

ПРОЦЕНА БАЛИСТИЧКЕ ЗАШТИТЕ ВИШЕСЛОЈНОГ КОМПОЗИТНОГ ПАНЕЛА

Селена Срећковић
Департман форензичког
инжењерства
Криминалистичко-полицијски
универзитет
Београд/Србија
selaaaaareckovic15@gmail.com

Радован В. Радовановић
Департман форензичког
инжењерства
Криминалистичко-полицијски
универзитет
Београд / Србија

Невена Пуач
Институт за физику
Београд / Србија

Abstract— Испитане су балистичке перформансе композитних материјала кроз две студије случаја у циљу избора материјала у погледу балистичке заштите. У првој, процењене су балистичке перформансе вишеслојног композитног панела (МАС) са предњом керамичком плочицом, праћеном ламинатом који садржи 50 % епоксидне матрице ојачане тканином и легуром алуминијума. Резултати указују на то да је композитни панел који садржи 40 % епоксидне матрице ојачане тканином и легуром алуминијума, боља алтернатива у односу на кевлар. У другој, испитана је балистичка ефикасност ламинарног композита, сендвич форме два панела композитног материјала и међуслој арамидне тканине. Резултати су показали да произведени панцир спречава продор пројектила калибра 9 mm и омогућава његову потенцијалну употребу, а након испитивања оружјем дуге цеви долази до трајног деформисања панела (оружје 5,56 mm и зрно 7,62 mm), због чега се примена истог у војним операцијама не препоручује.

Кључне речи: балистичке перформансе, дубина пенетрације, композитни материјали.

I. УВОД

Балистика је наука која се бави кретањем и дејством различитих пројектила на различите објекте. Стога се заштита од било ког пројектила може назвати балистичком заштитом [2].

Балистичка заштита како у војној индустрији, тако и у индустрији цивилне заштите, је један од кључних параметара и у последњих неколико година је у све већој потражњи, како би се добили материјали са што бољим балистичким перформансама у циљу заштите од удара и пенетрације [1].

Спровођење војних операција применом ратне технике засноване на технологији, оружја, муниције захтева развој напредних система балистичке заштите, чије понашање зависи од способности материјала да апсорбује и распе кинетичку енергију пројектила, при чему се мали део ње преноси на тело [1].

Безбедносна опрема коју користе војна лица као и цивилна, треба да испуни одређене захтеве у погледу флексибилности, у циљу заштите од опасности без ограничења покрета човека [1].

Тренутно се користе различите врсте цивилне и војне заштите. Композитни материјали се користе још од давнина, састоје се од матрице односно базе и секундарне фазе [1].

Матрица је најчешће сачињена од керамике, метала или полимера, док ојачивач представља дисконтинуалну фазу попут

честица и влакна. Улога ојачивача јесте да побољша својства материјала у смислу механичких, електричних, топлотних и других својства [3].

Услед сталног развоја и усавршавања ватреног оружја, захтева се побољшање балистичке заштите уређаја. У пракси се прибегава возилима и оклопу који је лакши и отпорнији на пројектиле и друге утицаје. У том смислу да би се горе наведено омогућило, керамика је једна од најважнијих компоненти оклопа која се користи за заштиту од муниције велике снаге. Керамички композити се све више користе у системима заштите због својих изузетних механичких својства, као што је висока тврдоћа, мала густина, отпорност на корозију и абразију [5].

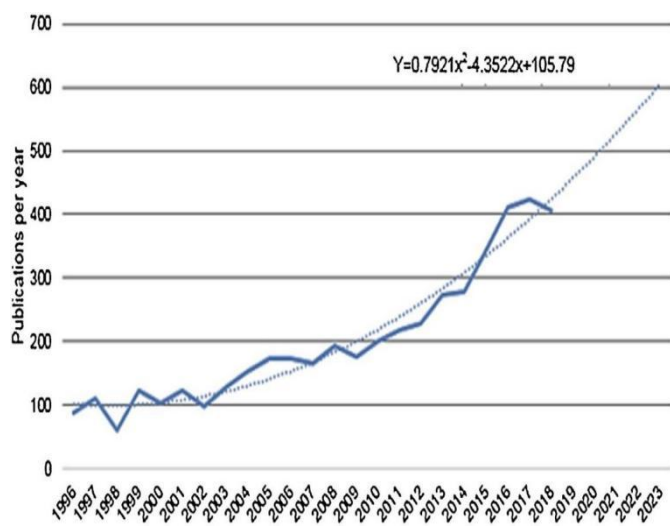
Такође, употреба керамичких матричних композита ојачаних стакленим влакнима је повећана у аеронаутици и аутомобилској индустрији. Њихова мала густина, висок однос чврстоће и тежине, механичка отпорност, већа специфична чврстоћа, побољшана отпорност на корозију, побољшана толеранција оштећења, механичко понашање, супериорна отпорност на замор у поређењу са традиционалним металним легурама као што су алуминијум и челик, привлачни су за многе индустријске примене, а самим тим резултирају смањењем масе авиона и аутомобила, смање потрошње горива и доприносе смањењу загађења ваздуха [4].

