин (1-2%) што можеби е и објаснување за нивните лоши балистички карактеристики [4].

Susich et al. [9] направиле поинаков пристап и по балистичкиот удар врз најлонската плоча со симулатор од 1.1 g, ја пресекле плочата на местото на ударот за да ја проучуваат слој по слој. Влакната што биле прекинати на местото на ударот на проектилот ги проучувале со помош на поларизационен микроскоп. Вршеле проучување на влакната преку промените во рефракцијата во функција од растојанието од местото на ударот. Заклучиле дека перманентна промена во влакната била ограничена само на релативно мала површина околу траекторијата на проектилот. Исто така, забележале значително топење на краевите од влакната близу перфорацијата во плочата. Понатамошните проучувања им ја наметнале хипотезата дека преплетените влакна спречуваат поголема распределба на енергијата и со тоа поголема балистичка отпорност.

Cosgrah и Morgan [10] извршиле многу детални и важни истражувања на балистичките особини на предива и ткаенини. Но, заради рестрикција во објавувањето на тајни податоци, нивните резултати не се целосно јавно презентирани. Тие го проучувале ефектот на температурата врз балистичките особини. Откриле дека со зголемување на температурата при којашто се врши

тестот, се намалува балистичката отпорност кај најлонот и тоа : 4% на 100 °C, 10% на 175°C и 18% на 215°C. Во споредба со драстичниот губитокот на јакоста на најлонот при дејство на вака високи температури (повеќе од 60% при 215°C) балистичките губитоци се сосема мали. На -40 °C балистичката отпорност се зголемила за 7%. И во овој случај се јавува промена во иста насока со промената на јакоста (се зголемува на пониски температури), но повторно балистичката јакост не се менува пропорционално.

Понатаму, од сите синтетички комерцијални влакна во тоа време (полиестерски, ацетатни, Fortisan...) се добиени ткаенини што се балистички испитувани, но само свилата покажала посупериорни особини од најлонот.

Во тоа време (1955) Meredith [11] многу детално ги проучувал механичките особини на свиленото предиво. За разлика од многу други материјали издолжувањето при прекин кај свилата расте со порастот на брзината на оптоварувањето. Исто така е заклучено дека и јакоста и модулот растат со порастот на брзината на оптоварувањето. Спрема тоа, извршената работа до прекинување при поголеми брзини на оптоварување е поголема од онаа при нормални брзини. Ова е, можеби, логичното објаснување за одличните балистички перформанси на свилата. Имено, свилата има способност да апсорбира поголема енергија при поголеми брзини на оптоварување. Но, големите корисници на ЛБЗ, војската и полицијата не ги искористуваат овие супериорни балистички карактеристики од аспект на нејзина апликација. Причини за тоа има повеќе: свилата е чувствителна на дејство на микроорганизми, количински е ограничена и е подложна на промена на цената заради временските влијанија и побарувачката. Ваква несигурност на клучната суровина не можеле да си дозволат ни едните ни другите. Важноста на ова истражување и денес е во тоа што тоа покажа дека статичката јакост на затегнување не е единствен фактор за балистичката ефикасност.

Во 60-тите години од минатиот век беше развиено високоориентирано влакно од поливинилалкохол (PVA) од страна на Kurshaki Rayon Company во Јапонија. Влакното имало јакост на затегнување од 0.9 N/tex при брзини на испитување од 20-2000000% во минута, покажувајќи притоа добра релаксација дури и при највисоките брзини на оптоварување. Со други зборови PVA влакната не ја губат својата еластичност. Меѓутоа, балистичкото испитување на предивото покажало критични брзини пониски од 400 m/s. Реалните балистички тестови на ткаенините од ова влакно во споредба со најлонот не покажаа некаква предност.

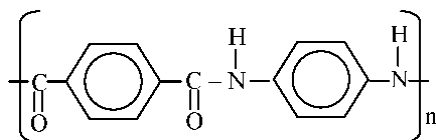
Изостатскиот полипропилен (PP) бил следниот кандидат за влакнеста балистичка заштита. Sheehan et al [12] развиле процес на извлекување на влакното што довел до јакост и до 1.15 N/tex. Меѓутоа ткаенините направени од ова предиво, и покрај неговата голема јакост, не се покажале супериорни во однос на најлонот. Поврзаноста меѓу механичките особини на предивото и балистичката отпорност на ткенината од тоа предиво не е воспоставена. Потоа е направена ткаенина од експериментално предиво со јакост од 1,2 N/tex. Најлонската ткаенина од предиво со една третина помала јакост (0.8 N/tex) покажала еднаква балистичка отпорност, а притоа и пониска цена на чинење. Се чини дека целокупниот потенцијал на PP не бил потполно искористен. Една можна причина за релативно ниската балистичка отпорност на полипропиленот е ниското триење помеѓу нишките (yarn-to-yarn friction) што е карактеристично за полиолефинскиот тип на влакна.

Прва прилика да се истражуваат органски влакна со стаклеста морфологија се појавува со развојот на ароматски полиамидхидразидните влакна на Monsanto Chemical Company [13]. Тие беа познати како X-500 серија на влакна и поседуваа необично висок модул, висока јакост и обично мало издолжување при прекин. Првите две особини комбинирани со очекуваната високотемпературна отпорност биле охрабрувачки, додека малото издолжување при прекин потсетувало на стаклените влакна коишто, исткаени, покажуваат ниска балистичка отпорност. Laible [14] ги испитувал ткаенините од овие влакна кои, зачудувачки, покажале балистички лимит од 378 m/s што било над минималната барана вредност за војничкиот елек на САД направен од најлонски влакна. Стаклените ткаенини при еднаква површинска маса (5.7 kg/m^2) покажуваат балистички лимит не поголем од 300 m/s. Заради тоа изгледало дека новиот ароматски тип на полимер се однесувал поинаку од стаклото и најлонот при удар. И навистина, фотографиите со скенирачки електронски микроскоп (SEM) ја потврдуваат разликата. Овие влакна покажале надолжно лепење и извесна пластична деформација. Надолжното лепење може да апсорбира одредена енергија, но што е најважно делува како ефикасен апсорбер на пукнатини (сгаск аггестог). Лепењето може да се споредува со ефектите што се јавуваат кај другите влакна, на пример, со топењето на краевите на прекинатите најлонски и полиестерски влакна и со кртиот лом што е присутен кај стаклените влакна. Може да се шпекулира дека топењето кај најлонските и полиестерските влакна е лимитирачки ефект и дека термички поотпорните влакна се понадежни. Во случајот со стаклените влакна, позитивниот ефект од високата термичка отпорност се поништува со осетливоста на рушење, не

само при удар, туку и при нивното процесирање (ткаење, одмастување...). Се потенцира фактот дека свилата (којашто не се топи) покажува поголема балистичка отпорност отколку што може да се претпостави од нејзините механички особини. Laible [1,15] открил дека Nomex, термички отпорно полиамидно влакно со просечна јакост, поседува прилично добри балистичко-отпорни особини во форма на ткаенина. Тоа мора да е во континуирана форма за да се користи за балистичка намена.

Треба да се нагласи дека сите досега споменати влакна и ткаенините исткаени од нив, како и презентираниите вредности се однесуваат на континуирани влакна. Дисконтинуираните влакна во форма на ткаенина покажуваат полоша балистичка отпорност од онаа на ткаенините од континуирани влакна.

Приближно во исто време со Monsanto, фирмата DuPont развива нов тип на високомодулно влакно, врз база на ароматски полиамид (скратено: арамид) и го пласира на пазарот под трговска ознака Kevlar 29. Неговата хемиската формула е:



Полипарафенилентеревфаламид (Kevlar 29).

Кевларот покажал поизразито лонгитудинално цепање при балистичкиот удар од влакното развиено во Monsanto. Неговите механички особини за тоа време биле навистина спектакуларни (табела бр. 2).

Табела 2. Карактеристики на балистички влакна

Table 2. Properties of ballistic fibers

Влакна Fibers	Јакост Strength mN/tex	Модул Modulus mN/tex	Издолжување Strain %	Балистички лимит Ballistic limit, m/s
Најлон Nylon	795	3540	18	380
Kevlar 29	2031	35400	4	500
Свила Silk	440	4154	18	426

Самата јакоста од 2031 mN/tex е 2.5 пати поголема од онаа на кое било друго влакно и петпати поголема од онаа на челичното влакно.

Кевларот се одликува со:

- 100% паракристалност,
- многу висока ориентираност на молекулите долж оската на влакното,
- ковалентни врски само во еден правец, фибрилна структура,
- висока T_g ,
- екстремно висока јакост,
- висок модул,
- мала кртост,
- висока ударна јакост,
- димензиона стабилност.

Прегледот на морфологијата на Кевлар плочите по балистичкиот удар покажува дека тенденцијата за надолжно лепење (фибрилација) што беше констатирана кај X-500 е многу поизразена. Појдовното многу фино влакно со дијаметар 12 μ m при балистичкиот удар се расцепува со фактор >10. Овој лонгитудинален лом, на некој начин типичен за сите органски влакна, станува поизразен кај високоориентираните молекули на Кевларот што, секако, делува како ефикасен апсорбер на трансферзалните пукнатини на влакната.

Hansen, Laible и други [17] се обиделе да објаснат зошто Кевларот има феноменална стопирачка снага спрема пенетраторите земајќи ги предвид високата јакост, брзата дисипација на ударниот бран (големата сонична брзина), високата термичка постојаност и фибрилацијата (надолжно лепење на влакната при удар). Но, се покажало дека ниту еден од овие фактори не е универзално важен за сите влакна. Таков беше случајот со полипропилен со висока јакост којшто се покажал понеефикасен од помалку јакиот најлон.

Wilde и др. [18] ја испитувале способноста на апсорпција на енергија кај различни тешки најлонски предива (1100 tex) и ткаенини на тој начин што ја мереле брзината на ударниот проектил пред и по ударот. Дошле до заклучок дека постои правопрпорционална зависност на статичката и динамичката јакост на влакната со нивната балистичка отпорност. Но, тоа не можеле да го потврдат и за другите типови влакна како што е, на пример, Кевларот. Дури напротив, со својот метод на мерење на енергијата не можеле да покажат дека Кевларот може да екстрахира повеќе енергија од најлонот иако е познато дека тој е балистички многу поотпотрен од најлонот. Заклучиле дека универзална корелација меѓу механичките

карактеристи (динамички и статички) кај различните влакна и нивните балистички карактеристики не може да се воспостави.

Hansen [19] истакнува дека, иако Кевларот теоретски претставува извонреден напредок во физиката на влакната и практично во балистичката заштита, треба да се биде внимателен со овој материјал заради можната „Ахилова пета“. Тој ги спомнува штетното дејство на ултравиолетовата светлина врз механичката јакост и молекулската маса, тешкотиите во боењето, генерирањето на статички електрицитет итн.

Но, ниту една од овие слабости не го спречи развојот на балистичката заштита врз база на овие влакна. Напротив, паралелно со развојот на новите влакна се работи на подобрување и усовршување и на веќе постоечките. Заради ниската цена на најлонската ткаенина, продолжено е со нејзиниот развој со цел да се постигне поголема балистичка заштита за дадена маса односно да се постигне помала маса при еднаква балистичка заштита од онаа што ја дава стандардната најлонска ткаенина. Канаѓаните Sarson и McLaucheln [20] коишто работеле на тоа, објавуваат балистички вредности од 418 m/s и 454 m/s за две експериментални најлонски ткаенини. Овие вредности споредени со балистичкиот лимит кај стандардниот најлон, 370-380 m/s, претставуваат голем напредок. Експерименталните ткаенини биле многу потешки од стандардните, 834 g/cm² и 1129g/cm², соодветно.

Што се однесува до композитите врз база на балистичките ткаенини, стаклопластиката е еден од најпознатите и најнеобичните ламинати врз база на стаклена ткаенина. За балистичка апликација е добро познат заради истражувањата што се вршени за време на Втората светска војна што резултираа со негова апликација во заштитниот елек за американската морнарица. Мали ламинати, 150 x 100 mm, врз база на стаклена ткаенина и полиестерска смола биле инкорпорирани во најлонскиот елек. Необичноста на ламинатот е во тоа што неламинираната стаклена ткаенина што е со лоша ударна и особено лоша балистичка отпорност, кога ќе се комбинира со полиестерска смола (друг материјал со лоша ударна и балистичка отпорност) резултира во материјал со одлична балистичка отпорност. Смолата, иако е присутна во значително помало количество, дејствува на смалување на дефектите што можат да се јават кај стаклото и да ја смалат јакоста.

Идејата да се користат тврди композити произлезе од концепцијата за индустриски заштитен шлем (заштита од паѓачки предмети) и од потребата да се

инкорпорира балистичка заштита во униформата на војникот. Пионери во оваа работа биле Coates и Вeyer [21]. Тие разгледувале повеќе типови зајакнувачки влакна како потенцијални за оваа намена (целулозни, памучни, комбинација на стаклени влакна по јаток и азбестни по основа, како и стаклени по јаток и памучни или најлонски по основа ...), но изборот паднал на чиста стаклна ткаенина со цел да се намали собирањето и да се максимизира балистичката отпорност. Потенцијални смоли за користење за оваа намена биле: полистиренски, полиметилметакрилатни, меламин-формалдехидни и полиестерски. За истражувачите бил интересен фактот дека балистички лошата ткаенина комбинирана со полимерна матрица во ламинат дава одлични балистички карактеристики така што многу истражувачи се зафатиле со предизвикот да го истражуваат овој материјал.

Hansen [22] ги проучувал стаклените ламинати како подлога за керамички плочки од Al_2O_3 и B_4C кои се користат за заштита од панцирна или AP муниција (AP-armor piercing). Во оваа комбинација на материјали, керамичките плочки се лепат врз подлога од стаклен ламинат. На фронталната страна се керамичките плочки чија улога е да го запрат проектилот, додека стаклениот ламинат има улога да изврши амортизација на фрагментите од проектилот и керамиката. Hansen заклучил дека подлога од стаклен ламинат со дебелина од 6,35 mm и B_4C керамички плочки со дебелина од 9,5 mm можат да запрат панцирен проектил 7.62mm со брзина од 823 m/s.

McAbee [23] и други го проучувале ефектот на брзината на проектилот со која тој удира во ламинатот врз неговите особини. Генерално, високоеластичните материјали покажувале зголемен модул и јакост со зголемувањето на брзина на тестирањето, додека издолжувањето до прекин опаѓа. Потребната работа (работа во смисла на физичка големина) за рушење на материјалот може да порасне или да остане на исто ниво. McAbee пронашол прилично зголемување на работата за рушење на стаклениот ламинат со зголемувањето на брзината на тестирање односно оптоварување на материјалот. Имајќи ја предвид прилично добрата ударна отпорност на ламинатот при статички брзини, одличното однесување на стаклените ламинати при балистички удар можеби е и разбирливо.

Rugger и Fenter [24] подетално ги проучувале стаклените ламинати како подложен материјал за лепење на керамички плочки. Тие вршеле истражување на ткаенини со различна дебелина односно ламинати со повеќе и со помалку слоеви на ткаенина при што нашле дека подебелите ткаенини односно ткаенините со

помалку слоеви во ламинатот покажуваат подобри перформанси во споредба со ламинат со повеќе слоеви. Тие, исто така, вршеле истражување со различни типови стакло со поголем или помал модул од Е-стаклото кое обично се користи за балистичка заштита. А-стаклото со ознака УМ 31А кое има за 50% поголем модул од Е-стаклото и за 13% поголема густина се покажало како инфериорно во однос на Е-стаклото, додека S-стаклото што е со модул за 25% поголем и со густина за 3% помала се покажало како незначително подобро. Но, ова стакло е многу поскапо и заради тоа не е прифатено. Поведени од овие резултати, Rugger и Fenter вршеле истражување и на D - стакло, таканаречено диелектрично стакло бидејќи неговиот модул е за 25% помал, а неговата густина за 15% помала од оние на Е-стаклото. Ова стакло се покажало балистички многу поефикасно, па овој факт довел до договор за развој на материјал со уште помал модул. Договорот бил успешен барем од научна гледна точка и било подготвено стакло со мал модул и со мала густина, означено како LMLD (low modulus, low density) стакло. Главна разлика во хемискиот состав била елиминацијата на CaO и намалување на содржината на Al_2O_3 од 14% на 6%, но со зголемување на содржината на B_2O_3 (10% на 29%), Na_2O и K_2O (1% до 7%) и PbO (0% до 4.8%). Крајното стакло имало за 50% помал модул и 12% помала густина во однос на Е-стаклото. Ламинатите подготвени од ова стакло покажале за 20-30% подобра заштита од фрагменти во однос на еквивалентната маса на ламинатите од Е-стакло. Овој материјал како подлога за керамичките плочки се покажал, исто така, како подобар од ламинатите од Е-стаклото, но сосема незначително подобар во споредба со неговото самостојно користење. Ова истражување го потврди фактот дека е можно да се направи поефикасен стаклен ламинат, но заради универзалноста и доминацијата на пазарот на Е-стаклото, ова стакло не најде широка практична примена.

Балистичките ламинати врз база на најлонска ткаенина за првпат се воведени како замена на памучниот лајнер кај американскиот војнички шлем M1 за време како на Втората светска војна, така и на Корејската војна. Замената била направена бидејќи најлонскиот ламинат имал балистички лимит од 274 m/s, додека таа на памучниот ламинат била минорна.

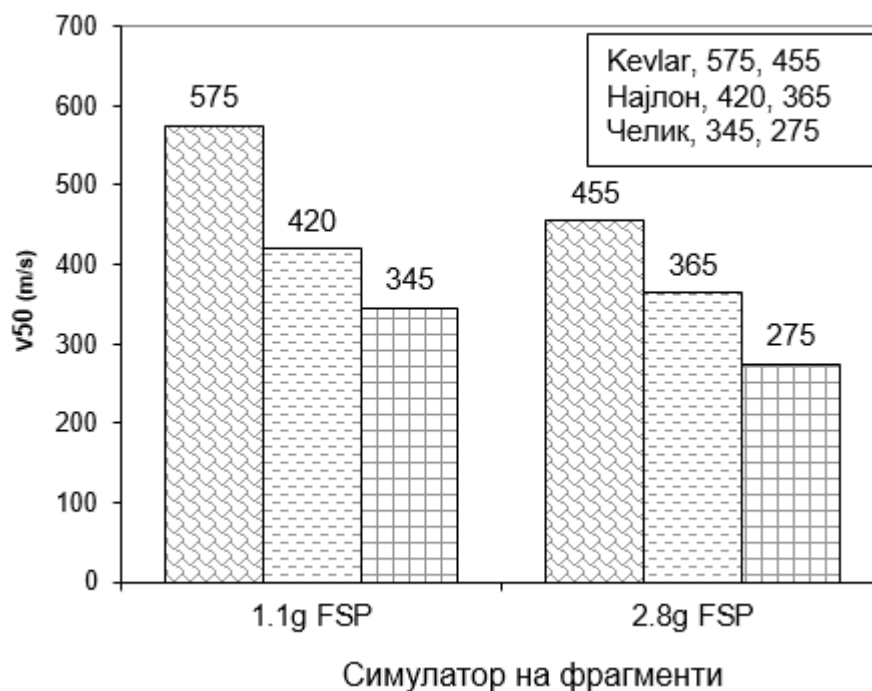
Lastenik и Gates [25] вршеле истражување на најлонски ламинати со различни полимерни матрици и со различни концентрации, но не нашле некоја голема разлика во балистичките перформанси. Тие дошле до заклучок дека кај овие ламинати доминантна улога во балистичката отпорност имаат влакната, многу поизразена отколку кај ламинатите врз база на други типови влакна.

DePontree [26] правел хибридни ламинати, комбинации на најлон и стакло во ист ламинат, со цел да ја подобри балистичката отпорност и да ја зголеми термичката стабилност кај лајнерите за шлемовите. Тој успеал да ја оствари целта затоа што постигнал синергетско дејство на материјалите во ламинатот при што резултирачкиот ламинат бил со подобри балистички и термички карактеристики.

Важноста на Кевларот и во полето на композитите не е ништо помалку значајна во споредба со онаа кога тој се користи самостојно. Alesi et al. [26] известуваат за подготовката на Кевлар ламинатите во вид на рамни плочи и во вид на шлем. Тие, исто така, вршеле балистички испитувања на рамни Кевлар ламинати, споредбено, со ламинати од други материјали (LMLD, најлон, полипропиленски филм XP,..). Кевларските ламинати биле подготвени од 23 слоеви на Кевлар 29 ткаенина со површинска маса од 373 g/m^2 , а како матрица користеле модифицирана фенол-формалдехидна смола. Направените ламинати биле со површинска маса од 10.5 kg/m^2 . Испитувањето е вршено со четири различни (по маса) симулатори на фрагменти на кои, заради тајност, масите не им ги објавуваат, но објавуваат процентуално балистичко подобрување во однос на школката од американскиот челичен (Hadfield steel) шлем со лајнер од најлонски композит.

McManus et al. [27] развивале нов дизајн на шлем при што одбрале ламинат врз база на Кевлар како најефикасен балистички материјал за оваа намена. Како потенцијални материјали разгледувале Hadfield челик, титан, XP (растегнат полиолефински филм), стаклопластика и Кевлар. Конечната одлука сепак била за користење на Кевларот.

Супериорноста на Кевларот во однос на дотогаш користените балистички материјали ја илустрира DuPont [28], објавувјаќи резултати од споредбени испитувања на шлем врз база на балистички најлон, челик и Кевлар. Испитувањето е извршено на материјали со површинска маса од 8 kg/m^2 , со два типа на симулатори од 1.1 g и од 2.8 g при што е одредувана вредноста на V_{50} . Резултатите се презентирани на сликата 3.



Слика. 3. Споредба на балистичките материјали за шлем
 Figure 3. Comparison of ballistic materials for helmet

Супериорноста на Кевларот е повеќе од очигледна.

