

Експериментални приказ дубине пенетрације пројектила у композитним панелима који садрже алуминијум триоксид у циљу анализе балистичких перформанси

Селена Срећковић
Департамент Форензичко
инжењерство
Криминалистичко - полицијски
Универзитет
Београд/Србија
selaaaasreckovic15@gmail.com

Радован В. Радовановић
Департамент Форензичко
инжењерство
Криминалистичко - полицијски
Универзитет
Београд / Србија

Abstract— Дубина пенетрације је једна од најчешће испитиваних карактеристика материјала када је реч о материјалима који се примењују у сврху балистичке заштите како панцира, тако и оклопних возила. Овај тип експеримента омогућава процену способности композитних панела да зауставе или смање продор пројектила, што је од великог значаја када је у питању балистичка заштита за војнике, као и цивилна заштита. Алуминијум - триоксид (Al_2O_3) је чест додатак композитних материјала због својих механичких својства, укључујући високу тврдоћу, отпорност на абразију и термичку стабилност. У комбинацији са другим материјалима као што су полимери, добијамо композитне панеле који имају потенцијал да пруже балистичку заштиту. Да би се одредила дубина пенетрације обично се примењује експериментални метод који подразумева пуцање из ватреног оружја различитих калибра на панеле, где се након тога мери дубина пенетрације тј. продор пројектила. Поред тога што се узима у обзир дубина пенетрације, у обзир се узимају и други фактори, каква је врста подлоге у питању, од које врсте материјала су сачињени панели, расподела енергије при удару и др. На основу резултата инжењери могу оптимизовати састав композитних панела како би постигле жељене балистичке перформансе. Овакви експерименти су од великог значаја у војној индустрији за развој балистичке заштите за војна возила, опрему и личну заштиту. Поред војне индустрије све је већа употреба и у цивилној заштити аутомобилске индустрије и грађевинарства.

Кључне речи - дубина пенетрације, панели, композитни материјали, алуминијум - триоксид, војна индустрија.

I. УВОД

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]. Балистика је наука која се бави кретањем и дејством пројектила на различите објекте [2]. Стога се

заштита од било ког пројектила може изазвати балистичком заштитом. 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].

Композитни материјали јесу материјали који се састоје од два или више међусобно повезаних материјала, који пружају различита физичко - механичка својства [3]. Керамички оклопни системи се најчешће састоје од керамичког или керамичког металног тела, који је прекривен балистичким најлоном и спојени са полиетиленом као нпр. Kevlar, Tvaron, Spectra, Dineema, који су постављени на полеђини керамичког или керамичко - металног композита [4]. Композитни материјали се користе још одавнина, 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 [5].

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 [6]. Међутим мана оваквих материјала јесте њихово механичко својство кртости, која може да се побољша коришћењем графена, који ће у проценту од 0,8% да повећа отпорност крхког пуцања Al_2O_3 за око 40% у поређењу са керамиком без присутног графена. Al_2O_3 је керамички материјал који се најчешће користи у заштитним системима балистичких апликација [7]. За разлику од традиционалне балистичке заштите керамике има знатно ниже перформансе. Управо из тог разлога су овакви материјали подвргнути експерименталном истраживању дубине пенетрације ради анализе балистичких перформанси [1].

II. ПРИМЕНА КЕРАМИЧКИХ МАТЕРИЈАЛА И УТИЦАЈ ПРОЈЕКТИЛА НА ЊИХ

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 најважнији компоненти оклопа која се користи за заштиту од муниције велике снаге. Рецимо данас се у прозводњи оклопних возила користе неколико керамичких материјала као што је керамика од алуминијума са различитим количинама алуминијум - триоксида [8]. Поред Al_2O_3 користе се и карбиди, нитриди, бориди и њихове комбинације. Поред наведених материјала, глина је најчешће коришћен материјал због ниске цене и може се прозводити у више различитих процеса [4]. Приликом удара пројектила о панел од керамичких материјала дешава се то да у почетку врх пројектила бива уништен од стране панела у који је ударио. Након тога се у кремичкој плочици стварају ударни таласи напона притиска и смицања, који се шире дуж правца дебљине, док се таласи затезног и напона смицања шире ортогонално у правцу дебљине. Након тога се таласи рефлектују у оба смера када стигну до ивице плочица. Ови таласи повећавају укупан напон који ће деловати на материјал, где се као последица тога јавља лом материјала (приказано на Сл.бр.1) [8].