Композити поседују зоне са различитим оријентацијама влакана. Примећено је да како се оријентација угла влакана мења од 0 до 90, затезна чврстоћа се мења са 89,5 МПа на 53,2 МПа, а Јангов модул се мења са 4,607 МПа на 2,352 МПа, респективно. На балистичке перформансе композитних плоча са полимерном матрицом за личну заштиту утичу типови полимера и арматуре, дужина, пречник, количина и оријентација арматурних влакана, дебљина плоче и конфигурација панела. Композити полимерне матрице су предложени као добра алтернатива за примену оклопних материјала. Међутим, висока цена полимера представљала је рестриктивно размишљање о њиховој употреби у комерцијалне сврхе. Због тога је употреба пунила побољшала атрибуте композита и на крају смањила вредност уземљења и робе [6].

Полимерни композити ојачани полиетиленом ултра-високе молекуларне тежине (UHMVPE) и арамидним (Кевлар) влакнима који се користе за израду композита за личне оклопе производе се помоћу вакуумског пресовања смоле, вакуумом потпомогнутог инфузијом смоле или компресијом. Међутим, ови процеси су скупе алтернативе. Примена полиамида у области структурних компоненти добијених процесима топлења је обимна, али је процес производње композита компликован. Штавише, употреба ових композита је минимална због количине

арматуре која је потребна за постизање атрактивних својстава. Процеси топљења за израду композитног материјала ојачаног стакленим влакнима од 30 теж. троше три пута већу енергију која је потребна за обраду полимера. Тешко је одредити температуру обраде композита ојачаних влакнима који садрже значајну количину арматуре. Међутим, индустријска производња лаких материјала за личне оклопе високих перформанси захтева континуиране и економски исплативе процесе. Добро успостављена индустријска производња полимера као што је екструзија и бризгање испуњава ове захтеве [7].

Многи научници су публиковали су знатан број истраживачких радова о балистичкој заштити. Фокус већине радова био је отпорност композитних материјала на дејство пројектила. Недавно су, спроведена истраживања на природним влакнима која ојачавају полимерне композите у циљу замене за синтетичка влакана. Истраживања су спроведена у погледу механизми дисипације енергије. Анализом истих утврђено је да главни механизми дисипације енергије другог слоја од стране вишеслојног композитног панела не зависи од чврстоће влакана, било арамидних (Кевлар) или природних влакана у полимерним композитима. Захватање фрагмената из разбијене предње керамике, након балистичког удара, кроз механичку инкрустацију, Ван дер Валсове површинске силе и статичка електрична наелектрисања влакнима у другом слоју су најважнији механизми дисипације енергије, што се може видети на Сlici 1 [8].

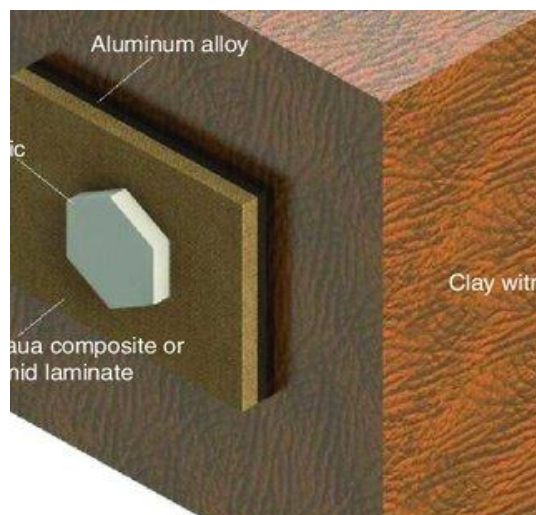


Сл1. Графички приказ објављених радова са освртом на балистичку заштиту

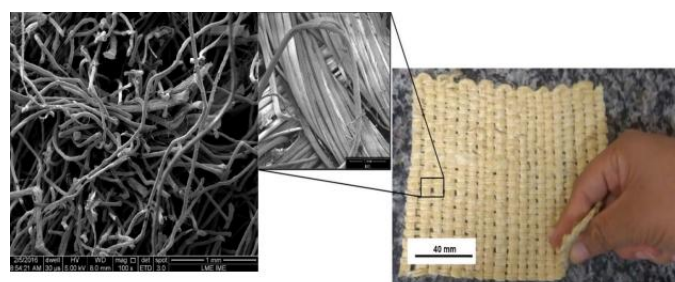
II. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

Ради анализе балистичких перформанси, у овом раду ће бити приказане две студије случаја.

У првој студији случаја коришћен је вишеслојни композитни панел који се састоји се од хексагоналне плочице дебљине 10 mm са предњом керамиком бочних димензија 31 mm. Исти чини први слој композитног панела. Други слоја композита чини епоксидна тканина и легуре алуминијума уграђене у задњи слој материјала [8].