Bowyer [29] проучувал ламинати од Кевлар 49 (друг тип на араמידно влакно со висок модул) подготвени од ткаенина и од сечкани влакна врз база на полиестерска (Crystic 30) и фенол-формалдехидна смола. Сечканите влакна биле со должина од 6mm и 38mm и биле преработени во филц. Од 22 слоја на филцот во комбинација со фенол-формалдехидна или полиестерска смола направил ламинати од 5,4kg/m и балистички ги испитувал. Заклучил дека балистичките вредности се пониски отколку оние кај ламинатите врз база на ткаенина за иста површинска маса. Една од причините за тоа била поголемата потреба од смола за ламинирање на филцот. Користењето на фенол-формалдехидната смола во однос на полиестерската било поповолно затоа што, за да се постигне компактност на ламинатот, било потребно помалку смола при што постигнал балистички вредности од 345 m/s и поголеми за површинската маса од 4,9 kg/m². Условите на ламинирање биле 110 °C и 2,76 MPa.

Alesi et al. [30], исто така, работеле на ламинати од сечкани влакна и заклучиле дека влакната со должина од 5cm се многу поефикасни отколку оние од 0,6cm.

Laiblee и Depommee [1,31] проучувале рамни ламинати од стакло и Кевлар. Ламинатите од Кевлар биле подготвени од нискограмска ткаенина (170 g/m²) и

фенол-формалдехидна смола. Подготвениот препрег бил со 30% смола. Ламинатите биле изработени под следниве услови: притисок 6,9 МПа, температура 171°C и времетраење 7 минути. Стаклените ламинати биле изработени од ровинг ткаенина со површинска маса 780 g/m² импрегнирана со незаситена полиестерска смола модифицирана со диалилфталат со содржина 23-25% во ламинатот. Ламинатите биле изработени под следниве услови: притисок 0,85 МПа и температура 138°C. Двата типа ламинати биле испитувани со пиштол со калибар 9mm. При површински маси од 8,2kg/m² и 10,7kg/m², Кевлар ламинатите ги издржале сите истрели без да има продор. Брзината на куршумите била 375m/s и биле испукани 10 куршуми врз ламинатите со поголема површинска маса и 5 врз ламинатите со помала површинска маса. За разлика од нив, кај стаклените ламинати со 10,7kg/m² имало еден продор од пет истрели со брзина 359m/s, додека кај ламинатите со 8,2kg/m², четири продори од пет истрели. Понатаму биле подготвени Кевлар ламинати од поевтина, високограмска (440 g/m²) ткаенина. И при балистичкото тестирање на овие ламинати, супериорноста на Кевларот била потврдена. Овие резултати ги охрабриле научниците да ја намалат површинската маса на 7,3 kg/m² при што сè уште била обезбедена потполна заштита од куршуми со брзина од 395 m/s. Овој труд убедливо ја покажува предноста на Кевларот во однос на стаклото спрема високобрзинска пиштолска муниција. Ако цената на чинење е доминантен фактор, тогаш треба да се употреби ~ 25 % повеќе стакло за да се постигне сличен балистички ефект. Исто така, забележан е поголем трауматолошки ефект кај стаклените ламинати во споредба со араמידните.

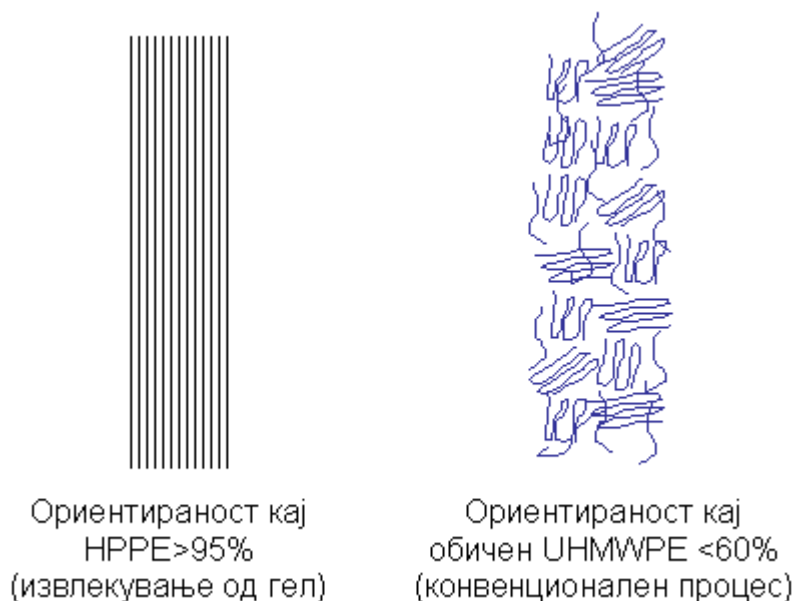
Слични резултати добил и Minog [32] кој балистички споредувал ламинати од Кевлар 29 и од Е-стакло.

Балистичкиот лимити за Кевларските ламинати биле повисоки во сите случаи иако нивната површинска маса била помала од онаа на стаклените ламинати.

Кевларот беше супериорно балистичко влакно сè до појавата на високоперформансното полиетиленско влакно (HPPE, High Performance Polyethylene) или најјакото влакно на светот како што уште го нарекуваат.

Во 1979 година холандската фирма DSM го пронајде и го патентира ова влакно како и процесот (gel - spinning) за неговото добивање. Комерцијално производство фирмата почнува во 1990 година со пласирање на пазарот на високоперформансно полиетиленско влакно под трговска ознака „Dyneema“. Се произведува од PE со ултрависока молекулска маса (UHMWPE, Ultra High Molecular Weight Polyethylene).

Кај обичниот PE молекулите не се ориентирани и лесно се кинат. При „gel-spining“ процесот молекулите се влечат од растопена маса низ платински дизни со многу мал дијаметар (9-12 nm) при што се постигнува висок степен на паралелна ориентираност на молекулите (слика бр. 4). Поволните особини на базниот материјал, UHMWPE, паралелната ориентираност на молекулите и високата кристалност го прават „Дупеема“ влакното уникатно со неговата многу висока јакост и модул.

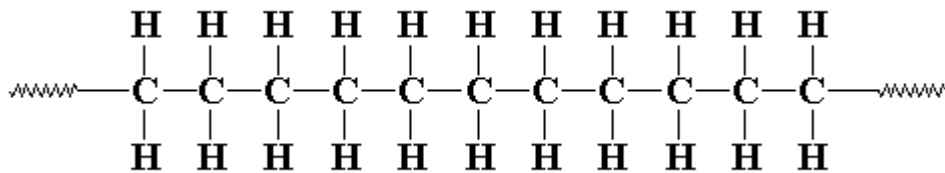


Слика 4. Ориентираност на макромолекулите кај полиетиленот

Figure 4. Chains orientation of polyethylene

HPPE се карактеризира со паралелна ориентираност поголема од 95% и со висок степен на кристалност (до 85%) што, во комбинација со неговата многу мала густина, му дава уникатни особини. Хемискиот состав на HPPE е иста како кај UHMWPE, слика 5. Разликата е во ориентацијата на молекулите и во молекулската маса, која кај HPPE е за $10^1 - 10^2$ поголема.

Густијата на влакната HPPE е помала од онаа на водата ($0,97 \text{ g/cm}^3$) така што влакната не потонуваат во вода. Специфичната јакост е највисока на светот и може да биде до 15 пати поголема од таа на квалитетен челик. Модулот им е многу висок и е на второ место по големина зад оној на специјалните јаглеродни влакна. Издолжувањето при прекин е на нивото од другите високоперформансни влакна, но заради високата специфична јакост, енергијата за кинење им е многу висока.



Слика 5. Структурна формула на HPPE

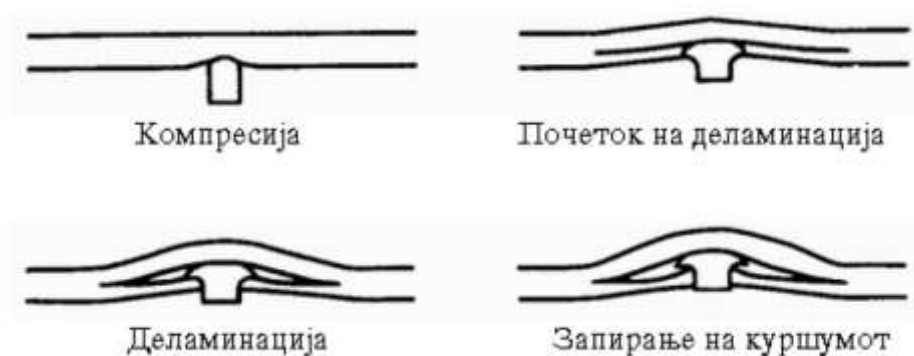
Figure 5. Structural formula of HPPE

Истражувањата што се вршени врз HPPE по нивната комерцијализација понатаму го поминуваат веќе добро трасираниот пат од истражувањата на претходните влакна.

A.S.Verlinde и J.L.J. van Dingenen [33] проучувале различни типови текстилни производи од Дупеета влакна, филц, ткаенини, еднонасочни препрези. При анализа на испитаните примероци забележале дека секој од нив на својствен начин ја врши балистичката заштитна функција, односно, секој покажува различен механизам на балистичка заштита. Направиле обид да пронајдат корелација меѓу јакоста и крутоста на влакната со можноста за нивна трансформација во балистички перформанси односно запирачка снага. Тие го потенцираат фактот дека, иако постојат емпириски набљудувања, не постои модел кој ги предвидува балистичките перформанси во функција од измерените особини на влакната. Понатаму, тие коментираат дека за да се постигне поголема балистичка заштита, не е јасно дали треба да се тежи кон повисока јакост (поголема апсорпција на енергија) или кон повисок модул (повисока брзина на простирање на ударниот бран низ влакното). Традиционалните влакна како полиамидните и полиестерските покажуваат обратнопропорционална зависност меѓу јакоста и модулот. Многу е тешко да се подобри едната особина без да се влијае врз (да не се смали) другата. Нивните коментари се од аспект на процесните инженери (двајцата автори работат во DSM High Performance Fibers на развој и усовршување на HPPE влакна за балистичка примена). Понатаму, тие коментираат дека дизајнерот на влакната треба да донесе одлука за тоа која особина треба да се подобри. Но, за да го направи тоа, во најмала рака, му треба барем груб теоретски модел. За балистичките апликации таков модел не постои. Овие се факти за кои многу истражувачи се обидуваат да најдат одговор, вклучувајќи ги и горните автори, како и цели тимови на истражувачи од оваа фирма.

Prevogsek et al.[34] вршеле теоретски и експериментални истражувања на однесувањето на HPPE при балистички брзини на оптоварување за 4 реда на

големина повисоки од оние при стандардните тестови. Експерименталните истражувања ги вршеле со користење на високобрзински камери за да го снимат однесувањето на влакната и композитите при балистичкиот удар. Експерименталните резултати покажале дека при брзини на тестирање од $\sim 10^2 \text{s}^{-1}$, динамичкиот модул на влакната е многу висок и се приближува кон теоретскиот лимит. Брзината на надолжен напонски бран (stress wave) на HPPE е многу поголема отколку онаа на челикот и е споредлива со таа на дијамантот. Анализирајќи ги тестираните ламинати и фотографиите, тие забележале дека рушењето на ламинатите се одвива во четири фази (слика бр. 6).



Слика 6. Механизам на пенетрација на проектилот во HPPE плоча

Figure 6. Mechanism of projectile penetration in HPPE panel

Најнапред доаѓа до локална компресија на ламинатот на местото на контактот со проектилот, за потоа, неколку слоеви на влакната да бидат прекинати како резултат на напонот од проектилот (куршумот). Потоа, проектилот пенетрира низ неколку слоеви предизвикувајќи меѓуфазна деламинација. При пенетрацијата, проектилот силно се деформира во вид на печурка, што го намалува напонот на контактната површина и, конечно, проектилот се запира.

Слични теоретски проучувања на влијанието на брзината на оптоварување врз особините на HPPE влакна вршеле и Termonia et al.[35] Овие автори предвиделе дека зголемувањето на деформационата брзина од 10^{-1} до 10^2 min^{-1} доведува до шестократно зголемување на јакоста на влакната. Тестирањата при брзини што можат да се постигнат со стандардна лабораториска опрема покажуваат големо зголемување на модулот со порастот на брзината на деформација. Овие зголемувања биле особено големи при повисоки температури (100°C - 130°C).

J.W.Song и C.H.Roche [36] балистички проучувале термопластични композити со

различни типови ткаенини и конструкции. Композитите од Кевлар-КМ2 (понов тип на комерцијално араמידно влакно од фирмата DuPont) се покажале подобри во однос на помали проектили, додека хибридниите композити врз база на ткаенини од Кевлар-КМ2 и Spectra- 1000 (комерцијална ознака на HPPE влакно од фирмата Honeywell од САД) се покажале подобри во однос на големи проектили. Генерално, хибридниите композити се покажале како подобри.

V.L.Lee et al. [37] го проучувале механизмот на рушење на HPPE композити при балистички оптоварувања и тоа особено композити врз база на ткаенини и еднонасочни ленти. Кај двата типа ламинати тие откриле дека настанува секвенцијална деламинација и дека кинењето на влакната настанува како резултат на комбинираното оптоварување при смолкнување и затегнување (shear and tensile failure) како што е и случај кај стаклените и јаглородните композити. При мали површински маси, двата типа композити покажале сличен балистички лимит. Меѓутоа, со зголемувањето на површинската маса, разликите во балистичкиот лимит станувале сè поочигледни, со повисоки вредности кај еднонасочните композити. Кога ги подложиле композитите на повеќекратно балистичко оптоварување при константна брзина на проектилот, а под таа на балистичкиот лимит, забележале прогресивен пораст на локалната деламинација сè до потполното рушење (failure) на композитот. Примената на понискобрзински проектили довела до зголемен број на кумулативни удари до потполното рушење на композитите при што дефинирале т.н. профил на животен век на ударен замор (impact fatigue lifetime profile) на композитот. Резултатите од Spectra влакната со матрица од винилестерска смола покажале повисок балистички лимит и подолг животен век на ударен замор при дадена ударна брзина отколку композитите со полиуретанска матрица. Понеефикасната апсорпција на ударната енергија на композитите со матрицата од флексибилен полиуретан ја припишуваат на ограничениот пораст на деламинацијата (која делува како апсорбер на енергијата) кај овие композити. Во корелација со резултатите од динамичко-механичката анализа, ова укажува дека крутоста на смолната матрица игра важна улога во контролирањето на балистичката ударна отпорност на композитите од HPPE влакна.

J.H.Grimberg et al. [38] вршеле детално испитување на HPPE во форма на филц со фрагменти и ги споредувале со балистичкото однесување на композитите од ткаенина или еднонасочен препрег. Заклучиле дека балистичкиот механизам кај филцот е многу различен од оној кај композитите од ткаенина или еднонасочниот

препрег. Кај ткаенините и еднонасочните препрези голем дел од енергијата на проектилот се апсорбира со кинење на влакната на местото на ударот како резултат на преголемото издолжување и пробивање на влакната. Визуелната проверка покажала дека кај филцот ретко доаѓа до кинење на влакната односно до пробивање на слоевите, туку доаѓа до формирање на кожурец на влакнест материјал на врвот од симулаторот (што го прави симулаторот тап уште во многу рана фаза при ударот) со што многу се отежнува неговата пенетрација низ материјалот.

James D. Walker [39] вршел споредбено испитување на композити и на чисти ткаенини (без смола). Експериментите покажале дека за многу мал број слоеви односно за мала површинска маса ткаенината покажала подобри (“dry is better”) балистички особини од композитот влакна/смола со еднаква површинска маса. Тоа се должи на фактот дека дел од влакната кај композитот се заменети со смола односно, при иста површинска маса, композитот содржи помалку влакна за онолку колку што содржи смола. Меѓутоа, со зголемување на релативната површинска маса композитот почнува да покажува крутост (при свивање) и подобрување на своите перформанси. Експериментално било покажано дека трансформацијата (crossover in performance) во перформансите настанува во опсегот кога масата на ткаенината што учествува во балансирањето на моментот (momentum balance) е еднаква на масата на ударното зрно. Со зголемувањето на површинската маса на ткаенината преку овој опсег, композитот влакна/смола покажува подобри особини од ткаенината при еднакви површински маси.

Денес во светот најексплоатирани за лична балистичка заштита (ЛБЗ) се арамидните и НРРЕ влакна. Всушност, постои и неформална поделба во светот на ЛБЗ на „жолти“ и „бели“ (според бојата на арамидните и НРРЕ влакна, соодветно) на корисниците и производителите на балистичките влакна. Овие влакна денес имаат многу широка примена во разни индустриски гранки (телекомуникации, морски транспорт, термоизолација итн.) каде што не си конкурираат, единствено во полето на балистичката заштита се силни конкуренти. Ниту едно од овие два типа на влакна не е идеално или, пак, со одлучувачка предност во однос на другото за балистичка апликација. И едните и другите имаат свои предности и недостатоци во однос на влијанието на некои надворешни експлоатациони фактори врз нивните балистички перформанси. Најдобар извор на податоци за недостатоците е конкуренцијата [40,41,42,43]. Влијанието на влагата, светлината и температурата различно се одразува врз перформансите на овие влакна.

3. ЦЕЛ НА МАГИСТЕРСКИОТ ТРУД (THE PURPOSE OF THE MASTER WORK)

Истражувањата во рамките на оваа дисертација се од апликативен карактер и ги имаат следниве цели:

1. Да се изврши избор на разнородни зајакнувачки влакна применливи за изработка на композити наменети за персонална балистичка заштита, како и да се изврши нивна целосна апликативна карактеризација (под разнородни овде подразбираме влакна со различни механички односно балистички перформанси, со различна маса и со различна цена на чинење.

2. Да се изврши избор на соодветна појдовна термореактивна смола погодна да гради балистички композити со избраните влакна, да се изврши нејзина карактеризација и, по потреба, модификација, да се дефинира крајната композиција на смолниот систем, да се направи смолен систем во полуиндустриски/индустриски услови врз база на лабораториските сознанија и да се тестира во реални услови на експлоатација; да се влијае и целосно да се контролираат особините на матрицата од аспект на нејзината процесибилност како и прилагодливост во функција на постигнување на најдобри балистички особини на композитот во дадени услови. Целта на ова истражување е, со модификација на фенолна смола за општа намена, да се определи оптимален смолен систем за изработка на балистички композити. Друга цел со развивањето на сопствен смолен систем кој ќе резултира во квалитетен и конкурентен финален производ е да се отфрли идејата за купување на препрег (место ткаенина) и да се искористат сопствените импрегнирачки капацитети кои се на располагање во „11Октомври-Еурокомполит“ од Прилеп.

Трета цел е да се избегне проблемот со застарување (поминување на рокот на употреба) на препрегот кој е доста ограничен особено во летните месеци и негово складирање (потребно е да се чува на -12°C)

Крајна цел, во овој контекст, е да се намали цената и зависноста од надворешни добавувачи.

3. Да се испита можноста за модификација на фенол-формалдехидната смола со PVB што ќе резултира во смолен систем апликативен за композити за лична балистичка заштита.

4. Да се изврши евалуација на балистичките перформанси на композитите врз

база на избраните влакна и избраниот смолен систем.

5. Да се изврши испитување на влијанието на односот на конститuentите врз балистичките перформанси на композитите (еднонасочни и двонасочни).

6. Да се изврши анализа на влијанието на притисокот на пресување врз балистичките перформанси и трауматолошкиот ефект кај композитите.

7. Да се изврши испитување на влијанието на текстилната форма на влакната врз балистичката јакост и врз трауматолошкиот ефект.

8. Да се изврши испитување на влијанието на површинската маса врз балистичките перформанси на композитите.

9. За дадено балистичко барање да се изврши испитување на најдобрата комбинација на влакна-смола и нивниот однос од аспект на масата и цената на чинење.

10. За дадена цена на чинење да се изврши испитување на најдобрата комбинација на влакна-смола и нивниот однос од аспект на масата и балистичките перформанси.

11. За дадена маса да се изврши анализа на најдобрата комбинација на влакна-смола и нивниот однос од аспект на цената на чинење и балистичките перформанси.

Сите овие споменати цели треба да бидат во функција на основната цел на овој труд: развој на комплетна сопствена технологија (know-how) за индустриско производство на балистички композити кои, финализирани во балистичка заштитна опрема, ќе дадат квалитетен и конкурентен производ верифициран од домашниот и од меѓународниот пазар.

4. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА ЛИЧНА БАЛИСТИЧКА ЗАШТИТА (COMPOSITE MATERIALS FOR PERSONAL BALLISTIC PROTECTION)

За изработка на современата тврда лична балистичка заштита главно се користат полимерни матрици и зајакнувачки влакна. Овие суровини процесирани меѓу себе, резултираат во композитен материјал со супериорни особини во однос на одделните особини на матрицата и влакната што се должи на синергетското дејство меѓу нив.