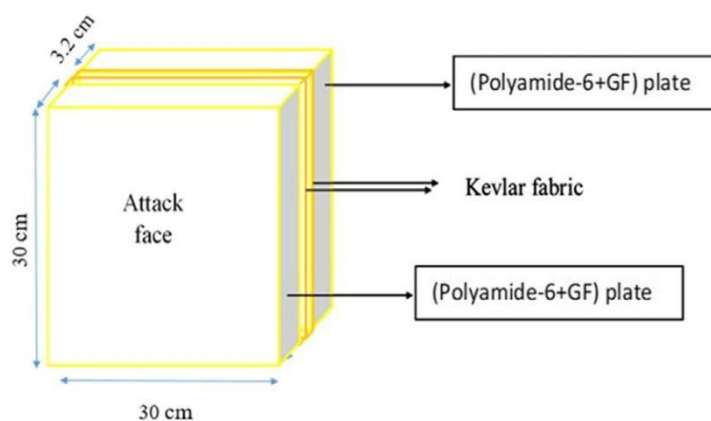


Сл.2. Шематски приказ вишеслојног композитног панела.



Сл.3. СЕМ микрографија тканине.

У другој студији случаја ради анализе балистичких перформанси коришћена је композитна оклопна плоча, позната као вишеслојни оклопни системи, на бази полиамидних-6 плоча (ПА6) ојачаних фибергласом, произведених континуираном бризгањем, у комбинацији са Кевлар тканином [10].

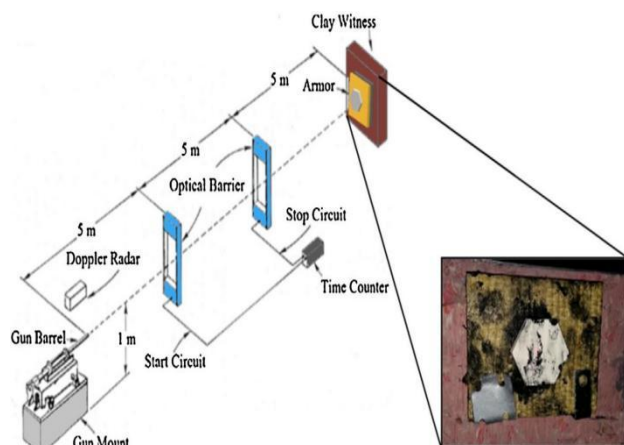


Сл.4. Шематски приказ панела.

Прва студија случаја

Композит је направљен слагањем неколико слојева тканине у челични калуп, интеркалацијом са течном мешавином епоксид-учвршћивача и држањем под притиском од 5 МПа током 24 часа. Керамички предњи слој је првобитно био састављен од 94,53 % глинице, 3,94%, ниобијум оксида и 1,53 % полиетилен гликола, органског везива. Исти је потом синтерован на 1400°C током 3 сата под ваздухом.

Средњи слој вишеслојног композитног панела чинио је ламинатни композит дебљине 10 mm са бочним димензијама 120 × 150 mm, док је други слој композита чинила 50% епоксидна тканина [10]. Балистички тестови су обављени у Центру за процену бразилске војске, Рио де Жанеиро, коришћењем војне муниције НАТО калибра 7,62 × 51 mm са пројектилом од 9,7 g [8]. Мета са вишеслојним композитним панелом је од уређаја за гађање била постављена на удаљености од 15 m у циљу безбедности. Уређај за гађање је био модел В290 опреме за инструментацију високог притиска (НРП), док је уређај за мерење брзине пројектила била оптичка баријера. [9]. Након балистичког удара, ласерским сензором је мерена дубина пенетрације пројектила. Урађено је осам тестова за сваки вишеслојни композитни панел, са по 10 мерења у сваком тесту [8].