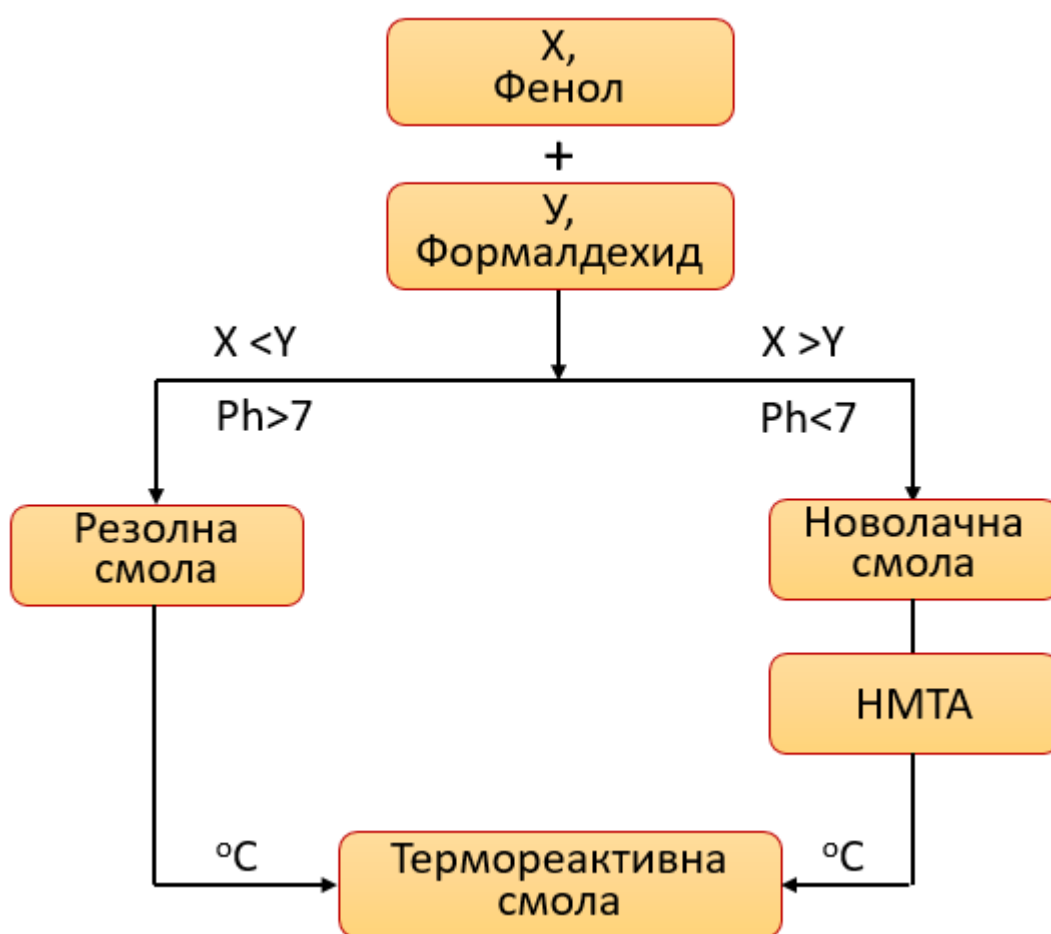
4.1. СМОЛИ КАКО МАТРИЦА ЗА КОМПОЗИТНИТЕ МАТЕРИЈАЛИ

Како матрица за композитните материјали за ЛБЗ се користат терморективни и термопластични полимери. Терморективните полимери (фенол-формалдехидни, полиестерски, епоксидни, винил-естерски и др.) односно смоли се аплицираат, главно, во течна состојба, преку импрегнација на зајакнувачките влакна, додека термопластичните (латекс, полиетилен, полистирен и др.) се аплицираат во цврста состојба во вид на филм. Фенол-формалдехидните смоли се најчесто користени терморективни матрици за композити за балистичка заштита. Нивната предност во однос епоксидните, полиестерските и другите терморективни матрици е во нивната разновидност (при реакција на фенол со алдехидите можни се повеќе насоки по кои реакцијата може да се одвива и притоа да се добијат низа производи со посебни особини), леснотијата за манипулација и процесирање заради тоа што се работи за еднокомпонентен (самовмрежувачки) систем (без додатни вмрежувачи и забрзувачи како што е случај на пример со епоксидните смоли), ниската цена на чинење и др. Недостаток на фенол-формалдехидните смоли, како и на повеќето терморективни смоли, е нивната кртост кога се во вмрежена состојба.

Фенолните смоли можат да се сметаат за првите синтетички полимерни производи кои се комерцијално произведени од едноставни нискомолекуларни соединенија. Се добиваат со кондензација на фенол или смеса на феноли со формалдехид. Фенолот и крезолите се најчесто користени феноли, додека како алдехиди се користат формалдехидот и, во помал опсег, фурфуралот [47]. Со оглед на тоа дека формалдехидот е најчест користениот алдехид, вообичаено име за фенолните смоли е фенол-формалдехидни смоли.

Овие смоли се многу комплексни и нивната структура зависи од односот фенол/формалдехид при добивањето, од рН-вредноста на реакционата смеса и од температурата на реакцијата. Во зависност од горните параметри реакцијата може да доведе до синтеза на два сосема различни типа на фенол-формалдехидни смоли: *новолачни* и *резолни*, според долната шема (слика бр. 7).

Новолачните смоли се добиваат при реакција на фенол со формалдехид во моларен однос 1:(0,75-0,85) во кисела средина, додека за добивање на резолните смоли потребен е базен катализатор и моларен однос на фенол/формалдехид од 1:1 до 1:3.

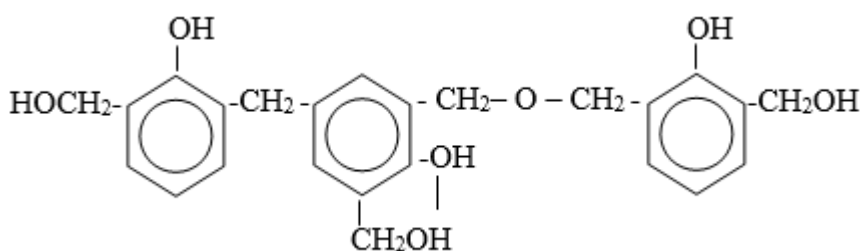


Слика 7. Шема за добивање фенол-формалдехидни смоли
Figure 7. Flowdiagram of phenol-formaldehyde resin synthesis

Новолачните смоли се термопластични што значи дека се топат при загревање. Бидејќи не содржат реактивни метилолни групи, не можат да формираат вмрежени структури при загревањето. За да бидат комплетно вмрежени, потребна е реакција

со вмрежувачи - соединенија кои се способни да формираат метиленски мостови. Такви соединенија се хексаметилентетраминот (НМТА) или параформалдехидот. При загревање тие вршат вмрежување на смолата до нетоплива, „терморекативна“, структура. Ваквите смоли кај кои е потешка реакција со вмрежувач уште се нарекуваат и двостепени (two-stage) смоли.

Резолните смоли се едностепени (single-stage) смоли бидејќи не им е потребна реакција со вмрежувач за да се вмрежат, туку им е потребно само загревање на повисока температура. Формулата на типична резолна смола е претставена на сликата бр. 8.

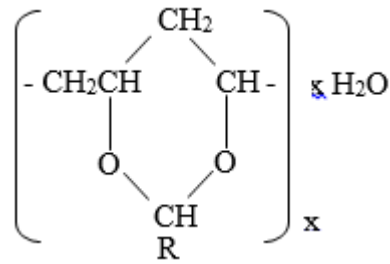


Слика 8. Формула на типична резолна смола

Figure 8. Formula of typical resole resin

До вмрежувањето, фенол-формалдехидните смоли поминуваат низ три фази. А-фаза е онаа во којашто смолите се испорачуваат, тие се во течна и растворлива состојба. При контролирано загревање, водејќи сметка за времето и температурата, преминуваат во Б-фаза. Тоа е гуместа состојба во која смолата е делумно топлива и делумно растворлива. Во препрезите смолата е токму во оваа состојба. Во В-фазата смолата е во цврста состојба и е целосно вмрежена. Во оваа фаза таа ниту е растворлива ниту топлива. Во ваква состојба се наоѓа во крајниот производ - композитот.

Фенол-формалдехидните смоли се одликуваат со одлична термичка постојаност, одлични електро-изолациони особини, добри механички и хемиски особини како и постојаност на влага. Главен недостаток, покрај темно-браон до црната боја која, покрај тоа што не е атрактивна, е и непостојана на дејството на светлината, им е кртоста. Кртоста на фенол-формалдехидните смоли може да се намали со модификација со поливинилбутирал. Поливинилбутиралот е всушност специјален тип на поливинилацетал во форма на зрнест бел прашок.



Слика 9. Структурна формула на поливинилбутирал
Figure 9. Structural formula of PVB

Физичките и хемиските особини на поливинилбутиралите зависат од степенот на полимеризација и од содржината на бутирални, хидроксилни и ацетатни групи. Тој е бел зрнест нетоксичен и некорозивен прав. Има одлична транспарентност и способност да гради филмови. Во таква форма има одлична ударна жилавост, јакост на затегнување, адхезивност и еластичност. Најмногу се користи во производството на сигурносно ламинирано стакло како поврзувачки материјал меѓу стаклените слоеви. Реактивноста ја остварува преку хидроксилните групи.

4.2 ВЛАКНА КАКО ЗАЈАКНУВАЧКИ СИСТЕМ КАЈ КОМПОЗИТНИТЕ МАТЕРИЈАЛИ

Зајакнувачките влакна се другиот конституент (покрај матрицата) кај композитните материјали за ЛБЗ и се носечка компонента на балистичките карактеристики на композитите. Најчесто користени влакна се арамидните и високоперформансните полиетиленски (HPPE).

4.2.1 АРАМИДНИ ВЛАКНА

Арамидните влакна се откриени од американската фирма DuPont de Numerous во 1965 година како дел од континуираното истражување во полето на најлонските влакна. Хемиски ова влакно е поли (1,4 фенилентерефталамид) или арамид (ароматски полиамид) како што го нарекле пронаоѓачите. Хемиската структура на Кевларот (под тоа комерцијално име фирмата го пласира на пазарот ова влакно) содржи бензенови прстени долж полимерната верига, слика 2. Првобитно овие

vlakna кои имаат жолта боја, биле наменети да ги заменат челичните жици како ојачувачи во радиалните автомобилски гуми [62]. Нивниот балистички потенцијал не бил веднаш откриен. Тоа се случило дури во раните седумдесетти години. Денес, покрај DuPont, арамидните vlakna ги произведуваат неколку фирми: Akzo (Twaron), Tejin (Technora), Monsanto (X-500), а во Русија се произведува под трговската ознака Винилон [63,64].

Арамидните vlakna генерално се одликуваат со следниве особини:

Механички и динамички особини

- висока јакост на затегнување,
- висок модул на еластичност,
- мала густина,
- добра амортизација на вибрации,
- висока апсорбција на енергија,
- висока отпорност на удар,
- мал замор на материјалот.

Хемиски особини

- добра хемиска отпорност.

Термички особини

- висока температурна отпорност,
- ниска термичка експанзија,
- ниска термичка спроводливост.

Електрични особини

- добри диелектрични особини.

Текстилни особини

- висока флексибилност,
- висока отпорност на абразија,
- конфорни за носење.

Постојат повеќе типови комерцијални арамидни vlakna кои, генерално, се базираат на технологијата на два основни типа vlakna: *високоцврсти*, наменети за балистичка заштита и *високомодулни*, наменети за изработка на високоперформансни композити за авиоиндустријата и за воената индустрија.

Арамидните vlakna се петпати појаки од челикот, сметано на единица маса. Од првите два типа на комерцијални vlakna, Кевлар 29 и Кевлар 49, само првиот тип е

наменет за балистичка заштита, додека вториот е наменет за композити. Поновата генерација на влакна за балистичка заштита, кои се одликуваат со супериорни балистички карактеристики во споредба со Кевлар 29, се Кевлар ХТ, Кевлар 129, Twaron Microfilament [63,64].

Овие влакна речиси исклучиво се користат во вид на ткаенини без разлика на тоа дали се наменети за изработка на елечи (мека балистика) или пак плочи, шлемови (тврда балистика). Само мал дел од нив се користи како еднонасочен композитен материјал.

Споредбените карактеристики на арамидните влакна со другите типови на зајакнувачки влакна се дадени во табелата бр. 7.

4.2.2. HPPE ВЛАКНА

HPPE влакната се изработуваат од UHMWPE од страна на неколку фирми во светот: Honeywell (Spectra), DSM (Dyneema), Tenfor (Snia) и Mitsui (ТекшиОп). Молекулската формула на овој полимер е иста како и формулата на обичниот полиетилен (слика бр. 5), но сепак значително се разликува заради многу големата молекулска маса. Линеарниот полиетилен нормално се произведува со молекулска маса во опсегот 200000 до 500000, а може да биде уште поголема, додека UHMWPE е со молекулски маси од три до шест милиони [65]. Поголемата молекулска маса резултира во физички особини кои во многу аспекти се конкурентни на стаклените, јаглородните и арамидните влакна. Се добиваат со полимеризација на мономерот етилен (слика бр. 14).



Слика 10. Реакција на добивање полиетилен
Figure 10. Chemical reaction of polyethylrne synthesis

HPPE влакната се одликуваат со следниве физички особини:

Хемиски

апсорбција на вода	нема,
собирање во вода која врие	<1%,

дејство на водата	никакво,
отпорност спрема киселини	одлична,
отпорност спрема бази	одлична,
отпорност спрема повеќето хемикалии	одлична,
отпорност спрема UV зраци	многу добра.

Термички

точка на топење	136-144°C ,
термичка спроводливост	20 W/mK,
коэффициент на експанзија	-12x10 ⁻⁶ /K.

Електрични

отпор	>10 ¹⁴ Ohm,
диелектрична јакост	900кV/cm,
диелектрична константа	2.25,
фактор на губитоци	2x10 ⁻⁴ .

Механички

ползење (20% оптоварување)	лоша (1x10 ⁻² % дневно),
надолжна јакост на затегнување	одлична,
надолжен модул	одличен,
надолжна компресивна јакост	одлична.

HPPE влакната можат да се користат во комбинација со повеќе комерцијални типови на смоли како што се: винилестерските, епоксидните, полиестерските, а во големо количество се користат и во неконструктивни апликации. Заради малата маса (0,97g/cm³), способноста да пловат во вода, абразивната отпорност и добрата отпорност на цикличен замор, наоѓаат широка примена во морнарицата за изработка на јажиња. Како композити се користат за изработка на чамци, јарболи и друго, како и за балистичка заштитна опрема. Исто како и арамидните влакна, многу тешко се сечат. Оваа особина ја комплицира нивната употреба во некои композитни апликации, но е многу поволна за изработка на некои типови ткаенини. На пример, овие влакна се користат за изработка на несечливи (cut-resistant) заштитни нараквици, заштитна облека во индустријата за преработка на месо, маталургијата и во индустријата за стакло [66]. Во комбинација со стаклените и

кварцните влакна се користат како структурни компоненти во авиоиндустријата. Во најново време, заедно со арамидните влакна, наоѓаат широка примена во телекомуникациите, каде што се користат како носечки елементи за оптичките кабли [67,68].

Споредбените карактеристики на HPPE влакна со другите типови на зајакнувачки влакна се дадени во табелата бр. 3.

Табела 3. Основни карактеристики на некои технички влакна

Table 3. General properties of some technical fibers

	Густина	Јакост/Strength			Модул/Modulus			Издолж. Elong.
	Density	N/tex	g/den	GPa	N/tex	g/den	GPa	
DyneemaSK60	0.97	2.8	32	2.7	91	1025	89	3.5
Dyneema SK65	0.97	3.1	35	3.0	97	1100	95	3.6
Dyneema SK66	0.97	3.3	37	3.2	101	1150	99	3.7
Aramide-regular	1.44	2.05	23	2.9	41	470	60	3.6
Aramide-composite	1.45	2.05	23	2.9	83	935	120	1.9
Aramide-ballistic	1.44	2.35	26	3.3	52	590	75	3.6
Carbon HS	1.78	1.9	22	3.4	134	1500	240	1.4
Carbon HM	1.85	1.2	14	2.3	210	2400	390	0.5
E-glass	2.60	1.35	15	3.5	28	315	72	4.8
S-glass	2.50	1.85	21	4.6	34	385	86	5.2
Polyamide HT	1.14	0.8	9	0.9	5	56	6	20
Polyester HT	1.38	0.8	9	1.1	10	110	14	13
Polypropylene	0.90	0.6	7	0.6	6	70	6	20
Челик/Steel	7.86	0.2	2	1.77	25	225	200	1.1

4.3. БАЛИСТИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА КОМПОЗИТНИТЕ МАТЕРИЈАЛИ

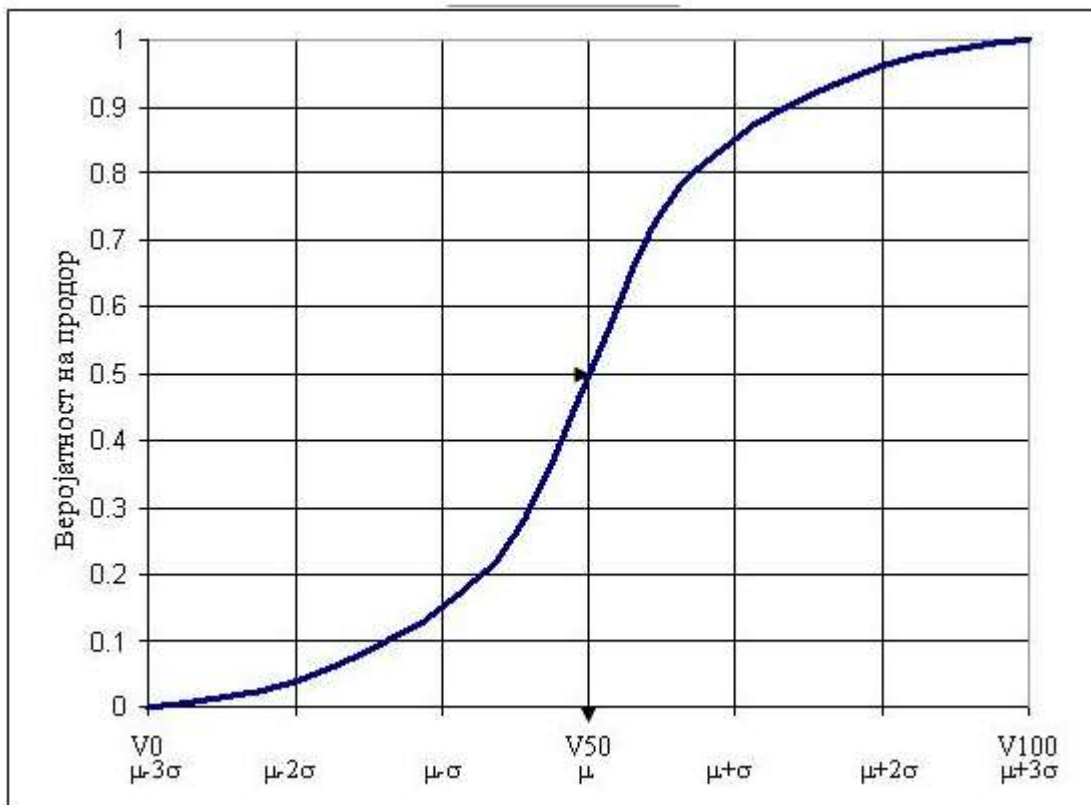
Под балистички перформанси или карактеристики на композитните материјали се подразбира балистичката јакост и трауматолошкиот ефект. Балистичката јакост претставува отпор на материјалот со кој се спротивставува на пенетрацијата на проектилот и се мери со балистичката карактеристика V_{50} . Трауматолошки ефект се нарекува деформацијата на композитниот материјал што се јавува како

последица на балистичкиот удар. Неговиот ефект се проценува преку површината и длабината на деформацијата.

4.3.1. ДЕФИНИЦИЈА НА БАЛИСТИЧКАТА КАРАКТЕРИСТИКА V_{50}

Фундаментално за концептот на балистичката јакост е врската меѓу веројатноста на пенетрација во материјалот и ударната брзина на проектилот. Оваа врска проектил-материјал ги задоволува математичките услови за дистрибуција на веројатноста, при што, за мали брзини веројатноста на продор се стреми кон нула, за големи брзини, се приближува кон 1, а меѓу овие екстремни вредности на брзината, веројатноста на продор се зголемува со зголемувањето на брзината на проектилот. Ако земеме дека овој општ модел го опишува физичкиот процес, тогаш веројатноста на продор може да биде третирана како дистрибуција на веројатноста и обично се опишува како Гаусова или нормална распределба [58,59] (слика бр. 15).

Кривата на нормалната распределба на веројатноста на продор е прикажана на сликата бр. 11. Од неа може да се види дека V_{50} е 50-тиот процент (медиан) на дистрибуцијата. Со други зборови, веројатноста за продор при брзини поголеми од балистичкиот лимит (V_{50}) е поголема од 0.5 а при брзини помали од балистичкиот лимит е помала од 0.5. Прифатениот симбол за балистичкиот лимит, V_{50} кој е централна точка во кривата на веројатноста, го изразува процентниот концепт за можниот продор на проектилот.



Слика 11. Веројатност на продор во однос на ударна брзина

Figure 11. Probability of penetration vs. striking speed

Во многу случаи знаењето на централната вредност е доволно, но во некои случаи е потребно поголемо познавање на дистрибуцијата. На пример, ако е потребно да се знае нивото на брзината при која балистичкиот материјал би дал високо ниво на заштита односно мала веројатност на продор, потребно е да се пресметаат додатните вредности како V_{10} и V_{20} . Но, најдено е дека кривата на нормалната Гаусовата распределба на веројатноста дава прилично добра претстава за веројатноста на продор во многу ситуации.

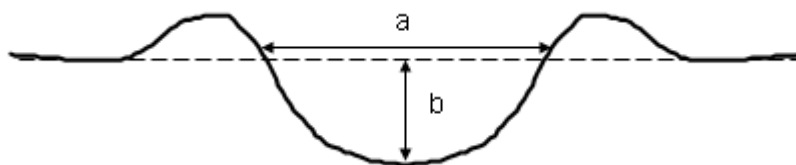
Реално, карактеристиката V_{50} претставува статистичка вредност на статистичкиот тест којшто го развила американската армија за евалуација на балистичката заштита на воени возила, а ја означува брзината при која даден проектил има 50 % веројатност да го пробие (за оптимистите 50% веројатност да не го пробие) балистичкиот материјал што се тестира [69]. Таа се определува со испалување на симулатори на фрагменти или куршуми врз испитниот материјал со брзини на претпоставената вредност V_{50} за тој тип на материјал.

V_{50} не е физичка големина со која се карактеризира еден материјал. Таа е само

статистичка вредност што помага да се проценат балистичките перформанси на некој материјал и/или да се споредат меѓу себе повеќе материјали. Ако за некој материјал се знае дека има вредност за V_{50} на пример 420 m/s и ако се пука во него со ист симулатор со кој е евалуирана таа вредност, со брзина од 420m/s, шансите да се пробие тој материјал односно да не се пробие се еднакви. Дури, тој материјал може да се пробие и со помала брзина односно да не се пробие и со поголема брзина од 420 m/s. Не е необично при испитувањето, заради анизотропноста на композитниот материјалот, да се добијат задори (задор-задршка на проектилот во материјалот) со поголема брзина од оние на продорите.

4.3.2. ТРАУМАТОЛОШКИ ЕФЕКТ

Трауматолошкиот ефект ја претставува деформацијата на задната страна од испитуваниот материјал што се јавува како последица на балистичкиот удар кога зрното е задржано во материјалот. Овој ефект е дефиниран во американскиот полициски стандард NIJ 0101.06. Тоа е еден од најугледните, најексплоатираните и најцитираните стандарди за балистичка заштитна опрема (БЗО) во светот. Како референца се користи и во нашите министерства за одбрана и внатрешни работи. Интензитетот на трауматолошкиот ефект се мери со дијаметарот односно површината (*a* на слика 12) и со длабината (*b* на слика 12) на деформацијата.



Слика 12. Трауматолошка површина и длабина

Figure 12. Trauma area and depth

Во горниот стандард специфицирана е само максимално дозволената длабина на трауматолошкиот ефект која е 44 mm (1.73 in).

5. СУРОВИНИ ЗА КОМПОЗИТИ ЗА ЛИЧНА БАЛИСТИЧКА ЗАШТИТА (RAW MATERIALS FOR COMPOSITES FOR PERSONAL BALLISTIC PROTECTION)

Во истражувањата во склопот на овој магистерски труд беше користена ткаенина од арамидни и препрег од HPPE влакна како зајакнувачи и специјален смолен систем врз база на фенол-формалдехидна смола како матрица. Пред изработката на композитите ткаенината беше преработена во полупроизвод (препрег) со импрегнација со приготвениот смолен систем на полуиндустриска машина за импрегнација.

Покрај тоа беа користени повеќеслојни, еднонасочни препрези врз база на HPPE влакна како суровини за изработка на композитите.

5.1. СМОЛЕН СИСТЕМ

За изработка на композитите во склопот на овој магистерски труд беше користен модифициран фенол-формалдехиден смолен систем за чие добивање беа користени следниве суровини: обична фенол-формалдехидна смола, поливинилбутирал и етанол.

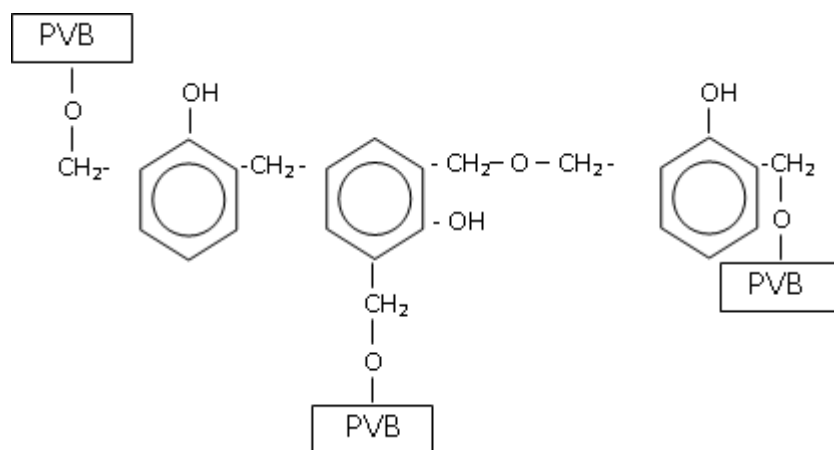
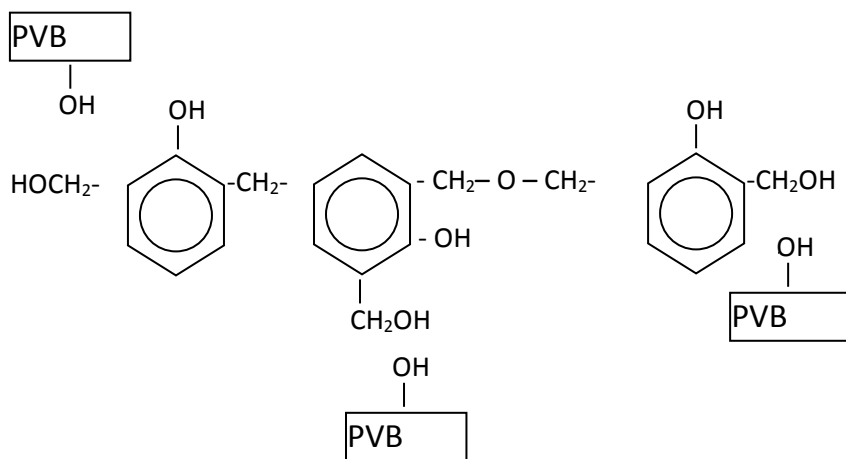
5.1.1. ПОДГОТОВКА НА СМОЛНИОТ СИСТЕМ

Поливинилбутиралот кој се испорачува во форма на бел прашок се подготвува како 10% раствор во етанол со негово постепено додавање во загреан алкохол на 50°C, при постојано мешање и протресување сè до постигнување на хомоген и транспарентен изглед.

По растворањето се врши контрола на:

- содржината на сува супстанца (која треба да е во границата 10-12%) и
- вискозитетот по Ford 4 mm /20 °C (кој треба да е во границите 150-300 s).

Добивањето на модифицираниот фенол-формалдехиден смолен систем се врши со мешање на поливинилбутиралот и фенол-формалдехидната смола во различен однос од 0/100 - 50/50, на температура од 50 °C, при што настанува реакцијата прикажана на сликата бр. 13 [73].



Слика 13. Реакција на PVB со фенолна смола
 Figure 13. Reaction of PVB with phenolic resin

Растворите од PVB (10-12%) и фенол-формалдехидната смола (се разредува до 50% пред мешањето) се земаат во количества кои обезбедуваат односот на сувите супстанции на PVB/смола да биде 0/100, 10/90, 20/80, 30/70, 40/60 и 50/50. Питоа, потребната содржина на сува материја од 14-17% се регулира со додавање на етанол во системот.

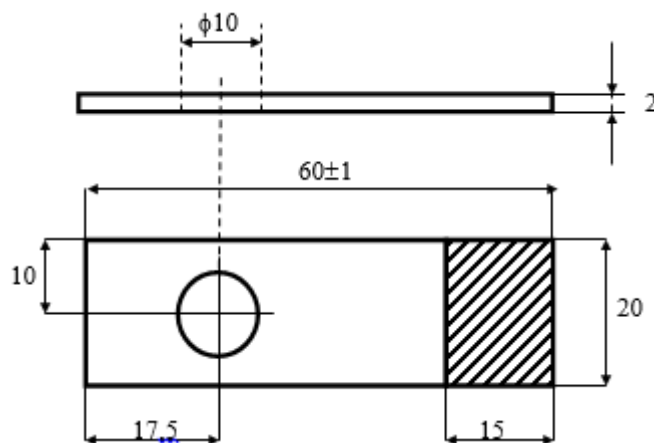
5.1.2. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА СМОЛНИОТ СИСТЕМ

Кај готовиот смолен систем се врши контрола на:

- содржината на сувиот остаток (треба да биде 14-17 %);
- вискозитетот по Ford, 4mm/20 °C (треба да биде 150-250 s);
- атхезивните карактеристики;
- механичките карактеристики на одливци и
- времето на гелирање.

Првите две технолошки карактеристики се мерат и се дотеруваат при подготвувањето на смолниот систем.

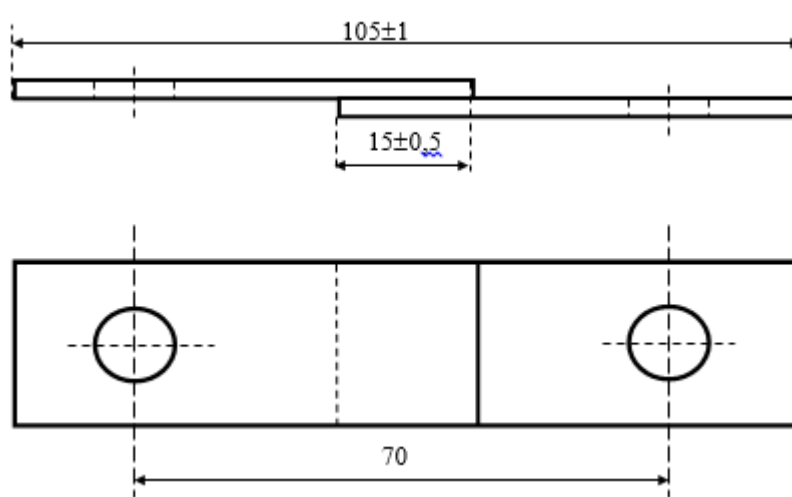
Атхезионите својства на системот се испитуваат преку мерењето на отпорноста на смолкнување при затегнување на смолниот систем. За таа цел се користат челични епрувети во форма како што е прикажана на сликата бр. 14.



Слика14. Димензии на епруветите за испитување на смолкнување

Figure 14. Dimension of the specimens for tensile testing

Претходно одмастени, добро исчистени и исушени епрувети (постапката е според интерен воен стандард) се премачкуваат со филм од смолниот систем (исенчената површина на сликата бр. 14) со дебелина 0.05- 0.15 mm. Потоа епруветите се ставаат во сушарница за да настане гелирање (105 °C, 60 мин.) на смолата. По гелирањето, епруветите се поставуваат во специјална приправа, во парови една наспроти друга, како на сликата бр. 15, се оптоваруваат со 2 kN/cm² и се ставаат во сушарница (150±5°C, 45 мин.).



Слика 15. Изглед на залепената епрувета
Figure 15. Look of the prepared specimens

Во сушарата, смолата (која кај единечните епрувети е во Б-состојба) делумно се растопува и потоа во текот на предвиденото време се вмрежува при што настанува слепување на единечните епрувети меѓу себе. По вадењето од сушарницата, епруветите се оставаат да се изладат до собна температура пред да се испитаат.

За испитување користена е универзална машина (universal testing machine) од фирмата Schenk AG од Германија со снага од 250 kN. Низ отворите на краевите од епруветите се ставаат пинови кои се прицврстени во грипите на машината. Пиновите се со нешто помал дијаметар од дијаметарот на епруветите, така што при испитувањето епруветата има можност да се прилагоди и точно да го заземе правецот на дејствување на силата без да има странични напони. Испитувањето на јакоста на смолкнување при истегнување се врши со брзина на оптоварување од 5mm/min. Отпорноста на смолкнување при истегнување се пресметува како:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A}$$

каде што:

σ_s - отпорност на смолкнување при истегнување (Pa),

F_s - најголемата сила на смолкнување отчитана на дисплејот од машината (N),

A - слепената површина (m²).

5.2. ЗАЈАКНУВАЧКИ СИСТЕМ

5.2.1. Ткаенини

Во истражувањата во склопот на овој магистерски труд како зајакнувачки системи беа користени арамидни и HPPE влакна. Карактеристиките на користените материјали се дадени во табелата бр. 4.

Табела 4. Карактеристики на користените ткаенини

Table 4. Properties of used fabrics

Карактеристика Property	Единица Unit	Арамидна ткаенина Aramide fabric	HPPE ткаенина HPPE fabric
Трговска ознака Trade sign		T713	5006
Тип на ткаење Weave type		1x1	1x1
Површинска Маса/ Areal weight	g/m ²	280+7	295+8
Дебелина Thickness	mm	0.43	0.28
Тип на предиво Yarn type јаток		1260dtex 1260 dtex	SK76 1760 SK76 1760
Број на предива Потка/weft Основа/warp	cm ⁻¹	11.0 10.5	8 8
Јакост на затегнување, јаток основа Tensile strength weft warp	N/5cm N/5cm	9500 10000	19300 19300
Финиш Finish		нема no finish	нема no finish

Посебна подготовка пред употребата на ткаенината нема. Таа се употребува во форма како што се испорачува од производителот со тоа што се врши проверка на појдовните карактеристики. Особно се обрнува внимание на површинската маса заради точно прилагодување на содржината на матрица-зајакнувач во препрегот.

5.2.2. Еднонасочни препрези

Во истражувањата во склопот на овој магистерски труд беа користени два типа повеќеслојни, еднонасочни препрези врз база на HPPE влакна, производство на DSM High Performance Fibers и тоа :

Dyneema HB 212и Dyneema Dyneema HB 210 (слика бр. 16).



Слика 16. Конструкција на еднонасочните препрези
Figure 16. Construction of unidirectional prepregs

И двата материјали се наменети за изработка на тврда балистика (во ознаката HB значи Hard Ballistics). Нивните карактеристики се дадени во табелата бр. 5.

Табела 5. Карактеристики на еднонасочните препрези

Table 5. Properties of unidirectional prepregs

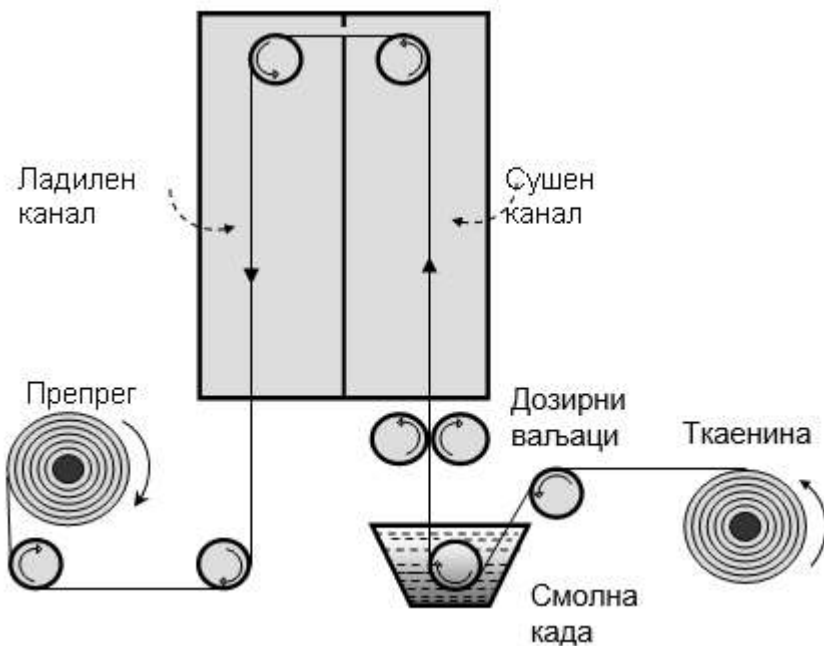
	Единица	Dyneeme HB 212	Dyneeme HB 210
Површинска маса	g/m ²	131 - 141	130 - 142
Содржина на матрица	Мас. %	18 - 20	17 - 21
Тип на матрица		гума	полиуретан
Број на слоеви		4	4

6. КОМПОЗИТИ ЗА БАЛИСТИЧКА ЗАШТИТА (COMPOSITES FOR BALLISTIC PROTECTION)

Сите балистички композити, двонасочни и еднонасочни, се изработени во прототипската лабораторија за композитни материјали при „11Октомври-Еурокомполит“ - Прилеп. Тестирањето па механичките и балистичките особиние извршено во истата фирма.

Двонасочните композити се изработени со импрегнирање на два типа ткаенини, араидна и од НРРЕ, со приготвените смолни системи и со пресување па препрегот. Еднонасочните композити што се изработени од два типа еднонасочен препрег се добиваат само со пресување. Кај нив фазата на импрегнација отпаѓа со оглед па тоа што тие материјали од производителот се испорачуваат заедно со матрицата која е во вид на филм.

Импрегнацијата па ткаенините е вршена во полуиндустриска вертикална машина за импрегнирање, производство на швајцарската фирма Caratach AG, а шематски е претставена на сликата бр. 17.



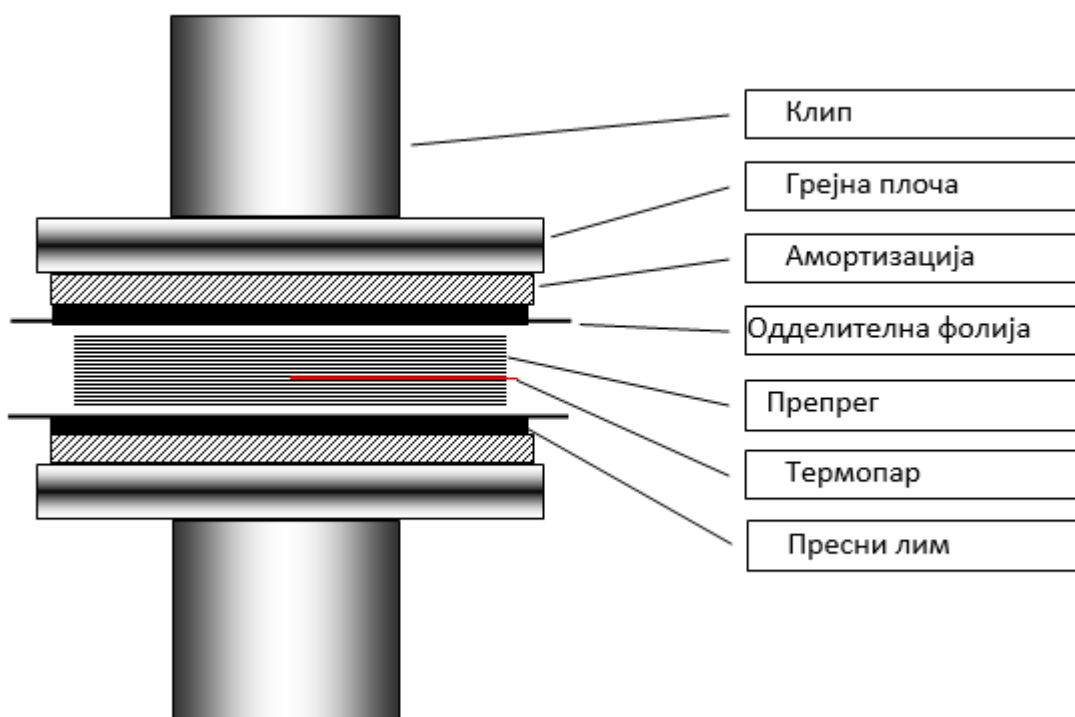
Слика 17. Шема на машината за импрегнирање
 Figure 17. Layout of the impregnating machine

Ткаенината од станицата за одмотување („ткаенина“ на шемата) преку насочувачки цилиндри се доведува во кадата со смола каде што се импрегнира. Вишокот на смола се „симнува“ со дозирните цилиндри по кои импрегнираната ткаенина поминува низ сушниот и низ ладилниот канал. Готовиот препрег на излезот има температура 25-30 °C и се намотува во ролни или веднаш се сече на даден формат.

Импрегнацијата на арамидната ткаенина ја вршевме на 150-160 °C, додека на полиетиленската, на 125-130°C .

Пресувањето на сите композитни плочи го вршевме на хидраулична преса со снага од 200 кN, производ на фирмата Tgiulzi од Италија. Освен при испитувањето на зависноста на балистичките карактеристики на композитите од притисокот на пресување, во сите останати случаи притисокот на пресување беше 6000 кPa. Изгледот на шаржирната преса со пакетот за пресување е претставен на сликата бр. 18.

Исто како при импрегнацијата, пресувањето на арамидната ткаенина го вршевме на 150-160 °C, додека на полиетиленската и на еднонасочните препрези, на 125-130 °C . Причина за тоа е што полиетиленските влакна се топат над 135 °C.



Слика18. Пресување па балистички ламинати

Figure 18. Compressing of ballistic laminates

Времето па пресување кое е различно за композитите со различна дебелина се одредува според релацијата

$$t = a + bx$$

каде што:

t – време па пресување (min),

a, b –коефициенти,

x – претпоставена дебелина на композитот според бројот на слоевите (mm).

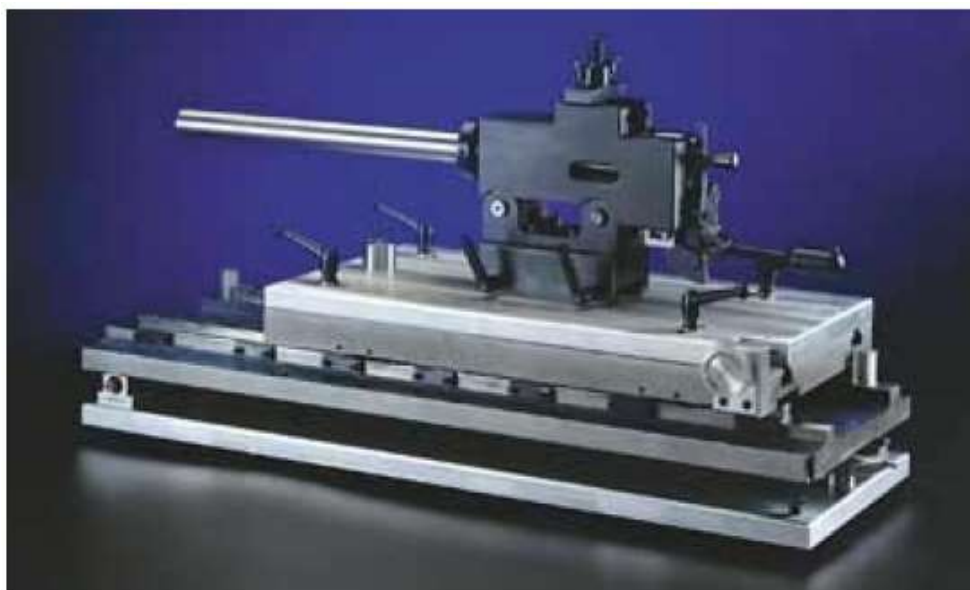
Коефициентите a, b се определуваат емпириски, а зависат од типот па употребената матрица и преставуваат деловна тајна.

7. МЕТОДИ ЗА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НА БАЛИСТИЧКИТЕ ПЕРФОРМАНСИ (METHODS FOR EVALUATION OF BALLISTIC PERFORMANCE)

7.1. ИСПИТУВАЊЕ НА V_{50}

Балистичките испитувања се вршат во специјализирана лабораторија за таа намена. Лабораторијата за балистичко испитување се состои од следнава основна опрема:

- *Универзален уред за испалување* на тест муницијата кој се состои од сталажа со механизам за испалување и цевка со определен калибар (слика бр. 19). Механизмот за испалување е универзален и се користи при сите испитувања при што се менува само цевката во зависност од калибарот на тест муницијата. Истиот механизам се користи, како за испалување на фрагменти, така и за куршуми.



Слика 19. Универзална сталажа за испалување

Figure 19. Univerzal firing unit

За секое определување на V_{50} , испалувани се 20-25 фрагменти. На сликата бр. 20 е претставен примерок на композитната плоча по балистичкото испитување.