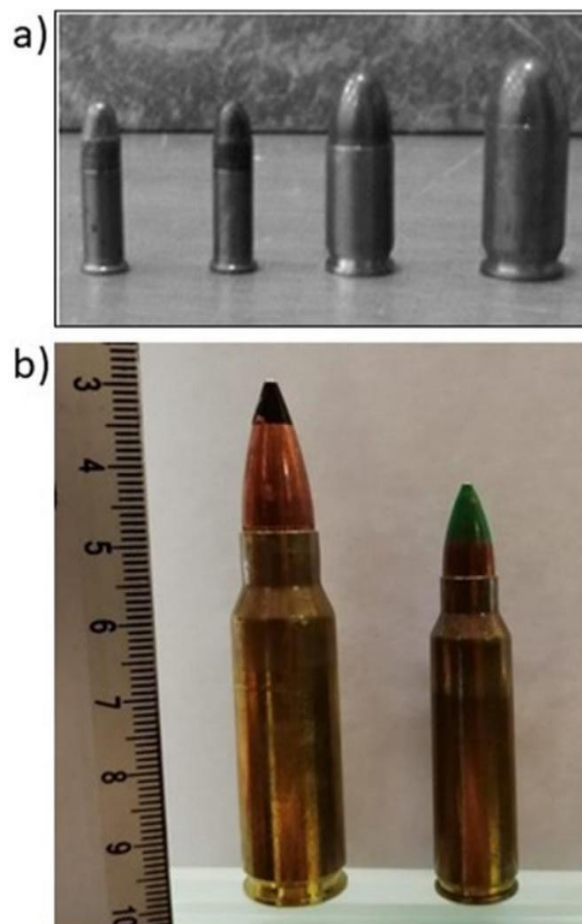


Сл. 5. Шематски приказ балистичке поставке за тестирање са метом на коју је причвршћен вишеслојни композитни панел¹.

Друга студија случаја

Полиамидна-6 плоча (ПА6), синтетизована је анионском полимеризацијом из е-капролактама користећи метални натријум као активатор на 270 °C, 2 сата у атмосфери азота. Полиамид је ојачан епоксидним стакленим влакнима. Епоксидна стаклена влакна су кратка и имају тенденцију да се насумично оријентишу током бризања, самим тим олакшавају добијање изотропног материјала. Структура произведеног панела је налик сендвичу. Средишњи део панела је изграђен од 21 слоја балистичког арамида (Кевлар) и постављен је између две полиамидне-6 плоче композита. Они су спојени механичким спајањем да би се добио завршни оклоп за тело балистичког панела [10]. Балистички тестови су спроведени у Центру за процену бразилске војске, Рио де Жанеиро, коришћењем шест различитих врста ватреног оружја. Из оружја са кратким цевима (калибар 0,2200 inch, 0,2500 inch и 0,4500 inch) и оружја са дугим цевима (калибар 9 mm, 5,56 mm и 7,62 mm) пуцано је на удаљености од 5 m, односно 15 m, са упадним углом мањим од пет степени. За мерење брзине пројектила коришћен је балистички хронограф, док су снимци снимљени помоћу камере за снимање видео записа велике брзине од 33.000 кадрава у секунди. Балистички тестови су обављени у одсуству ветра. Дубина пенетрације пројектила процењена је мерењем дубине ударне шупљине, помоћу микрометра, са тачношћу од 0,01 mm. Морфологија површине и промене у

дисперзији композитног полимера пре и после балистичког испитивања примећене су применом скенирајуће електронске микроскопије [10].

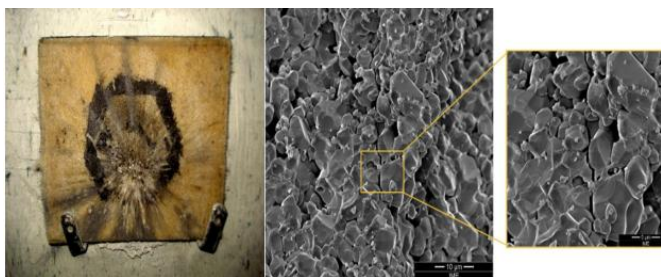


Сл.6. Карактеристике пројектила коришћених за балистичко испитивање.

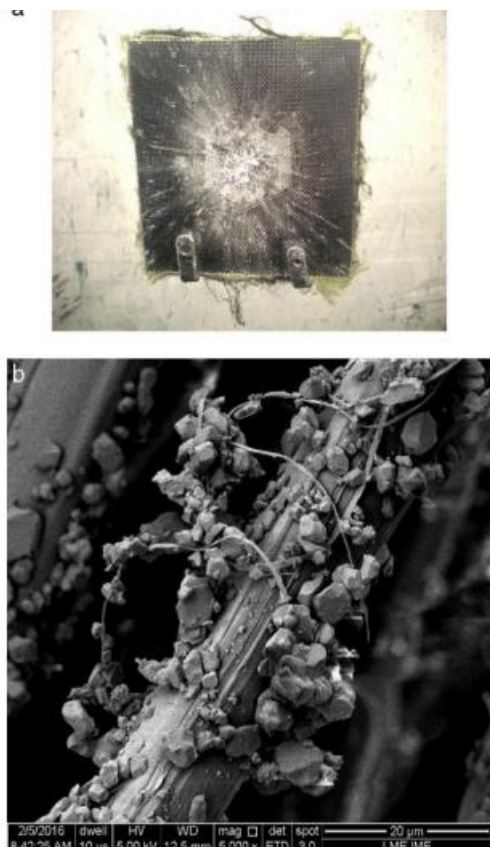
III. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У случају прве студије случаја, Слика 7 приказује општи аспект вишеслојног композитног панела након балистичких испитивања. Слика 7а приказује СЕМ микрографију тканине, односно њене микроскопске детаље. Слика 7б приказује хистограм пречника влакна. На основу анализе, може се извести закључак да је тканина састављена од насумично оријентисаних влакана, пречника који варира између 10 и 90 μm , са просечним $40 \pm 11 \mu\text{m}$. Влакна у тканини су релативно танка, у поређењу са другим природним влакнима. То представља једну од важнијих карактеристика, јер што су влакна тања, то су боља механичка својства као што су Јангов модул и чврстоћа [9]. Слика 8 представља СЕМ приказ општег аспекта вишеслојног композитног панела након балистичког испитивања. Анализом истог, након дејства пројектила, калибра 7,62 mm утврђено је да вишеслојни композитни панел није био перфориран, а тканина је задржала свој интегритет након удара, не фрагментишући се у неколико делова. Неткана тканина вишеслојног композитног панела спречила је смртоносну трауму која би настала услед дејства пројектила, те се може сматрати ефикасним против пројектила калибра 7,62 mm. [9]