Слика 20. Балистичка испитна композитна плоча
Figure 20. Ballistically tested panel

Пресметувањето на V_{50} се врши по формулата 10.

$$V_{50} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_1^{N_{pi}} V_{pi}}{N_{pi}} + \frac{\sum_1^{N_{zi}} V_{zi}}{N_{zi}} \right]$$

каде што:

$$V_{psr} = \frac{\sum_1^{N_{pi}} V_{pi}}{N_{pi}}$$

$$V_{zsr} = \frac{\sum_1^{N_{zi}} V_{zi}}{N_{zi}}$$

ИЛИ

$$V_{50} = \frac{V_{psr} + V_{zsr}}{2}$$

каде што:

V_{50} - брзина на 50% веројатност на продор,

V_{psr} - средна брзина на продор,

V_{zsr} - средна брзина на задор,

V_{pi} - поединечна брзина на продор,

V_{zi} - поединечна брзина на задор,

N_{zi} - број на задорите,

N_{pi} - број на продорите.

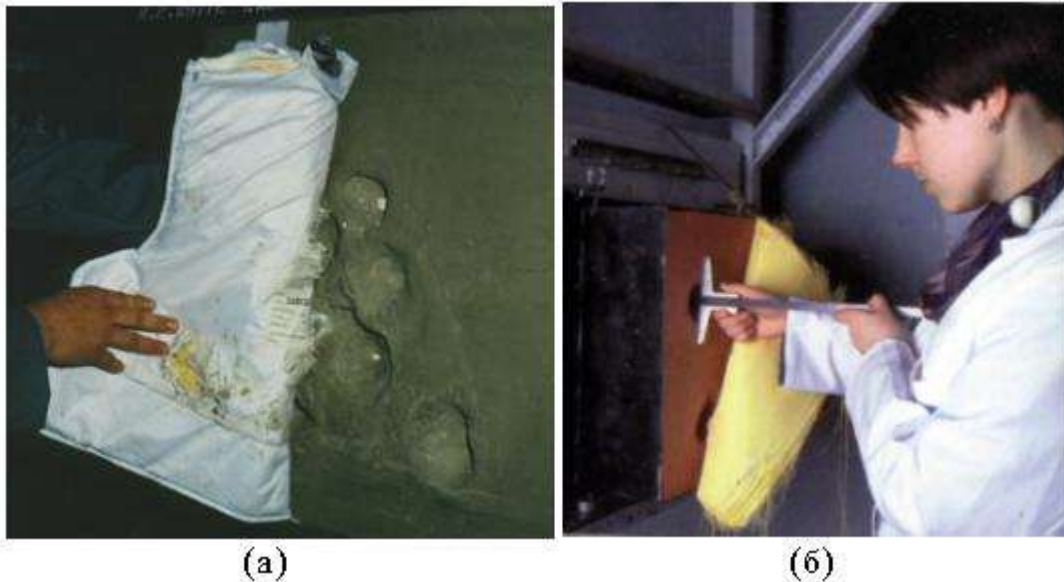
Средната брзина на задор претставува аритметичка средина од седумте истрели со најголема брзина кои се запрени од композитот, а средната брзина на продор, соодветно, е аритметичка средина од седумте истрели со најмала брзина кои извршиле пробој. За валидно се смета она испитување, кај кое, покрај другите услови, разликата меѓу средните брзини на продор и задор не е поголема од 25 m/s:

$$V_{psr} - V_{zsr} \leq 25 \text{ m/s}$$

По истата постапка опишана за фрагменти се врши испитување и за муниција. Но, во тој случај се определува V_{50} за даден тип муниција, а вредноста е валидна само за тој еден тип муниција.

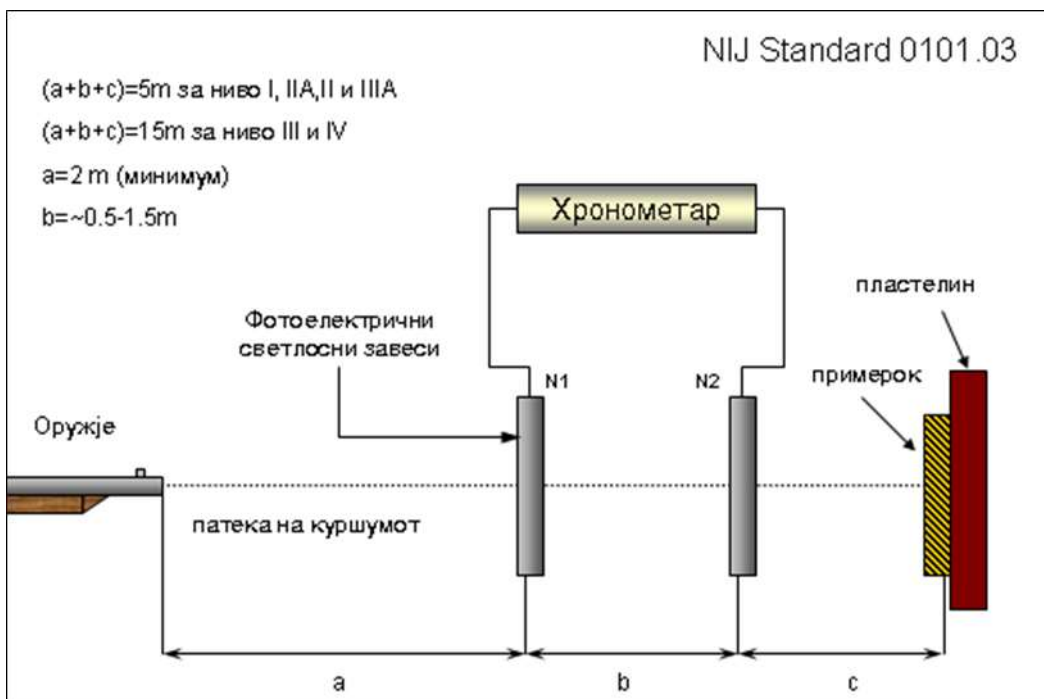
7.2. ИСПИТУВАЊЕ НА ТРАУМАТОЛОШКИОТ ЕФЕКТ

Трауматолошкиот ефект (слика бр. 12) се јавува како последица на балистичкиот удар од пушкина/пиштолска муниција врз композитната плоча, додека, ако се работи за удар на фрагменти, тој ефект е занемарлив. Ако на задната страна од испитуваната композитна плоча се прислони доволно голем (61 x61cm) и дебел (10.2 cm) блок од пластелин со дефинирана тврдина, тогаш деформацијата на композитната плоча по балистичкиот удар, се пресликува врз пластелинот (слика бр. 21). Длабината и дијаметарот на отисокот во пластелинот се земаат како податоци за трауматолошкиот ефект што го трпи композитот.



Слика 21. Трауматолошки ефект врз арамиден панел (а) и негово мерење (б)
 Figure 21. Trauma effect of aramid panel (a) and its measurement (б)

Шемата на опремата за испитувањето (вршено е според угледниот американскиот полициски стандард NIJ 0101.03) на балистичката јакост и на трауматолошкиот ефект е претставена на сликата бр. 22.



Слика 22. Шема на опремата за испитување со куршуми
 Figure 22. Layout of the equipment for testing with bullets

Во горниот стандард специфицирана е само дозволената длабина на трауматолошкиот ефект која не смее да биде поголема од 44 mm (1.73 in).

8. ОСОБИНИ НА КОМПОЗИТИТЕ (PROPERTIES OF THE COMPOSITES)

8.1. МЕХАНИЧКИ ОСОБИНИ НА КОМПОЗИТИТЕ

Со оглед на тоа дека PVB има големо влијание врз особините на незајакнатите смолни системи, очекувавме дека ќе има влијание и врз зајакнатите смолни системи односно композитите. За таа цел изработивме композити од сите типови на зајакнувачки влакна наменети за механички и балистички испитувања. Балистичките композити се изработени со површинска маса од 6 kg/m² затоа што таа дебелина најмногу одговара за стандардното барутно полнење на тест муницијата и е потребна помала корекција во споредба со други дебелини. Од друга страна, оваа дебелина е најприкладна за изработка на балистички шлемови. Притисокот на пресување во сите случаи е стандарден, 6 МПа, додека температурата е прилагодена според карактеристиките на зајакнувачките влакна. Кај НРРЕ ткаенините таа е околу 125 °С, додека кај останатите околу 155°С.

За изработка на балистичките композити земени се трисмолни системи и тоа со екстремна содржина на PVB: 0% и 50% и со средна содржина на PVB од 25%. З Овие системи се земени со цел полесно да се согледа разликата во V₅₀ кај соодветните композити, доколку таа постои.

Како што е објаснето во теоретскиот дел, карактеристиката V₅₀ е статистичка големина чија вредност, покрај другото, зависи многу и од човечкиот фактор, односно од искуството на операторот кој го врши испитувањето. Ако при ова, како фактор го додадеме и барутното полнење кое секогаш не согорува во стопроцентно идентичен режим, јасно е дека при испитувањето овие фактори можат да влијаат врз добиените резултати. Од тие причини за изработка на композитите земени се екстремните смолни системи од кои се очекува да покажат најголема разлика во балистичките карактеристики на композитите и јасно да ја покажат тенденцијата на промената. Смолниот систем PVB/фенол-формалдехидна смола 25/75 е земен како референца која ќе послужи да ја потврди (или демантира) тенденцијата што се очекува да ја покажат екстремните смолни системи.

Со овие смолни системи извршена е импрегнација на араמידната и

полиетиленската ткаенина со содржина на смола од 20 vol.%, содржина на испарливи материји во препрезите 0.5-1.5% и време на гелирање од 90+15 s. Изборот за содржината на смола од 20 vol. % која е земена како оптимална, направен е врз база на истражувањата за влијанието на односот зајакнувачки влакна/ матрица врз балистичките карактеристики.

Резултатите од механичките испитувања на композитите (табели бр. 6 и 7) покажаа голема разлика меѓу нив, што воопшто не е необично со оглед на тоа дека кај сите нив се вградени влакна со различни механички особини кои директно се рефлектираат врз особините на композитите.

Табела 6. Влијание на составот на смолниот систем врз механичките особини на композитите врз база на арамидна ткаенина и 20% фенол-формалдехидна матрица

Table 6. Influence of of the resin system on aramide fabric and 20 % phenolic matrix

Карактеристика Property	Единица Unit	Однос PVB/фенолна смола Ratio PVB/phenolic resin (mas.%)			Промена Change (%)
		0/100	25/75	50/50	
Јакост на затегнување Tensile strength	MPa	766	766	766	766
Модул на затегнување Tensile modulus	GPa	42.3	42.3	42.3	42.3
Издолжување Elongation	%	1.81	1.81	1.81	1.81
Јакост на свивање Flexural strength	MPa	780	780	780	780
Јакост на притисок Compression strength	MPa	317	317	317	317
Јакост на удар, Шарпу Impact strength Charpy	kJ/m ²	309	309	309	309
Јакост на смолкнување Shear strength	MPa	52.3	52.3	52.3	52.3

Табела 7. Влијание на составот на смолниот систем врз механичките особини на композитите врз база на HPPE ткаенина и 20% фенол-формалдехидна матрица

Table 7. Influence of of the resin system on the mechanical properties of composites based HPPE fabric and 20 % phenolic matrix

Карактеристика Property	Единица Unit	Однос PVB/фенолна смола Ratio PVB/phenolic resin (mas.%)			Промена Change (%)
		0/100	25/75	50/50	
Јакост на затегнување Tensile strength	MPa	717	726	719	-
Модул на затегнување Tensile modulus	GPa	40.5	39.2	38.2	- 5.7
Издолжување Elongation	%	1.77	1.85	1.88	+6.2
Јакост на свивање Flexural strength	MPa	736	744	740	-
Јакост на притисок Compression strength	MPa	302	296	296	-
Јакост на удар, Шарпу Impact strength Charpy	kJ/m ²	301	312	319	+5.9
Јакост на смолкнување Shear strength	MPa	50.8	52.6	52.9	+4.1

Покрај тоа што постои огромна разлика во механичките особини меѓу композитите, исто така, постои разлика и во интензитетот на влијанието на смолниот систем врз одделни механички особини. Најголемо влијание смолниот систем има врз меѓуламинарната јакост на смолкнување и ударната јакост, додека врз останатите механички особини неговото влијание е помало.

8.2. БАЛИСТИЧКИ ОСОБИНИ НА КОМПОЗИТИТЕ

Како што е познато од механиката на композитите зајакнати со влакна, носители на механичките карактеристики се влакната [78,79,80] што се покажа и со резултатите од механичките испитувања на балистичките композити. Истата констатација можеме да ја примениме и за балистичката отпорност на композитите. Носител на балистичката отпорност на композитите се влакната. Некои автори [81,82,83] балистичката отпорност ја третираат како механичка карактеристика односно како ударна јакост или жилавост при екстремни брзини на зголемување на оптоварувањето во споредба со оптоварувањето при тестирањето на ударната јакост според методите на Charpy или Izod. Оттука и размислувањата дека, како и другите, така и оваа механичка карактеристика е детерминирана од влакната.

За испитување на балистичките особини на композитите од подготвените препрези направени се балистички плочи со димензии 300 x 400 mm и со површинска маса од 6 kg/m². Кај секоја вака подготвена плоча (термините плоча, композит и ламинат во овој труд се користат како синоними и се однесуваат на едно исто) испитана е балистичката карактеристика V_{50} , а резултатите од испитувањето се дадени во следните табели.

Табела 8. V_{50} во зависност од содржината на модификаторот во матрицата кај композити од арамидна ткаенина/фенол-формалдехидна смола со површинска маса од 6 kg/m^2 и содржина на матрица од 20%

Table 8. V_{50} dependance from the matrix modifier by aramid fabric/phenolic composites with areal weight of 6 kg/m^2 and matrix content of 20 %

PVB/смола (mas.%)	Брзина, m/s	Поединечни брзини на проектилот, m/s							Средни брзини, m/s	ΔV_{sr} , m/s	V_{50} , m/s	Зголему - вање, %
		1	2	3	4	5	6	7				
0/100	V_z	373.5	385.2	389.2	382.1	378.2	373.8	380.0	$V_{zsr} = 380.3$	16.8	388.7	-
	V_p	395.1	390.2	404.5	402.8	391.4	409.0	387.0	$V_{psr} = 397.1$			
25/75	V_z	379.6	387.2	394.6	390.2	393.2	380.5	391.8	$V_{zsr} = 388.2$	22.6	399.5	2.8
	V_p	420.6	410.3	410.8	404.0	406.2	403.9	419.7	$V_{psr} = 410.8$			
50/50	V_z	397.2	399.6	407.1	402.6	408.9	401.3	409.7	$V_{zsr} = 403.7$	14.4	410.9	5.7
	V_p	422.6	417.5	426.3	417.0	414.3	417.6	411.2	$V_{psr} = 418.1$			

Табела 9. V_{50} во зависност од содржината на модификаторот во матрицата кај композити од HPPE ткаенина/фенол-формалдехидна смола со површинска маса од 6 kg/m^2 и содржина на матрица од 20%

Table 9. V_{50} dependance from the matrix modifier by HTTP fabric/phenolic composites with areal weight of 6 kg/m^2 and matrix content of 20 %

PVB/смола (mas.%)	Брзина, m/s	Поединечни брзини на проектилот, m/s							Средни брзини, m/s	ΔV_{sr} , m/s	V_{50} , m/s	Зголему - вање, %
		1	2	3	4	5	6	7				
0/100	Vz	406.4	406.1	413.4	412.3	412.6	401.5	420.3	$V_{zsr} = 410.4$	18.7	419.7	
	Vp	424.6	421.9	432.1	430.1	441.1	431.2	422.5	$V_{psr} = 429.1$			
25/75	Vz	421.3	409.4	427.4	425.6	410.7	413.5	424.5	$V_{zsr} = 418.9$	22.9	430.3	2.5
	Vp	433.5	438.9	442.1	450.6	440.9	437.0	449.7	$V_{psr} = 441.8$			
50/50	Vz	430.6	433.5	421.9	437.6	438.5	433.1	430.7	$V_{zsr} = 432.3$	12.5	438.6	4.5
	Vp	451.2	452.3	444.3	438.7	439.2	441.5	446.5	$V_{psr} = 444.8$			

Кај личната балистичка заштита таквата матрица не е применлива заради огромната пластична деформација што ја трпи композитот по балистичкиот удар. Што значи тоа во реални услови на експлоатација покажано е на примерот од балистичкиот шлем (слика бр. 40) кој е направен од термопластична матрица.



Слика 23. Балистички шлем со термопластична матрица тестиран во реални услови

Figure 23. Ballistic helmet with thermoplastic matrix tested in real environment

На местото на ударот од проектилот се јавува огромна пластична деформација (темето, ушите) на композитот која може да биде кобна за носителот иако проектилот не го пробил материјалот.

Пластичната деформација кај сите испитувани композити (со 0%, 25% и 50% PVБ во матрицата) беше помала од 44 mm колку што е максимално дозволено според NIJ 0101.03.

Исто така, сите направени испитувања посочуваат на тоа дека со комбинацијата на терморективнта со термопластичната матрица е добиен смолен систем, кај кој едната со другата смола во системот, на некој начин, ги компензираат своите недостатоци и резултираат во систем со подобри апликативни вредности.

9. ВЛИЈАНИЕ НА ОДНОСОТ ВЛАКНА/МАТРИЦА ВРЗ БАЛИСТИЧКАТА ЈАКОСТ НА КОМПОЗИТИТЕ (INFLUENCE OF FIBER/MATRIX RATIO ON THE BALLISTIC STRENGTH OF COMPOSITES)

По дефиниција за композити се сметаат материјалите коишто се состојат од две или повеќе хемиски различни фази забележливи на макро скала, со видливи меѓуповршини кои ги раздвојуваат фазите [85]. Оваа дефиниција, во полна мерка, се однесува на пластиците зајакнати со влакна, кои сигурно претставуваат најголема и најзначајна група на современи композитни материјали. Тие, главно, се состојат од два конституента или фази: зајакнувачка фаза или влакна и врзивна фаза или матрица. Улогата на матрицата во композитот е да врши трансфер на оптоварувањето меѓу влакната, да ги држи влакната во определена ориентација и да ги штити од механички оштетувања и од оштетувања предизвикани од околината. Оваа улога главно ја вршат терморективни или термопластични полимери. Улогата на влакната е да му дадат јакост и крутост на композитот и повторно кај современите композитни материјали. Таа улога ја имаат полимерите. Всушност познато е дека материјалите во влакнеста форма поседуваат највисоки механички карактеристики. Особено тоа е карактеристично за полимерите, а причина за тоа е ориентираноста на молекулите долж оската на влакното. Нивните карактеристики можат да се споредуваат со теоретски пресметаните вредности врз база на маѓуатомските сили.

Особините на композитите главно се определени од особините, распределбата и интеракцијата на нивните конституенти. Особините на зајакнатите пластици каде што конституенти се зајакнувачки влакна и полимерна матрица можат да бидат дадени како сума на производите на особините на конституентите и нивната зафатнинска фракција односно со таканареченото правило на смеси ги дава равенката

$$P_c = P_v V_v + P_s V_s$$

каде што:

P_c - особината на композитот,

P_v - особината на влакната,

P_s - особината на смолата,

V_v - волуменскиот удел на влакната во композитот,

V_s - волуменскиот удел на смолата во композитот.

Ако земеме дека особината P е балистичката отпорност, имајќи ја предвид горната релацијата и земајќи таблични вредности за балистичките јакости на смолата и влакната многу лесно ќе ја одредиме балистичката јакост на композитот.

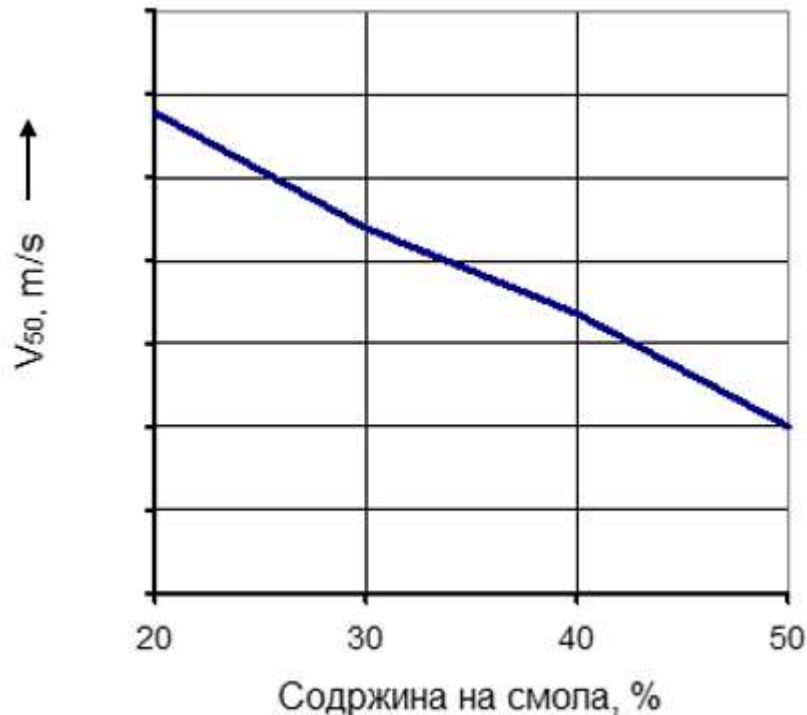
Но, конституентите реагираат меѓу себе на синергетски начин, па особините на композитите не можат да се изразат со правилото на смеси т.е.

$$P_c \neq P_v V_v + P_s V_s$$

Случаите кога важи неравенката се многу почести од случаите кога важи правилото на смеси за особините на композитите. Имено, особините на композитите зависат од особините на конституентите, содржината на конституентите и интеракцијата меѓу нив (синергетскиот ефект), распределбата на конституентите, геометријата и ориентацијата на влакната. Содржината на конституентите, претставена преку зафатнинскиот удел во композитот, покрај особините на конституентите, секако дека е најважниот параметар што ги одредува особините на композитот. Тој претставува лесно контролирана променлива преку која се менуваат особините на композитот.

Резултатите од испитувањето го потврдуваат фактот дека односот на конституентите во композитот има извонредно големо значење врз неговите особини. Кај сите механички карактеристики доаѓа до промена со промената на односот на конституентите. Со порастот на содржината на матрицата во композитот доаѓа до намалување на јакоста на затегнување, свивање, притисок и удар, како и на модулот на затегнување, додека издолжувањето при прекин се зголемува (табела бр. 9). Единствено кај јакоста на смолкнување не доаѓа до некоја забележлива промена што е сосема разбирливо бидејќи таа зависи единствено од атхезијата меѓу матрицата и влакната, но не и од нивната количина.

Како што можеше и да се очекува со зголемувањето на содржината на матрицата, односно со намалувањето на содржината на влакната, правопрпорционално се намалува балистичката отпорност на композитот (слика бр. 24). Тоа наведува на фактот дека влакната се носители и на балистичките карактеристики кај композитите, а не само на механичките што го потврдува заклучокот дека независно од видот на конституентите, *влакната се носители на балистичките особини кај композитите.*



Слика 24. Балистичката отпорност во зависност на содржината на конститuentите кај композитите

Figure 24. Ballistic strength vs. resin content

Ова е потврдено со низа специфични истражувања на голем број автори [88,89]. Во најголем број случаи кај современите балистички материјали и двата конститuentи се полимери. Специфично во истражувањата е тоа што се правени балистички испитувања не еден ист полимер во влакнеста и во монолитна форма. На пример, испитувани се полиестерски, полиамидни и полиетиленски монолитни плочи и ткаенини од истите полимери. Во сите случаи ткаенините се покажале далеку посупериорни од монолитните плочи што наведува на заклучок дека само во влакнеста форма полимерите можат успешно да се спротивстават на балистичкиот удар.

Но, за балистичка заштита се користат и монолитни материјали. Челикот и керамиката тоа го прават во невлакнеста форма, но кај нив механизмот на заштита е многу поразличен од оној кај пластиката. Тие таа своја функција, пред сè, ја извршуваат благодарение на една друга нивна особина - извонредно големата тврдина. Пластичните маси не ја поседуваат таа особина, па во таква (невлакнеста) форма не можат да се употребат за балистичка заштита во

прифатлива дебелина. Единствено во влакнеста форма во која има висока ориентација на молекулите по должина на оската на влакната, пластичните материјали можат да се употребат за таа намена.

Во овој контекст може да се постави прашањето зошто се развиваат и се користат скапи пластични влакнести материјали кога може да се користат исто толку успешно метални (челични, титански...) или керамички (B_4C , SiC ...) влакна. Причина за тоа е масата и конфорот во носењето. Основен параметар за користење на балистичката заштита, покрај балистичките перформанси е масата, без разлика дали се работи за персонална или за заштита на возила, хеликоптери, објекти итн. Всушност, полимерните влакна имаат највисока специфична јакост односно јакост по единица маса во однос на сите познати материјали, како на пример, HPPE влакната кои имаат 10 пати повисока специфична јакост од онаа на најквалитетниот челик [91].

Улогата на матрицата кај балистичките композити е да изврши трансфер на балистичкиот удар меѓу слоевите од ткаенината. Самата матрица нема балистички карактеристики и не може со својата балистичка јакост да даде директен придонес кон севкупната балистичка отпорност на композитот. Проектилот без проблем поминува низ одливот на фенол-формалдехидна матрица, без разлика на дебелината [92]. Но, матрицата индиректно може да даде придонес. Таа мора да биде присутна во доволна количина за да ги поврзе слоевите на ткаенината во еден компактен материјал, но треба да биде и доволно еластична за да врши амортизација на ударот.

Балистичките испитувања покажаа дека неопходната количина на матрицата во композитите е 20% или 1/4 од волуменот на влакната.

Композитите со овој удел на матрица покажаа највисока балистичка отпорност.

Добиените резултати можеме многу едноставно да ги објасниме и преку градбата на композитите, слика 25.



Слика 25. Број на слоеви на ткаенина кај композитите

Figure 25. Number of layers in the composite

Овие вредности ќе ги објасниме и од друга гледна точка: преку бројот на слоевите на ткаенината. Кај композитите со 20 % матрица во градбата употребени се 24 слоеви на ткаенина; кај оние со 30%- 21 слоеви; кај оние со 40%-18 слоеви и кај оние со 50% - 15 слоеви.

Иако кај сите композити површинската маса е еднаква, во суштина во првиот композит со 30% смола сме употребиле 12.5% помалку материјал, во тој со 18 слоеви, 25% помалку, а во тој со 15 слоеви, 37.5% помалку. Со други зборови, содржината на смолата над 20% служи само да ја зголеми масата на композитот, без да даде придонес кон балистичката отпорност. Оттука е сосема јасно зошто се добива прогресивно опаѓачка балистичка јакост со зголемувањето на содржината на матрицата како што е претставено на сликата 24.

10. ВЛИЈАНИЕ НА ПОВРШИНСКАТА МАСА ПРИ МИНИМАЛНА И МАКСИМАЛНА СОДРЖИНА НА МАТРИЦА ВРЗ БАЛИСТИЧКАТА ЈАКОСТ НА КОМПОЗИТИТЕ (INFLUENCE OF THE AREAL WEIGHT BY MINIMAL AND MAXIMAL CONTENT OF THE MATRIX ON THE BALLISTIC STRENGTH OF THE COMPOSITES)

При изборот на балистичката заштитна опрема постојат три основни критериуми по кои треба да се раководи потенцијалниот купувач. Тоа се балистичките перформанси (балистичката јакост и трауматолошкиот ефект), масата и цената.

Критериумот перформанси е важен од аспект на тоа што опремата треба да штити од опасноста од којашто сака корисникот да се заштити. Како што е веќе споменато, опремата може да биде наменета да штити или од фрагменти или од куршуми. Ако е наменета да штити од фрагменти, тогаш е значајна брзината и масата на фрагментот. Ако е, пак, наменета да штити од куршуми, тогаш значаен е типот на куршумот.

Критериумот маса е важен од аспект на тоа што масата директно се одразува врз оптоварувањето и мобилноста на носителот на опремата. Денес, современиот војник (барем во големите светски сили) е високо обучен професионалец кој дејствува, помалку или повеќе, индивидуално. Тој носи голема маса на современа опрема, како што се ноќен визир, ласерски управувано оружје, комуникациска опрема итн. Војниците на САД, на пример, носат околу 45 kg основна опрема. Без разлика на современата техничка опрема, основната балистичка заштита против фрагменти и куршуми останува неопходна. При вака голем број на опрема, јасно е дека секој грам помалку или повеќе има значење. Императив е таа да биде што е можно полесна со што би се намалило оптоварувањето и заморот на носителот од една страна и би се зголемила неговата мобилност, од друга страна. Заради тоа, како неопходна, извонредно е важно колкава маса таа поседува БЗО.

Критериумот цена, иако не е технички фактор како претходните два, не е ништо помалку важен при изборот на опремата. Имено, постои голема разлика во цената на чинење меѓу стаклените, најлонските, араמידните и полиетиленските ткаенини (опсег 1:20) која се зголемува токму по тој редослед. Оттука и цената на балистичката опрема врз база на овие конституенти се разликува.

Кај некои купувачи, цената може да биде доминантен фактор, кај други перформансите, а кај трети масата.

Целите на ова истражување се во функција на дефинирање на балистичките композити според два основни критериума, масата и перформансите. Јасно е дека

површинската маса односно дебелината, зададен вид композит, при константност на останатите параметри, има големо влијание врз V_{50} и сосема е логично да се очекува композитите со поголема површинска маса да имаат поголема вредност на V_{50} . Првата цел е да се определи таа зависност меѓу површинската маса и балистичката јакост кај проучуваните композити. Со користење на методот на полн факторен експеримент треба математички да се дефинира балистичката зависност од површинската маса и од односот на конституентите во испитуваниот опсег. Математичката дефиниција во вид на регресиони равенки треба да овозможи „кроење“ на композитите според специфичното барање односно дефинирање на типот на композитот, неговата површинска маса како и односот на конституентите без да се прават макотрпни, долготрајни и скапи проби.

За извршување на целите од сите типови материјали направени се композити со површинска маса од 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9 kg/m^2 и тоа една серија со однос на конституентите матрица/влакна од 20/80 и друга серија со однос 50/50. Сите композити се пресувани при 6000 кРа, при температура и време соодветно на типот и дебелината на композитот.

Корелација меѓу површинска маса и балистичка јакост

Изборот на површинската маса беше направен во границите 2 до 9 kg/m^2 затоа што овој опсег има смисла за лична балистичка заштитна опрема. Помала маса од 2 kg/m^2 не би дала задоволителна балистичка заштита дури ни за фрагменти со мала брзина. Поголема површинска маса од 9 kg/m^2 нема смисла заради проблемите што ги предизвикува при носењето, а тоа се замор и тромост на носителот. Особено, оваа маса нема смисла во случај на балистички шлем затоа што при удар на проектил со голема кинетичка енергија, човековиот врат не би да го издржал ударот, иако шлемот би останал непробиен, па таквата голема балистичка заштита воопшто не би била оправдана.

Од друга страна, за истражување се земени крајните односи на конституенти смола/влакна (20/80 и 50/50) во ламинатите со цел да се покрие целото подрачје што може индустриски да се постигне. Причините за одредувањето токму на овие крајни граници е претходно објаснето.

Во табелите бр. 10 и 11 се дадени резултатите од испитувањето на балистичката карактеристика V_{50} на композитите со однос на конституентите 20/80, а во табелите бр. 13 и 14, на композитите со однос на конституентите 50/50.

Табела 10. V_{50} кај композити арамидна ткаенина/модифицирана фенол-формалдехидна смола со различна површинска маса и 20% содржина на смола

Table 10. V_{50} for aramid fabric/phenolic composites with different areal weight and 20% resin content

Површ. маса, kg/m ²	Брзина, m/s	Поединечни брзини на проектилот, m/s							Средни брзини, m/s	ΔV_{sr} , m/s	V_{50} , m/s
		1	2	3	4	5	6	7			
2	Vz	231.5	236.4	230.8	237.7	238.0	236.9	233.1	Vzsr=234.9	7.9	238.9
	Vp	246.2	238.6	239.7	242.0	247.6	238.5	247.0	Vpsr=242.8		
3	Vz	269.3	268.1	275.0	279.2	277.4	273.6	281.6	Vzsr=274.9	15.4	282.6
	Vp	298.6	292.4	283.7	288.6	293.2	292.1	283.7	Vpsr=290.3		
4	Vz	322.7	323.4	328.5	331.7	333.5	337.1	335.2	Vzsr=330.0	12.8	336.4
	Vp	349.7	347.0	340.5	337.2	338.5	340.6	346.2	Vpsr=342.8		
5	Vz	362.5	357.8	356.9	368.6	366.2	363.1	359.3	Vzsr=362.1	18.1	371.2
	Vp	373.7	374.2	381.6	388.7	385.4	383.2	374.7	Vpsr=380.2		
6	Vz	397.2	399.6	407.1	402.6	408.9	401.3	409.7	Vzsr=403.7	14.4	410.9
	Vp	422.6	417.5	426.3	417.0	414.3	417.6	411.2	Vpsr=418.1		
7	Vz	455.3	458.1	450.3	450.7	457.2	448.9	459.7	Vzsr=454.3	9.8	459.2
	Vp	465.2	459.8	473.2	470.0	461.1	460.2	459.4	Vpsr=464.1		
8	Vz	500.8	505.6	510.2	513.7	514.2	507.0	507.9	Vzsr=508.5	12.6	514.8
	Vp	530.0	527.4	520.6	515.8	517.2	520.9	515.9	Vpsr=521.1		
9	Vz	542.4	547.6	552.3	554.7	557.1	549.6	555.3	Vzsr=551.3	11.4	557.0
	Vp	569.4	565.2	563.1	556.8	559.2	561.4	563.6	Vpsr=562.7		

Табела 11. V_{50} кај композити HPPE ткаенина/модифицирана фенол-формалдехидна смола со различна површинска маса и 20% содржина на смола

Table 11. V_{50} for HPPE fabric/phenolic composites with different areal weight and 20% resin content

Површ. маса, kg/m ²	Брзина, m/s	Поединечни брзини на проектилот, m/s							Средни брзини, m/s	ΔV_{sr} , m/s	V_{50} , m/s
		1	2	3	4	5	6	7			
2	Vz	267.2	260.5	262.4	258.6	259.3	267.0	269.3	Vzsr=263.5	10.8	268.9
	Vp	282.2	280.6	275.1	269.3	270.5	272.6	269.9	Vpsr=274.3		
3	Vz	305.0	307.6	300.2	296.5	301.4	298.2	308.8	Vzsr=302.5	12.4	308.7
	Vp	317.5	320.6	311.4	310.5	308.6	315.2	320.3	Vpsr=314.9		
4	Vz	344.2	348.7	354.2	359.6	350.1	353.0	356.6	Vzsr=352.3	15.4	360.0
	Vp	373.8	378.1	362.5	360.4	361.7	369.0	368.2	Vpsr=367.7		
5	Vz	392.5	398.6	403.0	407.6	402.5	399.0	402.9	Vzsr=400.9	17.8	409.8
	Vp	425.6	420.3	416.2	410.3	420.7	417.3	420.5	Vpsr=418.7		
6	Vz	430.6	433.5	421.9	437.6	438.5	433.1	430.7	Vzsr=432.3	12.5	438.6
	Vp	451.2	452.3	444.3	438.7	439.2	441.5	446.5	Vpsr=444.8		
7	Vz	492.1	495.3	500.3	488.7	496.2	491.0	499.7	Vzsr=494.8	8.8	499.2
	Vp	507.7	506.2	500.5	501.6	498.6	506.5	504.2	Vpsr=503.6		
8	Vz	522.8	527.5	532.1	533.4	530.6	525.6	525.3	Vzsr=528.2	11.4	533.9
	Vp	542.8	546.0	533.9	535.2	531.3	547.6	540.3	Vpsr=539.6		
9	Vz	573.2	570.5	566.2	577.5	579.2	576.5	575.3	Vzsr=574.1	12.9	580.6
	Vp	596.4	592.5	589.0	581.3	582.0	581.5	586.4	Vpsr=587.0		

Табела 12. V_{50} кај композити арамидна ткаенина/модифицирана фенол-формалдехидна смола со различна површинска маса и 50% содржина на смола

Table 12. V_{50} for aramid fabric/phenolic composites with different areal weight and 50% resin content

Површ. маса, kg/m ²	Брзина, m/s	Поединечни брзини на проектилот, m/s							Средни брзини, m/s	ΔV_{sr} , m/s	V_{50} , m/s
		1	2	3	4	5	6	7			
2	Vz	205.0	211.0	203.7	214.6	202.7	203.2	215.8	Vzsr=208.0	18.7	217.4
	Vp	229.5	228.0	234.1	232.5	220.1	218.9	223.7	Vpsr=226.7		
3	Vz	243.6	251.8	250.7	244.2	247.9	250.9	248.9	Vzsr=248.9	10.6	253.6
	Vp	262.4	253.5	259.7	266.3	264.5	251.2	254.5	Vpsr=258.9		
4	Vz	292.5	299.4	291.7	305.4	306.8	300.4	296.1	Vzsr=298.9	15.8	306.8
	Vp	322.1	320.7	317.4	308.2	309.1	313.6	311.6	Vpsr=314.7		
5	Vz	331.6	335.2	343.1	342.8	342.6	337.5	342.3	Vzsr=339.0	12.4	345.2
	Vp	360.4	357.2	344.6	349.8	353.2	350.0	344.6	Vpsr=351.4		
6	Vz	357.3	359.8	363.2	368.4	371.5	366.2	367.0	Vzsr=364.8	17.5	373.6
	Vp	387.4	386.2	380.5	375.2	376.1	383.2	387.4	Vpsr=382.3		
7	Vz	410.8	407.5	404.9	417.6	419.2	415.8	410.9	Vzsr=412.4	18.8	421.8
	Vp	437.5	432.6	427.5	423.6	433.8	436.2	427.1	Vpsr=431.2		
8	Vz	454.8	457.2	464.5	460.2	468.8	467.3	463.5	Vzsr=462.3	14.3	469.5
	Vp	483.5	487.0	472.5	470.6	471.2	477.2	474.3	Vpsr=476.6		
9	Vz	493.1	497.5	503.1	506.2	498.7	500.4	491.7	Vzsr=498.6	11.6	504.4
	Vp	515.9	513.6	508.7	506.4	512.3	508.7	505.9	Vpsr=510.2		

Табела 13. V_{50} кај композити HPPE ткаенина/модифицирана фенол-формалдехидна смола со различна површинска маса и 50% содржина на смола

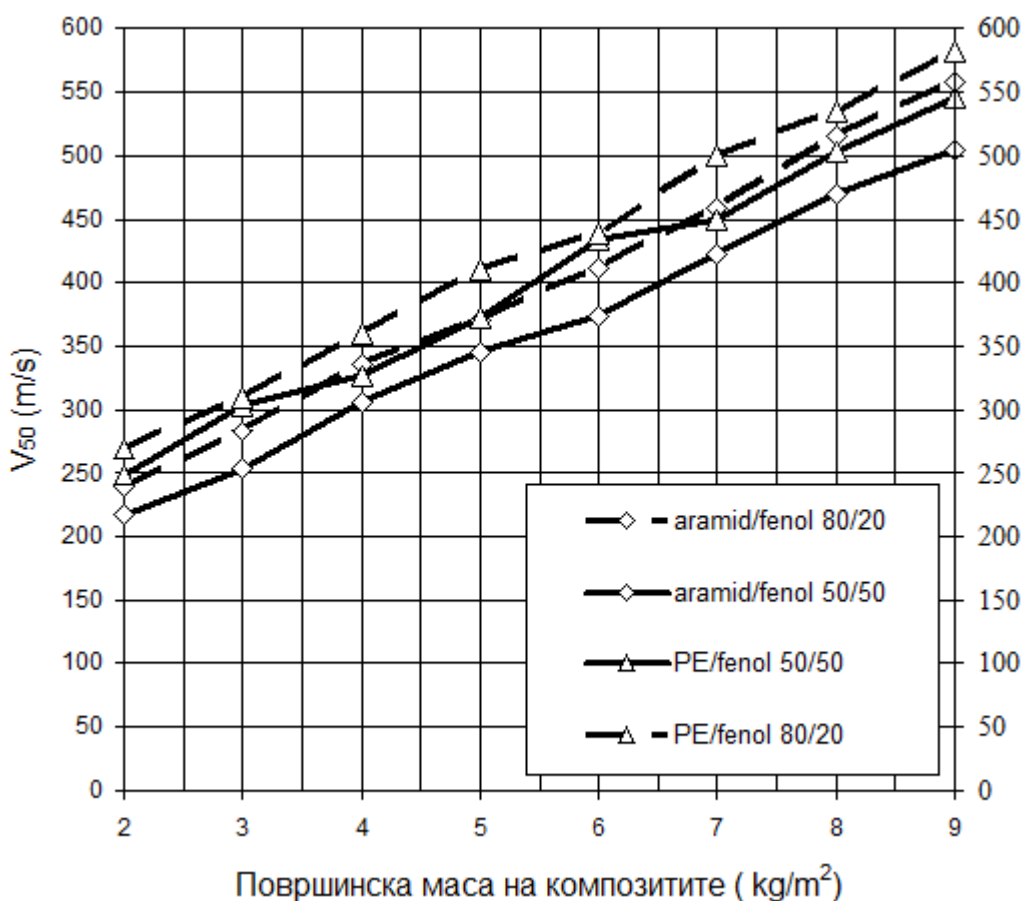
Table 13. V_{50} for aramid HPPE/phenolic composites with different areal weight and 50% resin content

Површ. маса, kg/m^2	Брзина, m/s	Поединечни брзини на проектилот, m/s							Средни брзини, m/s	ΔV_{sr} , m/s	V_{50} , m/s
		1	2	3	4	5	6	7			
2	Vz	232.5	236.7	245.2	241.6	231.5	246.0	238.6	Vzsr=238.9	18.2	248.0
	Vp	256.2	259.0	249.3	250.2	266.3	258.2	260.4			
3	Vz	296.7	299.5	302.7	300.2	296.0	288.7	290.4	Vzsr=296.3	14.0	303.3
	Vp	313.5	304.6	309.1	317.5	319.4	306.5	301.3			
4	Vz	324.6	319.0	316.5	317.2	323.8	321.2	318.9	Vzsr=320.2	11.5	326.0
	Vp	337.4	332.6	327.5	329.4	326.2	339.5	329.3			
5	Vz	358.7	360.2	366.4	370.3	373.5	362.5	357.7	Vzsr=364.2	16.6	372.5
	Vp	383.2	387.5	390.0	374.5	376.2	373.5	380.6			
6	Vz	392.6	392.5	381.5	398.6	406.3	401.8	399.5	Vzsr=396.1	12.5	408.6
	Vp	412.5	429.1	424.0	426.2	425.5	413.9	416.8			
7	Vz	437.2	439.8	445.0	447.2	439.1	443.5	436.5	Vzsr=441.2	17.4	449.9
	Vp	467.9	469.1	450.6	453.2	459.7	457.6	451.5			
8	Vz	485.6	490.2	497.2	495.2	500.7	491.2	495.0	Vzsr=493.6	19.1	503.2
	Vp	513.6	520.4	510.6	504.0	506.2	515.4	518.6			
9	Vz	533.7	541.2	538.2	543.7	540.2	537.9	544.3	Vzsr=539.9	11.8	545.8
	Vp	559.4	552.7	548.1	547.2	555.2	550.7	548.7			

Од табелите 10, 11, 12 и 13 може да се забележи големата разлика во механичките особини меѓу композитите со однос на конститuentите смола/влакна 20/80 и 50/50. Композитите со однос 20/80 во секој поглед се супериорни. Исто така, веднаш може да се забележи разлика во балистичките перформанси меѓу различните композити при иста површинска маса што, секако, се должи на разликата во особините на употребените ткаенини односно влакна.

Најдобри балистички карактеристики покажаа композитите врз база на HPPE влакна. Арамидните композити имаат незначително полоши карактеристики од полиетиленските.

На сликата со испрекинати линии се претставени композитите со однос на конститuentите смола/влакна 50/50, додека со полни линии е претставен соодносот 20/80.