¹ Преузето из: Farias-Aguilar, J. C., Ramírez-Moreno, M. J., Gonzalez-García, D. et. al., *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1606–1614. (2021).

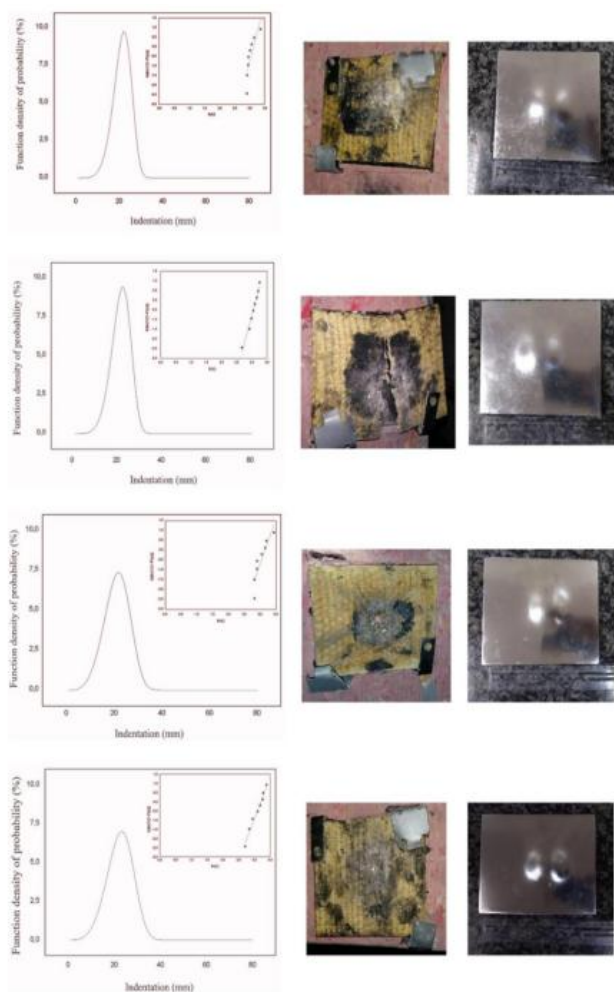


Сл.7. Слика 7. Општи аспект вишеслојног композитног панела након балистичких испитивања; 7а) СЕМ микрографија тканине, 7б) хистограм пречника влакна.

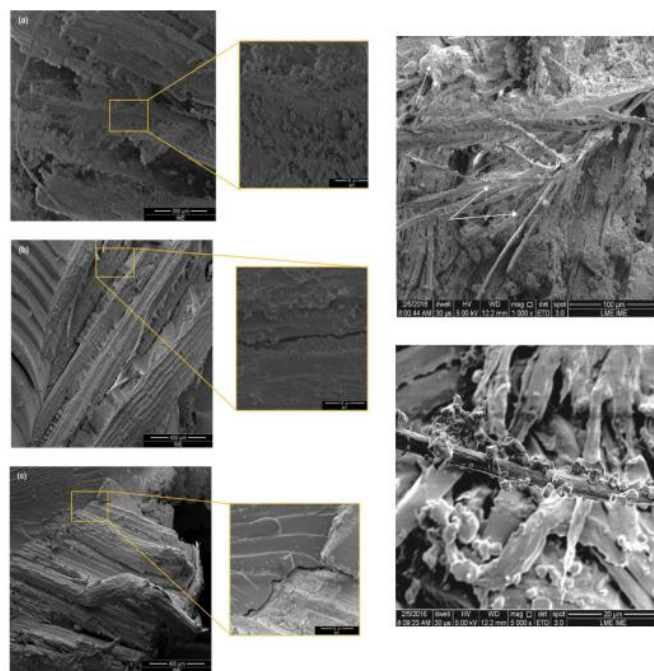


Сл.8. СЕМ приказ општег аспекта вишеслојног композитног панела након балистичког испитивања.

Слика 9 приказује СЕМ фрагментирану фрактуру предњег керамичког слоја након балистичког теста, који је открио понашање интергрануларног лома, услед додатка 4% Nb_2O_5 . Спроведена је анализа вишеструке површине зрна, где се виде пукотине које пролазе кроз границе зрна. Наведене пукотине прате дужи пут, што је повезано са већом дисипацијом енергије. Након балистичког испитивања, пројектил је, као и керамика, био потпуно фрагментован, а самим тим ниједан од испитаних вишеслојних композитних панела није био перфорисан. Већа апсорпција енергије пројектила се може очекивати када се керамика фрагментира на мање комаде. [8]



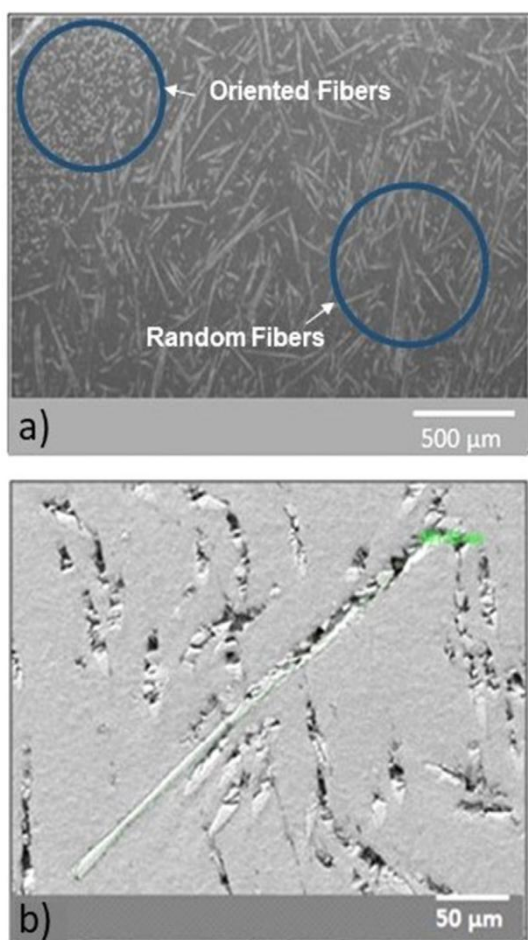
Сл. 9. Графички приказ резултата након балистичког испитивања.



Сл. 10. СЕМ приказ резултата након балистичког испитивања

На Слици 10. приказани су СЕМ микроснимци зоне удара на композиту. Керамика је потпуно фрагментирана, а њени фрагменти су депоновани преко површина влакана. Слика детаљно приказује ефикасност неткане тканине за прикупљање керамичких фрагмената. Груба честица се може такође приметити на слици. Наведена честица је идентификована као еродирани пројектил прекривен керамичким фрагментима. Идентификација пројектила потврђује да је керамика у стању да га фрагментира на веома танке честице [8].

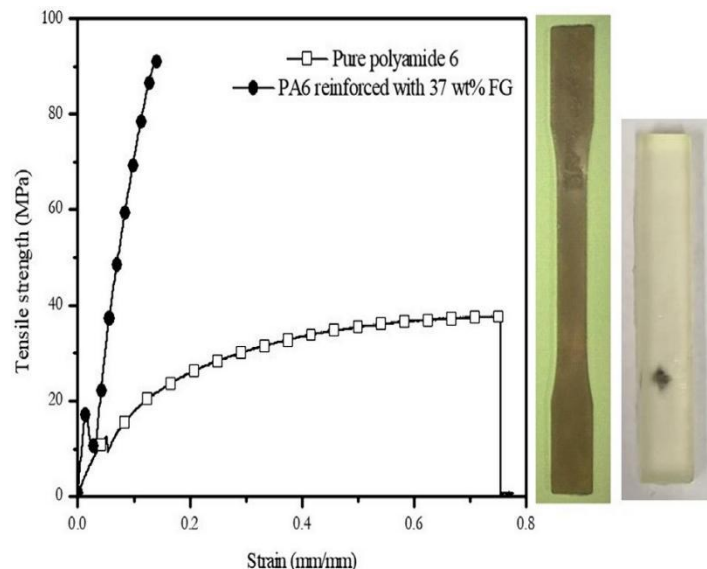
У случају друге студије случаја, Слика 11. представља СЕМ приказ микрографије вишеслојног оклопног система, на бази полиамидних-6 плоча (ПА6). Слика 11 (а) приказује попречни пресек композитне плоче. Као што се може приметити на слици стаклена влакна су насумично распоређена у композитној плочи. У горњем левом углу композитне плоче уочена је оријентација влакана на површини плоче, у правцу струјања, током обраде. Ова микроструктурна конфигурација се објашњава стањем напрезања које преовладава током убризгавања [10]. Слика 11 (б) наглашава интерфејс фиберматрице. На истој се може уочити да је интерфејс матрице стаклених влакана слаб и да су влакна током обраде пукла [10].