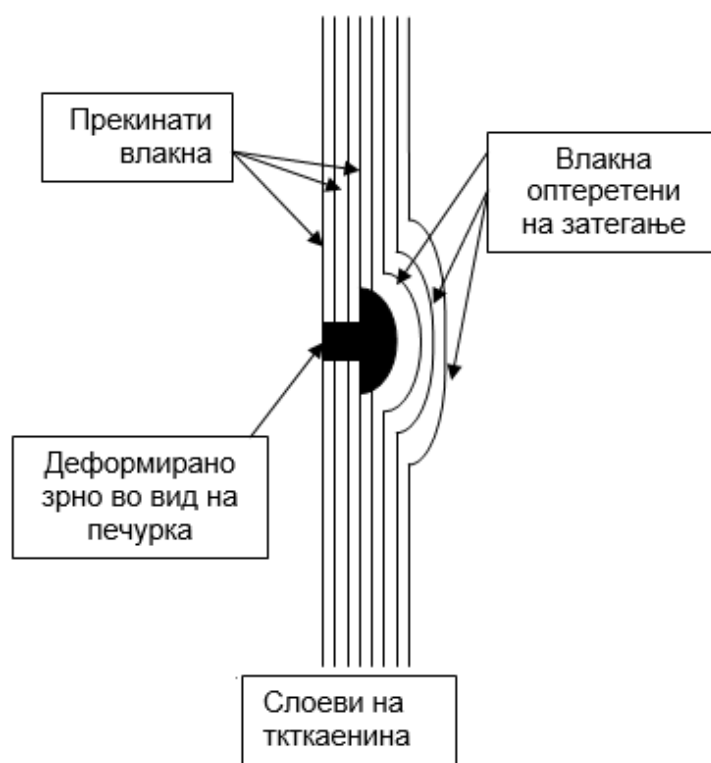


Слика 26. V_{50} во зависност од површинската маса кај композитите со однос на конститuentите матрица/влакна 20/80 и 50/50

Figure 26. V_{50} vs. areal weight for the composites with resin/fiber ratios of 20/80 and 50/50

Исто така, може да се забележи дека во испитуваниот опсег на површински маси, слика 26, V_{50} се зголемува пропорционално со зголемувањето на површинската маса. Карактеристично е што нагибот на кривите кај композити со однос на конститuentите 20/80 како и кај оние со -50/50 е скоро идентичен. Композитите со однос на конститuentите смола/влакна 50/50 во сите случаи покажаа полоши карактеристики од оние со однос 20/80 со што уште еднаш се потврдува фактот дека влакната имаат доминантна улога во балистичката заштита.

Wendlant [94] направил микроскопската анализа на пресекот на местото на ударот на проектилот која покажува дека фронтот на пенетрирачкото зрно ги оптоварува удрените влакна на затегнување што во почетокот резултира со кинење на влакната и пенетрација на зрното во композитот (слика бр.27). Тоа значи дека една од особините на влакната која влијае на стопирањето на зрното е јакоста на влакното при што важи едноставна релација за пропорционалната зависност на ефикасноста на стопирањето на проектилот од јакоста на влакната.



Слика 27. Пресек на композитот на местото на пенетрацијата на проектилот [94]

Figure 27. Cross-section at the penetration spot of the projectile [94]

Но, сепак, само врз база на вредноста на оваа особина не може да се суди за балистичките перформанси на композитот. Имено, истражувањата што се

направени во САД [95, 96] меѓу балистичките перформанси на полиамидните и експерименталните полипропиленски влакна покажаа полоши балистички карактеристики на полипропиленските композити иако се очекуваше спротивното затоа што полипропиленските влакна поседуваат поголема јакост од полиамидните. Во врска со ова Laible [97] известува дека врската меѓу механичките особини на влакната и балистичките карактеристики на ткаенината исткаена од такви влакна не е никогаш воспоставена.

Вредностите за јакоста на употребените влакна се дадени во табелата бр. 14.

Табела 14. Основните физички карактеристики на употребените влакна

Table 14. General physical properties of used fibers

		Арамид Aramid	HPPE
Јакост на затегање Tensile strength	GPa	3.3	3.2
Модул Modulus	GPa	75	95
Густина, Density	g/cm ³	1.44	0.97
Издолжување Deformation	%	3.6	3.7

Јакоста на влакната во корелација со останатите механички особини не се пресликува подеднакво во балистичката отпорност. HPPE влакната имаат најголема специфична јакост на затегнување, а потоа следат арамидните. Во иста насока се и нивните балистички цврстини. Во секој случај, при продорот на зрното низ балистичката плоча доаѓа до оптоварување на затегнување и прекин на влакната. Колку е јакоста на влакната поголема, толку е поголем отпорот спрема зрното односно толку е поголема апсорпцијата на енергија. Тоа значи дека јакоста на затегнување на влакната е фактор кој влијае врз нивните балистички особини.

Друг фактор кој недвојбено го споменуваат повеќе автори [86,94,103,104] е соничната брзина на влакната. Тоа е карактеристика за брзината на преносот на звукот низ влакната или, со други зборови, тоа е брзина на преносот на деформиращкиот или шок-бранот (strain or shock wave) низ влакната кој настанува како последица на балистичкиот удар.

Соничната брзина зависи од модулот и густината на влакната и е дефинирана со долната релација:

$$v = \sqrt{(1/\mu)\partial\sigma/\partial\varepsilon} = \sqrt{E/\rho}$$

каде што:

v - сонична брзина на влакната

μ – линиска густина на влакната

σ – јакост на влакната

ε – деформација (издолжување) на влакната

E - модул на влакната

ρ - густина на влакната

Литературните податоци [104, 105, 106] за соничната брзина за типот на употребените влакна се презентирани во табелата бр. 15.

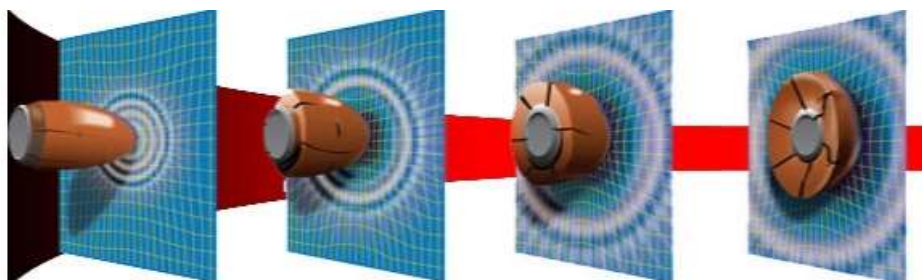
Табела 15. Сонична брзина на зајакнувачките влакна

Figure 15. Sonic velocity of reinforcing fibers

	Арамид Aramid	HPPE
Сонична брзина Sonic velocity	8200	10000

Највисока вредност за соничната брзина имаат HPPE влакната со вредност од 10000 m/s, потоа следат арамидните со 8200 m/s.

Како што е споменато погоре по балистичкиот удар во влакната, на местото на ударот се формира деформиранчки или шок бран кој патува долж влакната оддалечувајќи се од местото на ударот (слика бр. 28).



Слика 28. Пропагирање на ударниот бран

Figure 28. Propagation of the shock wave

Соничната брзина е карактеристика што одредува колкав пат ќе помине деформиращкиот бран по балистичкиот удар. Колку е тој пат поголем, толку повеќе влакна учествуваат во амортизацијата на балистичкиот удар односно толку поголема маса (должина) од ангажираните влакна учествува во амортизацијата резултирајќи во поголема балистичка отпорност. Оваа карактеристика, како што може да се види од претходната формула, директно зависи од модулот на влакната. Тоа значи дека, покрај јакоста, и модулот на влакната е фактор кој ја определува балистичката јакост на композитот.

За жал, нема модел кој го објаснува механизмот по кој особините на влакната, како што се јакоста и крутоста, се трансформираат во балистички перформанси односно стопирачка снага.

Како што објавуваат A.S.Verlinde и J.L. van Dingen [105] практично не постојат публикации кои ја третираат оваа тема. Постојат само емпириски согледувања, но не постои модел кој ги предвидува балистичките перформанси во функција од измерените особини на влакната. Според нив, дури не е ни јасно дали треба да се тежнее кон поголема јакост (поголема апсорпција на енергија) или кон поголем модул (поголема брзина на шок бранот во влакното) односно која од двете особини, модулот или јакоста, се поефикасни во запирањето на зрното. Традиционалните влакна, како што се оние што се формираат од растоп (melt-spun), полиамидните и полиестерските, на пример, покажуваат обратнопропорционална врска меѓу јакоста и модулот. Многу е тешко да се подобри едната карактеристика без да се влијае врз другата. Конструкторот на влакната треба да донесе одлука и во најмала рака му треба груб теоретски модел за тоа. За балистичките апликации, ваков модел не постои. Оваа констатација на овие автори има поголема „тежина“ кога се знае дека тие работат во фирмата DSM HPF токму на развој на влакна за балистичка апликација.

Од ова испитување како карактеристика за балистичките перформанси на композитите произлегува енергијата на апсорпција.

Таа претставува кинетичка енергија што материјалот може да ја апсорбира на единица површинска маса како што е дадено со следнава релација:

$$E_{abs} = \frac{Ek}{A\rho v}$$

каде што:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

каде што:

E_{abs} - апсорбирана енергија (J/(kg/m²)),

A_{rov} - површинската маса на композитот (kg/m²),

E_k - кинетичка енергија на проектилот (J),

m - маса на проектилот (kg),

v - брзина на проектилот (m/s).

Во табелите бр.16, 17, 18 и 19 се претставени кинетичките енергии на проектилите и енергиите на апсорпција за испитуваните композити во зависност од површинската маса.

Табела 16. Кинетичката енергија на проектилот и енергијата на апсорпција на композитите во зависност од површинската маса кај композитите со однос арамид/смола 80/20

Table 16. Kinetic energy of the projectile and energy of absorption fo aramid/resin composite with ratio 80/20

Површинска маса Areal weight, kg/m²	V₅₀, m/s	E_k, J	E_{abs}, J/(kg/m²)
2	238.8	42.8	21.4
3	282.6	59.9	20.0
4	336.4	84.9	21.2
5	371.2	103.3	20.7
6	410.9	126.6	21.1
7	459.2	158.1	22.6
8	514.8	198.8	24.8
9	557.0	232.7	25.9

Табела 17. Кинетичката енергија на проектилот и енергијата на апсорпција на композитите во зависност од површинската маса кај композитите со однос *HPPE/смола 80/20*

Table 17. Kinetic energy of the projectile and energy of absorption for *HPPE/resin composite with ratio 80/20*

Површинска маса, Areal weight, kg/m ²	V ₅₀ , m/s	Ек, J	E _{abs} , J/(kg/m ²)
2	268.9	54.2	27.1
3	308.7	71.5	23.8
4	360.0	97.2	24.3
5	409.8	126.0	25.2
6	438.6	144.2	24.0
7	499.2	186.9	26.7
8	533.9	213.8	26.7
9	580.6	25.2	28.1

Табела 18. Кинетичката енергија на проектилот и енергијата на апсорпција на композитите во зависност од површинската маса кај композитите со однос *арамид/смола 50/50*

Table 18. Kinetic energy of the projectile and energy of absorption for *aramid/resin composite with ratio 50/50*

Површинска маса, Areal weight, kg/m ²	V ₅₀ , m/s	Ек, J	E _{abs} , J/(kg/m ²)
2	217.3	35.4	17.7
3	253.9	48.3	16.1
4	306.8	70.6	17.6
5	345.2	89.4	17.9
6	373.6	104.7	17.4
7	421.8	133.4	19.1
8	464.6	161.8	20.2
9	504.4	190.8	21.2

Табела 19. Кинетичката енергија на проектилот и енергијата на апсорпција на композитите во зависност од површинската маса кај композитите со однос HPPE/смола 50/50

Table 19. Kinetic energy of the projectile and energy of absorption fo HPPE/resin composite with ratio 50/50

Површинска маса, Areal weight, kg/m ²	V ₅₀ , m/s	Ек, J	Eabs, J/(kg/m ²)
2	248.0	46.1	23.1
3	303.3	69.0	23.0
4	326.0	79.7	19.9
5	372.5	104.1	20.8
6	432.8	140.5	23.4
7	449.9	151.8	21.7
8	503.2	189.9	23.7
9	545.8	223.4	24.8

Енергијата на апсорпција која во испитуваниот опсег е константна(слика бр.45) може да се користи во проектирањето на балистичката опрема, но и за споредба на перформансите на балистичките материјали. Имено, доколку ја знаеме нејзината вредност, користејќи ги релациите 17 и 18 можеме да ја предвидиме V₅₀ за дадена површинска маса или за дадена V₅₀ можеме да предвидеме површинска маса односно дебелина на композитот што е потребна за успешна заштита.

Ваките пресметки важат само ако се работи за еден ист проектил, затоа што Eabs е целосно зависна од типот на проектилот. Пробојната моќ на проектилот, покрај од брзината и масата, зависи и од неговата геометрија (тој може да биде со остар, тап или рамен врв), од материјалот од кој што е направен (оловен, челичен и друг материјал или легура), од неговата конструкција (со или без кошулка и од материјалот на кошулката).

Математичка дефиниција на зависноста на балистичката јакост од површинската маса и односот на конститuentите

Со цел порационално одредување на најповолните параметри на процесот за добивање на опрема за лична балистичка заштита со прифатлива вредност на V₅₀, сите експерименти беа водени во согласност со методот на сефакторен

експеримент. Притоа, менувани се факторите површинска маса и односот на конститuentите и тоа секој на две нивоа. Останатите фактори кои влијаат врз V_{50} во овој експеримент се држат константни. Факторите се менувани во следниве граници:

- површинска маса: 2-9 kg/m^2
- однос на конститuentите смола/влакна: 20/80 и 50/50.

Методот на сефакторен експеримент дава можност да се направи математичко опишување на истражуваниот процес во некоја локална област на факторното пространство која се наоѓа во близина на избраната точка. За да се покрие целата област на факторното пространство, за површинската маса ја избравме точката $5.5 \pm 3.5 \text{ kg/m}^2$, а за содржината на смола точката $35 \pm 15\%$. Кодирањето на променливите е извршено спрема табелата бр. 20, додека план матрицата за експериментите е претставена во табелата бр. 21.

Табела 20. Кодирање на променливите

Table 20. Coding of the variables

	Површинска маса, kg/m^2	Содржина на смола, %
Нулно ниво, $X_i=0$	5.5	35
Интервал на варирање	3.5	15
Горно ниво, $x_i=+1$	9	50
Долно ниво $X_i=-1$	2	20
Кодна ознака	X_i	x_2

Табела 21. План матрица на експериментот

Table 21. Plan matrix of the experiment

Опити	x_1	x_2	x_1x_2	V_{50} , (m/s)	
				Арамид	НРРЕ
1	-1	-1	+1	238.9	268.9
2	1	-1	-1	557.0	580.6
3	-1	1	-1	217.4	248.0
4	1	1	+1	504.4	545.8

Функциите на одзивот (V_{50}) со кодирани променливи се означени со U_k , а оние со природни променливи се означени со U_n . Регресионите равенки за испитуваните композити го имаат следниов облик:

а) Композити арамид/фенол-формалдехидна смола

Равенка со кодирани променливи:

$$y_k = 379,43 + 151,26x_1 - 18,53x_2 - 7,78x_1x_2$$

Равенка со природни променливи:

$$y_n = 156,4238 + 48,4048x_1 - 0,4205x_2 - 0,1481x_1x_2,$$

б) Композити НРРЕ/фенол-формалдехидна смола

Равенка со кодирани променливи:

$$y_k = 410,825 + 152,375x_1 - 13,925x_2 - 3,475x_1x_2$$

Равенка со природни променливи:

$$y_n = 191,1286 + 45,8524x_1 - 0,5643x_2 - 0,0662x_1x_2$$

Од регресионите равенки може да се заклучи насоката и големината на влијанието на факторите и нивното меѓусебно содејство врз функцијата на одсивот V_{50} . Со зголемувањето на содржината на матрица во композитот се намалува (негативен предзнак пред променливата X_2) вредноста на функцијата на одсивот, додека со зголемувањето на површинската маса, таа се зголемува (позитивен предзнак пред променливата X_1). Вредностите на коефициентите пред променливите X_1 и X_2 го покажуваат интензитетот на влијанието на површинската маса и содржината на смола врз V_{50} . Може да се заклучи дека површинската маса има далеку поголемо влијание отколку содржината на смола (коефициентот пред x_1 е многу поголем од оној пред x_2).

в) Балистичката заштита од аспект на цената на чинење

Како што може да се види од горните резултати, одредена балистичка заштита може да се постигне со двата типа на композити и тоа со кој било однос на конститuentите смола/влакна во испитуваното подрачје од 20/80 до 50/50. Ако, на пример, имаме барање за балистичка заштита од $V_{50} = 300$ m/s, таа балистичка вредност може да се постигне со двата испитани композити со кој било однос на конститuentите во испитуваното подрачје, но со различна површинска маса. Знаејќи го односот на цените на конститuentите можеме да избереме таква комбинација чија цен е најниска.

11. ЗАКЛУЧОК (CONCLUSION)

1. Композитните материјали врз база на зајакнувачки влакна и полимерна матрица можат успешно да се користат за изработка на опрема за лична балистичка заштита. Со своите перформанси во однос на единица маса ги надминуваат традиционалните балистички заштитни материјали, металите и керамиката.

При балистичкиот удар врз композитот не настанува негово катастрофално рушење и тотално губење на наговата заштитна функција. Настанува само локално оштетување на местото од ударот, така што останатиот дел од материјалот, неафектиран, ја задржува својата заштитна функција за разлика од некои типови на керамика и крти метали кај кои настанува катастрофален лом по првиот балистички удар.

Тоа значи дека композитите можат успешно да штитат од повеќекратни балистички удари.

2. Фенол-формалдехидната смола, од аспект на нејзината достапност, цена на чинење и технички карактеристики, може успешно да се користи како матрица кај композитните материјали за лична балистичка заштита доколку се отстрани нејзината „вродена“ кртост.

3. Поливинилбутиралната смола како модификатор односно пластификатор за фенол-формалдехидната смола се покажа како добар избор за приготвување на импрегнирачкиот систем. Комбинацијата на термореактивна со термопластична смола придонесе да се компензираат односно да се ублажат недостатоците на поединечните полимери, преголемата кртост на фенолните смоли односно преголемата пластичност на поливинилбутиралната смола. Резултирачкиот импрегнирачки систем поседува извонредни процесни и апликативни карактеристики, многу подобри од нивните поединечни особини.

4. Системот фенол-формалдехидна смола/поливинилбутирал во кој односот на сувите супстанции на овие две компоненти е 1:1, се покажа како најдобар за изработка на балистички композити, како и со прифатливи процесбилни и економски и технички параметри за индустриска примена. Тоа е системот кој успешно се потврди во пракса и редовно се користи во сериското производство на балистичките композити во „110ктомври- Еурокомполит“ - Прилеп. Со зголемувањето на содржината на ПВБ во смолниот систем се зголемува, како ударната, така и балистичката отпорност, но се намалува кртоста на композитите.

5. Правилниот избор на полимерната матрица, иако таа самата нема балистички

карактеристики, може да влијае на подобрувањето на севкупните балистички карактеристики на композитот.

6. Балистичките композити од крта, чиста, термореактивна матрица покажуваат полоши балистички особини од оние со флексибилна матрица. Балистичките композити врз база на чиста поливинилбутирална смола имаат недостаток на крутост и не се погодни за апликација заради силно изразената пластичната деформација што ја трпи композитот по балистичкиот удар.

7. Споредбеното испитување на балистичките карактеристики меѓу арамидните и HPPE композитите покажа разлика. Со оглед на тоа дека композитите се изработени при еднакви услови, освен што е употребен различен тип на влакна, се покажа дека типот на влакната има доминантно влијание врз балистичките перформанси.

Најдобри особини покажаа композитите врз база на HPPE влакна. Арамидните композити имаат полоши карактеристики од полиетиленските.

8. Испитувањето на влијанието на односот на конститuentите врз балистичките карактеристики покажаа дека тој однос има извонредно големо значење врз нивните особини. Со зголемувањето на содржината на матрицата односно со намалувањето на содржината на влакната правопрпорционално се намалува балистичката јакост на композитот што наведува на заклучок дека влакната се носители на балистичките карактеристики кај композитите. Улогата на матрицата кај балистичките композити е да изврши трансфер на оптоварувањето меѓу слоевите од ткаенината, додека самата (чиста) матрица нема балистички карактеристики. За извршување на таа своја функција, потребно е да ја има во неопходно доволна количина. Како оптимална количина се покажа содржината од 20% во композитот, односно 1/4 од содржината на влакна. Помала количина од оваа доведува до неконзистентност на композитот и негова деламинација уште по првиот балистички удар. Поголемата количина од неопходно доволната нема никаков позитивен ефект, туку напротив, оневозможува поголема содржина (повеќе слоеви) на носечката балистичка компонента - влакната. Кај направените проби со зголемување на содржината на смолата од 20 до 50 %, значително се намалува балистичката јакост кај сите четири типа на композити. Екстремните вредности на содржина на матрица во композитите кои можат да се постигнат во дадените индустриски услови на производство се 20% и 80%.

9. Кај композитите забележано е правопрпорционално зголемување на V_{50} со зголемувањето на површинската маса од 2 kg/m^2 до 9 kg/m^2 што е сосема логично.

Карактеристично е што нагибот на зголемувањето е сличен кај двата композити. Ваква промена е забележена кај композитите со однос смола/влакна 20/80 и кај композитите со однос 50/50. Кај двата композити со однос смола/влакна 50/50 забележани се пониски механички и балистички вредности во споредба со композитите со однос 20/80 што наведува на заклучок дека влакната имаат доминантна улога, не само врз балистичките, туку и врз механичките карактеристики на композитите.

10. Јакоста и модулот на влакната се карактеристики кои директно влијаат врз балистичките карактеристики на влакната односно нивните композити. Појаките влакна потешко се кинат односно бараат поголема енергија за тоа, па оттука пружаат и поголем отпор на пенетрирачкото зрно. Високомодулните влакна овозможуваат поминување на подолг пат на деформациониот бран од местото на балистичкиот удар со што се ангажира поголема маса од материјалот во амортизацијата на балистичкиот удар резултирајќи во постигнување на повисоки балистички вредности. Не е познато која од овие особини е доминантна, дали јакоста или модулот, но во секој случај најдобро е кога истовремено влакната би имале и висока јакост и висок модул.