Сл. 11. СЕМ приказ микрографије полиамида-6 (ПА6).

Слика 12. приказује графички приказ криве напрезања полиамидних-6 влакана и вишеслојног оклопног система, на бази полиамидних-6 влакана ојачаних фибергласом и произведених у комбинацији са Кевлар тканином. Разматрањем истог долази се до закључка да се затезна чврстоћа вишеслојног композитног материјала приликом дејства пројектила повећава са 37,31 МПа, на 91,17 МПа, док се напрезање материјала до лома смањује са 0,75 mm/mm на 0,17 mm/mm. Ови резултати показују позитиван

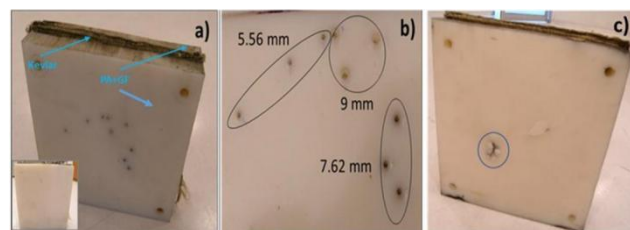
ефекат стаклених влакана на енергију лома и механичку чврстоћу вишеслојног композитног материјала на бази полиамидних-6 влакана. Као што је примећено, полиамидна влакна има нижу граничну чврстоћу од вишеслојног композитног материјала, што потврђује да влакна значајно побољшавају механичка својства [10].



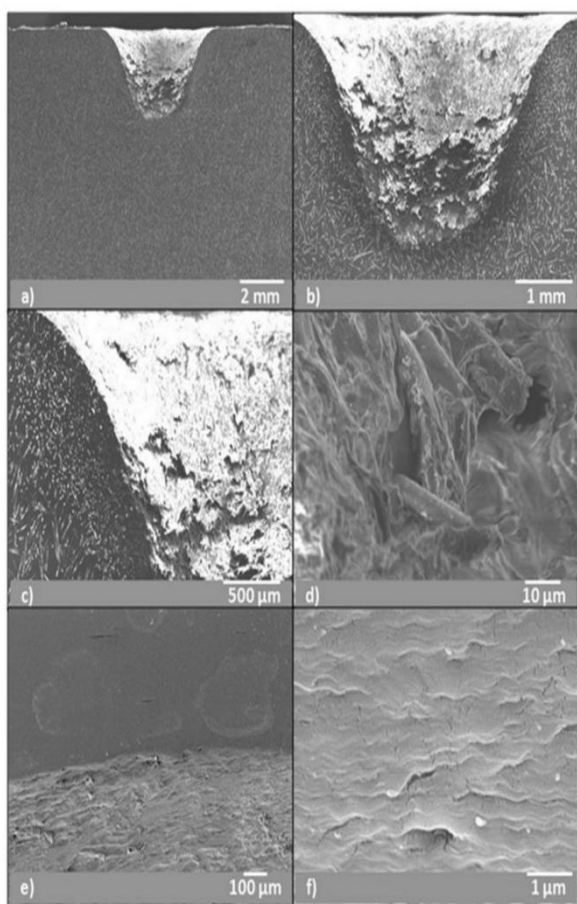
Сл. 12. Графички приказ криве напрезања полиамидних-6 влакана и вишеслојног оклопног система, на бази полиамидних-6 влакана ојачаних фибергласом и произведених у комбинацији са Кевлар тканином.

Као што је у претходном описано, током балистичког испитивања коришћено је шест типова ватреног оружја за процену нивоа заштите сендвич панела, односно вишеслојног оклопног система, на бази полиамидних-6 влакана ојачаних фибергласом и произведених у комбинацији са Кевлар тканином [10].

Слика 13 приказује трагове удара пројектила на сендвич панел, док Слика 13(а) приказује предњу страну панела. Подлога за тестирање, на којој је учвршћено оружје кратких цеви удаљена је од мете око 10 cm. Брзина метака је у неким случајевима била нешто већа од стандардне брзине. Ниједан ударац пројектила који је испален из оружја кратких цеви (калибар 0,2200, 0,2500 и 0,4500) није пробио композитну плочу, што је приказано на слици 13 (б), и није оставио трагове на панелу. С друге стране, испаливањем пројектила из ватреног оружја дугих цеви пројектил је делимично продрао у панел, било без бочног клизања (калибар 9 mm) или са траговима ломљења на задњој страни лица мете (5,56 mm и 7,62 mm). Слика 13(ц) приказује задњу страну панела. На истој се може уочити прелом услед три ударца оружја калибра 7,62 mm [10].



Сл. 13. Трагови удара пројектила на сендвич панелу.



Сл. 14. СЕМ приказ конусне шупљине настале дејством пројектила.

IV. ЗАКЉУЧАК

На основу напред приказаних студија случаја, које су са циљ имале да прикажу балистичке перформансе композитних материјала и који композитни материјали су добри у системима оклопне заштите.

У случају прве студије случаја, поређењем вишеслојног керамичког панела сачињеног од епоксидне неткане тканине и вишеслојног керамичког панела сачињеног од арамидне (Кевлар) тканине као, закључено је да епоксидни композити, који се користе као други слој вишеслојног оклопног система (МАС) са предњом керамиком и задњом страницом лима од легуре алуминијума, испуњавају међународни балистички стандард. Замена арамидне тканине, епоксидном тканином обезбеђују смањење тежине МАС-а за 6% и смањење трошкова од 70%. Такође, композит који садржи 40 % епоксидне тканине се сматра бољом алтернативом за замену Кевлар ламината као МАС другог слоја јер је у стању да задржи свој интегритет након балистичког удара.

У случају друге студије случаја, а на основу спроведене анализе, закључено је да се синтетисани композитни сендвич панел адекватно одупире продирању пројектила калибра 9 mm тако што распршује кинетичку енергију кроз преоријентацију влакана око ударне шупљине, стварањем микропукотине и трајне деформације предње стране композита. Међутим, деформација панела након балистичког испитивања је трајна. Панел има обећавајућу

примену као урбани оклоп, али балистичка заштита у војним операцијама није загарантована, јер и ако је панел отпоран на ударце калибра 5,56 mm и 7,62 mm, накнадни ударци изазивају пуцање и љуштење задње стране панела. Главни фактори који одређују продирање пројектила у панцир су брзина ударца метка, геометрија и физичка својства циљаног материјала [10].

V. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Срећковић, С., & Радовановић, Р. В. (2023). Мастер рад на тему: Испитивање савремених антибалистичких материјала методама пенетрације са посебним освртом на керамичке композитне панеле.
- [2] Радовановић, Р. В. Београд: Криминалистичко-полицијска академија (2009).
- [3] Петровић, М. М. Универзитет у Београду: Електротехнички факултет у Београду (2016).
- [4] Domun, N., Kaboglu, C., Paton, K. R., et al., Composites Part B: Engineering, volume 8, 167, 497–506. (2019).
- [5] Liu, W., Chen, Z., Cheng, X., et al. Composites Part B: Engineering, volume 84, 33–40. (2016).
- [6] Morampudi, P., Namala, K. K., Gajjala, Y. K., Barath, M., & Prudhvi, G. Materials Today: Proceedings, Volume 43, 314-319 (2021).
- [7] Shackelford, J., & Alexander, W. (2001). Material science and engineering handbook, Vol. 103, p. 850, (2001).
- [8] Oliveira, M. S., Filho, F. C. G., Pereira, A. C., et al., Journal of Materials Research and Technology, volume 9, 1734 - 1741, (2019).
- [9] Braga, F. de O., Bolzan, L. T., Luz, F. S. da, Lopes, P. H. L. M., et al., Journal of Materials Research and Technology, 6(4), 417–422. (2017).
- [10] Farias-Aguilar, J. C., Ramírez-Moreno, M. J., Gonzalez-García, D. et. al, Journal of Materials Research and Technology, 12, 1606–1614. (2021).
- [11] Figueiredo, A. B.-H. d. S., Lima Júnior, É. P., Gomes, A. V., Melo, et al. Journal of Metals Materials and Minerals 32(2):42-49, (2022).

BALLISTIC PROTECTION ASSESSMENT OF A MULTILAYER COMPOSITE PANEL SIX-LAYER COMPOSITE PANEL

Selena Srećković, Radovan V. Radovanović, Nevena Puač

Abstract: The paper examines the ballistic performance of composite materials through two case studies in order to select materials for ballistic protection. In the first case study, the ballistic performance of a multilayer composite panel (MAS) with a ceramic face plate, followed by a laminate containing 50% epoxy matrix reinforced with fabric and aluminum alloy, was evaluated. The results of the first study indicate that a composite panel containing 40% epoxy matrix reinforced with fabric and aluminum alloy is a better alternative in terms of replacement for Kevlar. Also, the price of a composite made of epoxy fabric

is lower compared to a composite made of Kevlar. The second case study examines the ballistic performance of a polymer-based composite panel with a laminar configuration. The composite laminar configuration, like a 30 cm sandwich, consists of two panels of composite material and an aramid fabric interlayer. The composite material consists of a synthesized polyamide 6, reinforced with fiberglass (GF) and aramid fabric. It was tested in ballistic environments with available firearms. The results of another study showed that the produced armor prevents the penetration of a 9 mm caliber projectile and allows its potential use. However, after testing with long-barreled weapons, permanent deformation of the composite panel occurred (5.56 mm and 7.62 mm weapons), which is why its use in military operations is not recommended.

Keywords: ballistic efficiency, penetration depth, composite materials, ceramic tile, epoxy fabric, polymers of laminar configuration.