11. Од аспект на балистичката апликација најголем недостаток на HPPE влакната е нивната скромна термичка отпорност односно драстичното губење на јакост на повишена температура, како и ниската температура на топење на влакната (134°C) што доведува до делимично, а над точката на топење, и до целосно губење на балистичката отпорност. Главна предност на овие влакна е нивната мала маса (0.97 g/cm^3) што води кон високи специфични механички особини и одлична балистичка отпорност.

Главна предност на арамидните влакна е во нивната одлична термичка стабилност и одличната ударна и балистичка отпорност. Недостаток им е непостојаноста спрема UV светлината и апсорпцијата на вода кои негативно влијаат врз балистичката јакост како и значително поголемата специфична тежина во однос на HPPE влакната.

12. Трауматолошкиот ефект кај сите испитувани композити беше помал од 44 mm како што е дефинирано во стандардот NIJ 0101.03.

12. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] R. C. Laible, "Ballistic Materials and Penetration Mechanics", Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1980
- [2] S. Deskovski, S. Angelevski, "Nadvoresna balistika", Skopje, Voena Akademija, 2000.
- [3] Brent Strong, "Polimeric Reinforcing Fibers-Kevlar, Spectra, and Others", Brigham Young University, USA, 2002, <http://www.brighamuniversity.edu/>
- [4] E. Roerdink and J. Van Dingenen, "Past and Future of High Performance Fibers", Polymer Fibers Symposium, Heerlen (NL), 2002, pp. 235-244
- [5] P. Srirao, "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites", Dual Degree First Report, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, 2002.
- [6] G. Clark, "Modelling of impact damage in composite laminates", *Composites*, Vol. 20, May 1989, pp. 209 - 214.
- [7] R. W. Mortimer et al. "Behaviour of laminated composite plates subjected to impact.", Foreign Object Impact Damage To Composites Symposium, Philadelphia, 1973, 173-177.
- [8] D. J. Duffin, "Laminated Plastics", Reinhold Publishing Corporation, New York, 1966
- [9] R. L. Woodward et al., "Resistance to Penetration and Compression of Fiber reinforced Composite Materials", *Composite Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 329-341, 1994, Elsevier Scienc Ltd.
- [10] N. Takeda et al., "Delamination - crack propagation in ballistically impacted glass/epoxy composite laminates", *Experimental Mechanics*, January 1982, pp. 19 - 25.
- [11] Harding J, Welsh LM, "A tensile testing technique for fibre reinforced composites at impact rates of strain", *Journal of Materials Science*, Vol. 18, 1983, pp. 1810 - 1826.
- [12] Gellert, E. P. Pattie, S. D. Woodward, R. L., "Energy transfer in ballistic perforation of fibre reinforced composites", *Journal of Materials Science* 33, 1998, 1845-1850
- [13] Morye, S. S. Hine, P. J. Duckett, R. A. Carr, D. J. Ward, I. M., "A comparison of the properties of hot compacted gel-spun polyethylene fibre composites with conventional gel-spun polyethylene fibre composites", *Composites: Part A* 30, 1999, 649-660
- [14] Cunniff, P. M., "An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact", *Textile Research Journal* 62, 1992, 9 495-509
- [15] Prosser, R. A., "Penetration of nylon ballistic panels by fragment-simulating projectiles Part II: Mechanism of Penetration", *Textile Research Journal* 58, 1988, 3 161-165

- [16] Cox, B.N. Sridhar, N. Davis et al., "Chain composites under ballistic impact conditions", *International Journal of Impact Engineering* 24, 2000 , 809-820
- [17] S. T. Jenq, S B. Wang and L. T. Sheu "A model for predicting the residual strength of GFRP laminates subjected to ballistic impact", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 11, 1992, pp. 1127 - 1141.
- [18] E.Wu, L. C. Chang, "Woven glass / epoxy laminates subject to projectile impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, 1995, pp. 607 -619.
- [19] E. Wu, C. Z. Tsai, Y. C. Chen, "Penetration into glass / epoxy composite laminates", *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, 1994, pp. 1783 - 1802.
- [20] B.Parga Landa, "An Analytical Model to Design Composite Material Armours", Paper presented an Int.Conf.Mech.Prop. Materials at High Rates of Strain, Oxford, 1989
- [21] R.H.Zee et al., "Ballistic Response of Polymer Composites", *Polymer Composites*, 1991, Vol.12, Vo.3, pp.196-202
- [22] D.Roylance et al., "Ballistic Impact of Textile Structures", *Textile Research Journal*, Vol 18, 1973, pp.34-41
- [23] G.Ben-Dor et al., "Some Ballistic Properties of Non-Homogenous Shields", *Composites: Part A* 30 (1999) 733-736
- [24] C.E.Morrison, W.H.Bowyer, "Factors Affecting the Ballistic Impact Resistance of Kevlar Laminates", Proceedings of the 2nd Symposium of Composite Materials, Paris, 1996, pp.233-245
- [25] W.J.Taylor Jr, J.R.Vinson, "Modeling Ballistic Impact into Flexible Materials", *AIAA Journal*, Vol.28, No.12, 1990, pp.2098-2103
- [26] J.H.Grimberg et al., "Dyneema Non-Wovens and Fabrics in Ballistic Protection", II-nd Int.Ballistic Conference – Moscow, 26-28 June, 1996
- [27] Howard L.Thomas, "Multicomponent Structures for Ballistic Protection", Auburn University, Textile Engineering, <http://www.auburnuniversity.edu>
- [28] J.de Haan and T.Peijis, "Mechanical Properties of Flexible Knitted Composites", *Advanced Composite Letters*, Vol.5, No.1, 1996
- [29] P.M. Cuniff, "A Semiempirical Model for the Ballistic Impact Performance of Textile-Based Personnel Armor", *Textile Research Journal*, 1996, pp.45-59
- [30] L.H.Miner, F.J.Penzoza, "Cutting and Machining of Kevlar Aramid and its Composites", The 21st National Symposium and Exhibition of the SAMPE, Los Angeles, 1976
- [31] R.Kirchbaum, "High strength/high modulus polyethylene fibers", 25 Internationale Chemifasertagung, Dornbirn (Austria), 1986, pp.229-235

[32] Rene Pinzelli, "Kevlar Aramid Fibre in Hybrid Composites", SAMPE Conference, Bordeaux, 17-20 October, 1983

[33] "Phenol Harze Spezifikation", Plasta Erkner-Kunstharz- und Preßmassefabrik GmbH, Berlin, 1992

[34] D.Dimeski, D.Spaseska, B.Samakoski, V.Srebrenkoska, "Polietilenski filc i tkaenina za balisti~ka zastita" Kniga na trudovi od 16 Kongres na hemi~arite i tehnolozite na Makedonija, Skopje, Okt. (1999) 147-150

[35] "Specification 514 Dyneema Fabric", Product Data Sheet, DSM HighPerformance Fibers bv, ref.031 fab 514, 09.06.1995

[36] "Dyneema UD-SB31", Product Data Sheet, DSM High Performance Fibersbv, ref.PDS B03,28.11.2000

[37] D.Dimeski, "Komparativne Balisticke karakteristike kompozitnog materijalana bazi polietilenskih i aramidnih ojacavajucih vlakana", XXI Simpozijum oeksplozivnim materijama, Tara (SRJ), 2001, pp.353-358

[38] "Bakelite Kunststoffe - Phenol Harze", Bakelite Gesellschaft mbh, Lethmate(Deutschalnd), 1995

[39] N.Sharma et al., "Modelling an Experimental Investigation of the Ballisticbehaviour of an Ultra High Molecular Weight Polyethylene(UHMWPE)/Thermoplastic Rubber Matrix Composite", British CrownCopyright 1998/ Ministry of Defence Pap915.pdf

[40] R.F.Kinney, "Advanced Soldier Ballistic Protection", 2002 InternationalInfantry Conference, Natic (USA), 15 May 2002

[41] S.Ramakrishna et al., "Development of a Flexible Composite Material", *Advanced Composites Letters*, Vol.6, No.1, 1997

[42] J.van Hoof et al., "Effect of Post-Failure Modelling on the Response ofBallistically Impacted Composites", International Conference on CompositeMaterials-XII Paris July1999,Pap665.pdf,

[43] A.E.Bogdanovich, C.M.Pastore, "Mechanics of Textile and LaminatedComposites", Chapman & Hall, London, 1996

[44] N.J.Bowman, J.P.Thomas, "Ballistic Impact Behaviour of SiC FiberReinforced Titanium MMCs", International Conference on CompositeMaterials-XII Paris July1999,Pap174.pdf, 1998,

[45] A. Haque et al., "Ballistic Performance of Monolithic Ceramic Backed by S2-Glass/Vinyl Ester Composites", International Conference on CompositeMaterials-XII ParisJuly1999,Pap481.pdf, 1998, Paris Conference onComposite Materials

[46] M.Stevanovic, "Vlaknima Ojacani Polimerni Kompoziti", Partenon, Beograd,2002

- [47] Martin Gerlitz & Ernst Supper, "New Waterborne Polyvinyl Butyral Dispersion", European Coatings Show Nürnberg Germany on April 2-5, 2001, 325-334
- [48] A.Knop, W.Scheib, "Chemistry and Application of Phenolic Resins", Springer-Verlag, Berlin, 1979
- [49] Robert Martin, "The Chemistry of Phenolic Resins", Chapman & Hall Limited, New York, 1986
- [50] Philip Mason, Joseph Manning, "The Technology of Plastics and Resins", Van Nostrand Company, New York, 1978
- [51] "Analysis of phenolic resins" technical documentation", TP 2556, Bakelite AG, 1986
- [52] J.C.Seferis, L.Nicolais, "The Role of the Polymeric Matrix in the Processing and Structural Properties of Composite Materials", Plenum Press, New York, 1983
- [53] "Properties - Technical Yarns", Technical Documentation, Enka AG, 1993
- [54] E.Shand, "Glass Engineering Handbook", McGraw Hill Book Company, New York, 1973
- [55] J.Gilbert, W.Mohr, "Fiber Glass", Van Nostrand Reinhold Company New York, 1978
- [56] "Clark Schwebel International - Glass Fibers", Technical Bulletin, Pub.No1003/E, 1976
- [57] Jean Beugles, "Lightweight highperformance Dyneema spall-liners in armoured military vehicles", Lightweight Armou System Symposium 2001, 3-5 October 2001, Amsterdam
- [58] D.Dimeski i dr., "Termoreaktivni smolni Sistemi za Kompozite Ojacane Vlakanima Izbor i Osobine", *Savremeni Materijali*, Vol.15, No.1, Beograd, 1987
- [59] E.Roerdink and J.van Dingenen, "Past and Future of High Performance Fibers", Polymer Fibers 2002, Heerlen (NL), 10-12 July 2002
- [60] "Carbon, Aramid, Dyneema, Glass Fabrics & Tapes-Prepreg Resin Systems", Product Information, Ten Cate Advanced Composites BV
- [61] S.R.Allen, E.J.Roche, "Deformation behaviour of Kevlar aramid fibers", *Polymer*, Vol.30, June (1989) pp.236-244
- [62] Aramid Fibers "Twaron in Soft Body Armour", Technical Literature, Edition 1994/1, Akzo Faser AG
- [63] Aramid Fibers "The Twaron Helmet Story", Technical Literature, Edition 1994/1, Akzo Faser AG
- [64] "Twaron in Ballistic Protection-Twaron Helmets", Technical Literature Edition 1995/1, Akzo Nobel

[65] "Dyneema-Properties & Applications", Technical Literature, Edition 03/93, DSM High Performance Fibers BV

[66] H.Harel, G.Marom, "Interfacial Bonding Effects on Ballistic Performance of Single-Polymer and Hybrid PE Composites", Casali Institute of Applied Chemistry, The Hebrew University of Jerusalem, www.casali.edu

[67] B.L.Lee, "Failure of Spectra Polyethylene Fiber-Reinforced Composites under Ballistic Impact Loading", *Journal of Composite Materials*, Vol.28, No.13/1994, pp.1202-1227

[68] D.C. Prevorsek et al., "Strain rate effects in ultrastrong polyethylene fibers and composites", *Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium* 47, 45-66(1991), John Wiley & Sons, Inc

[69] "Ballistic Tests of Used Soft Body Armor - NBSIR 86-3444", US Department of Justice, National Institute of Justice, August 1986

[70] "Mowital B Polyvinylbutyral-Eigenschaften-Verarbeitungshinweise-Einsatzgebiete", Technical Documentation, Farbwerke Hoechst AG, G 1030

[71] "Butvar Polyvinylbutyral resin - properties and uses", Pub.No .2008484 D, Solutia, 2002

[72] P.R.Sundararajan, "Poly(vinyl butyral)", *Polymer Data Handbook*. Copyright 1999 by Oxford University Press, Inc. 910-924

[73] "Polyvinyl Butyral (PVB) Resin", <http://www.china-pva.com/>

[74] Shen, H. and Nutt, S.R., "Polyvinyl butyral toughened phenolic foam", under preparation,
http://www.usc.edu/dept/materials_science/ccr/researchprojects/poster01.htm#1

[75] "Dyneema-lightweight and personal armour", Technical Literature, Edition 11/93, DSM High Performance Fibers BV

[76] "Impact and Ballistics of Composite Structures", 2002, html document, <http://www.composites.ubc.ca/>

[77] "Impact Properties of Composites", Chapter 17.pdf, 2002, pdf document, www.isc.com.tw

[78] H.Mahfuz et al., "Response of Integral Armor Under High Velocity Impact: An Experimental and Finite Element Study", International Conference on Composite Materials-XII Paris July 1999, Pap447.pdf, 1998, Paris Conference on Composite Materials

[79] F.Horst, "Aramidfaserverstärkte Laminate als Material zum Ballistischen Schutzaufbau Prüfung-Anwendung", Vortrag an der Bundesakademie für Wehrverwaltung und Wehrtechnik, Enka AG, 1985

- [80] Engineering with Fibers "Twaron – The Aramid Fibre for Ballistic Fabrics", Technical Literature, Enka 6/85, 1985, Enka AG
- [81] "Product Listing for Ballistic & Protection Products", Hexcel Corporation, 2001, <http://www.hexcelfabrics.com/products/productlist.php3?application=A6>
- [82] D. Dimeski, "Personalna balistička zaštita", (interna skripta od "11 Oktomvri-Eurokompozit") Prilep, 2002
- [83] "Kevlar Composites", Papers from the Kevlar symposium, El Segundo, USA, 1980, T/C Publications
- [84] "High Modulus KEVLAR 'Hm'", Preliminary Data Sheet, Du Pont Engineering Fibre Products, E-96034, 1996
- [85] U.S. Department of Justice, "Selection and Application Guide to Police Body Armor" National Institute of Justice Guide 100-98, October 1988, www.nij.gov
- [86] "Stanag 2920 – Ballistic Test Method For Personal Armours", NATO, Military Agency For Standardization, 1996
- [87] "Body Armor Information-Summary of Technical Aspects", <http://www.fys.ruu.nl/~krijger/ME/armor.txt/>
- [88] S.J. Bourne et al, "Application of Air-Scan Technology to Ballistic Impact Protective Systems", Sonatest Plc, UK . DCTA, R&TG, UK, Sonatest-PASS2000.pdf
- [89] "Military Standard MIL-STD-662B-Ballistic Acceptance Test Method for Personal Armor Material", Department of Defence, USA
- [90] "Novi slem za oruzane snage SFRJ-Program Realizacije", Vojnotehnicki Institut, Beograd, 1986
- [91] "Kevlar for Outstanding Fragmentation and Bulet Protection in Helmets", Technical Documentation , Du Pont Fibre Products Division, E-81161
- [92] "Body Armor For Twenty-First Century And Beyond", Technical Documentation, Progressive Technologies, 1999
- [93] P.D. Zavattieri et al., "Energy Dissipation in Ballistic Penetration of Fiber Composite", December 2002, http://clifton.mech.nwu.edu/~espinosa/GRP_Penetration.html
- [94] H. Wendlant, "Manual for Dyneema Ballistic Panels", Technical Manual, DSM High Performance Fibers BV, 1999
- [95] Frank K. Ko and Jun Chang, "Optimization of the Performance of Gradient Composite Armor", International Conference on Composite Materials-XII Paris July 1999, Pap1358.pdf, 1998, Paris Conference on Composite Materials
- [96] P.J. Patel et al., "Transparent Armor", The AMPTIAC Newsletter, Volume 4, Number 3, 2002, <http://www.amptiac.org/>

- [97] "Kevlar H-Shell: A New Offer for light weight ballistic helmets", Data Sheet, H-51352, August 1993
- [98] H.D. Espinosa, H-C. Lu and Y. Xu, "A novel technique for penetrator velocity measurement and damage identification in ballistic penetration experiments" *Journal of Composite Materials*, 32, pp. 722-743, 1996.
- [99] Wang, B. and Chou, S.M, " The behaviour of laminated composite plates as armour", *Journal of Materials Processing Technology* 68, 1997 , 279-287
- [100] Gellert, E.P. Cimpoeru, S.J. Woodward, R.L," A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites", 2000 *International Journal of Impact Engineering* 24, 445-456
- [101] J.A.Saurez, J.B.Whiteside, "Comparison of residual strength of composite and metal structures after ballistic damage", Foreign Object Impact Damage To Composites Symposium, Philadelphia, 1973, 72-91.
- [102] Iremonger, M.J. and Went, A.C, "Ballistic impact of fibre composite armours by fragment-simulating projectiles' 1996 *Composites: Part A* 27A571-581
- [103] Song, J.W. "Thermoplastic composites for ballistic application" 1994 26th International SAMPE Technical Conference
- [104] "Kevlar: Protection You Can Wear", Product Sheet, Du Pont de Nemours Engineering Fibre Systems, H-34554
- [105] A.S.Verlind, J.L.J. van Dingen, "Dyneema Inserts: Personal Armour Against Rifle Bullets", PASS96, Colchester UK –September 1996
- [106] "Tenax and Twaron Man-Made Fibers for High-Performance Composites", Technical Data Sheets, Enka 4/87, Enka AG

Листа на табели

Табела 1. Дистрибуција на фрагменти од експлодирани артилериски гранати

Табела 2. Карактеристики на балистички влакна

Табела 3. Основни карактеристики на некои технички влакна

Табела 4. Карактеристики на користените ткаенини

Табела 5. Карактеристики на еднонасочните препрези

Табела 6. Влијание на составот на смолниот систем врз механичките особини на композитите врз база на арамидна ткаенина и 20% фенол-формалдехидна матрица

Табела 7. Влијание на составот на смолниот систем врз механичките особини на композитите врз база на НРРЕ ткаенина и 20% фенол-формалдехидна матрица

Табела 8. V50 во зависност од содржината на модификаторот во матрицата кај композити од арамидна ткаенина/фенол - формалдехидна смола со површинска маса од 6 kg/m² и содржина на матрица од 20%

Табела 9. V50 во зависност од содржината на модификаторот во матрицата кај композити од НРРЕ ткаенина/фенол-формалдехидна смола со површинска маса од 6 kg/m² и содржина на матрица од 20%

Табела 10. V50 кај композити арамидна ткаенина/модифицирана фенол-формалдехидна смола со различна површинска маса и 20% содржина на смола

Табела 11. V50 кај композити НРРЕ ткаенина/модифицирана фенол-формалдехидна смола со различна површинска маса и 20% содржина на смола

Табела 12. V50 кај композити арамидна ткаенина/модифицирана фенол-формалдехидна смола со различна површинска маса и 50% содржина на смола

Табела 13. V50 кај композити НРРЕ ткаенина/модифицирана фенол-формалдехидна смола со различна површинска маса и 50% содржина на смола

Табела 14. Основните физички карактеристики на употребените влакна

Табела 15. Сонична брзина на зајакнувачките влакна

Табела 16. Кинетичката енергија на проектилот и енергијата на апсорпција на композитите во зависност од површинската маса кај композитите со однос арамид/смола 80/20

Табела 17. Кинетичката енергија на проектилот и енергијата на апсорпција на композитите во зависност од површинската маса кај композитите со однос НРРЕ/смола 80/20

Табела 18. Кинетичката енергија на проектилот и енергијата на апсорпција на композитите во зависност од површинската маса кај композитите со однос арамид/смола 50/50

Табела 19. Кинетичката енергија на проектилот и енергијата на апсорпција на композитите во зависност од површинската маса кај композитите со однос HPPE/смола 50/50

Табела 20. Кодирање на променливите

Табела 21. План матрица на експериментот

Листа на слики

Слика 1. Генерална поделба на балистиката

Слика. 2. Поделба на балистичката заштита

Слика. 3. Споредба на балистичките материјали за шлем

Слика 4. Ориентираност на макромолекулите кај полиетиленот

Слика 5. Структурна формула на HPPE

Слика 6. Механизам на пенетрација на проектилот во HPPE плоча

Слика 7. Шема за добивање фенол-формалдехидни смоли

Слика 8. Формула на типична резолна смола

Слика 9. Структурна формула на поливинилбутирал

Слика 10. Реакција на добивање на полиетилен

Слика 11. Веројатност на продор во однос на ударна брзина

Слика 12. Трауматолошка површина и длабина

Слика 13. Реакција на PVB со фенолна смола

Слика 14. Димензии на епруветите за испитување на смолкнување

Слика 15. Изглед на залепената епрувета

Слика 16. Конструкција на еднонасочните препрези

Слика 17. Шема на машината за импрегнирање

Слика18. Пресување па балистички ламинати

Слика 19. Универзална сталажа за испалување

Слика 20. Балистичка испитна композитна плоча

Слика 21. Трауматолошки ефект врз арамиден панел (а) и негово мерење(б)

Слика 22. Шема на опремата за испитување со куршуми

Слика 23. Балистички шлем со термопластична матрица тестиран во реални услови

Слика 24. Балистичката отпорност во зависност на содржината на конституентите кај композитите

Слика 25. Број на слоеви на ткаенина кај композитите

Слика 26. V50 во зависност од површинската маса кај композитите со однос на конституентите матрица/влака 20/80 и 50/50

Слика 27. Пресек на композитот на местото на пенетрацијата на проектилот

Слика 28. Пропагирање на ударниот бран