Сл.1. Лом керамичког материјала након излагања балистичком удару [8].

Што је плочица тања, потребан је већи број слојева арамидне тканине или других материјала за подлогу. Истраживања кроз праксу показују да системи који су засновани на керамичким плочама чија се дебљина креће у распону од 0.5-1 mm, захтевају арамидну подлогу [4]. На производњу керамичких оклопних система утичу одређени захтеви у погледу тежине, примене и производње. Најчешће се у циљу побољшања перформанси користи слој фибергласа, јер омогућује да приликом удара пројектила се уситњавање керамичких плочица одвија знатно мање, а ерозија пројектила је знатно већа. Поред фибергласа ради побољшања балистичких перформанси могу се користити и керамичке плоче са танким полиетиленским или полиуретанским слојем [8].

Поред алуминијум - триоксида који се користи код композитних материјала, о коме ће највише бити речи у раду, потребно је напоменути и друге као што је бор - карбид (B_4C) који представља напредни керамички материјал широког домена, захваљујући високој тачки топлетења и термичкој стабилности. Поред тога поседује малу густину и високу тврдоћу, што га чини веома погодним у балистичким оклопима [8]. Неоксидна керамика, чија је примена у великој мери заступљена у индустријске сврхе, јесте силицијум - карбид. Овом материјалу широк спектар могућности омогућују његове перформансе као што су отпорност на задржавање чврстоће при високим температурама, висока отпорност на хабање, мала густина, висока топлотна проводљивост и отпорност на хабање. Примена силицијум карбида у балистичким панелима је циљана, због добрих перформанси коришћен је у оклопним системима за савладавање трајних претњи. Међутим цена овог материјала је висока и захтева више температуре обраде и сложеније методе обраде овог материјала [9].

III. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ ОДРЕЂИВАЊА ДУБИНЕ ПЕНЕТРАЦИЈЕ

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

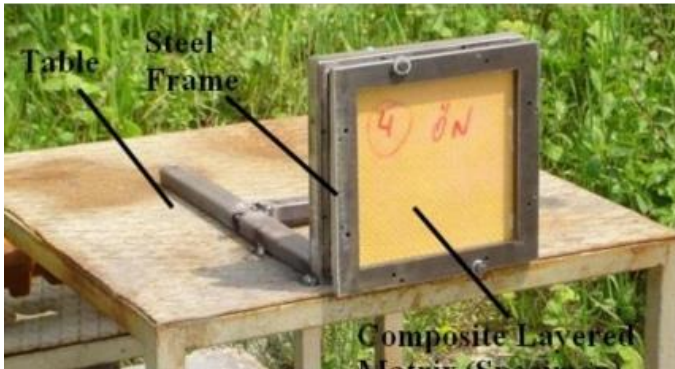
У првој студији случаја коришћене су различите врсте композитних слојева које су подвргнуте балистичким тестовима и симулацијама. За композитне слојеве ојачане карбонским влакнима коришћено је алуминијумско саће, кевлар и шперплоча. Испитиване су различите комбинације композитних слојева са пушком дуге цеви (Safir T14) и пројектилом калибра 36 [10].

У другој студији случаја ради анализе балистичких перформанси, односно дубине пенетрације, коришћене су различите концентрације алуминијум - триоксида: A00, A70, A75, A80, A85, A90 теж. % [8].

У трећој студији случаја од материјала коришћен је 60 % алуминијумов прах, тврдоће 9.25. Мипелон ПМ-200 пречника 10 μm . Мипелон је фини полиетиленски прах, под називом још и УХМВПЕ. Поред њих коришћена је и МДФ плоча дебљине 2,54 cm [11].

Прва студија случаја

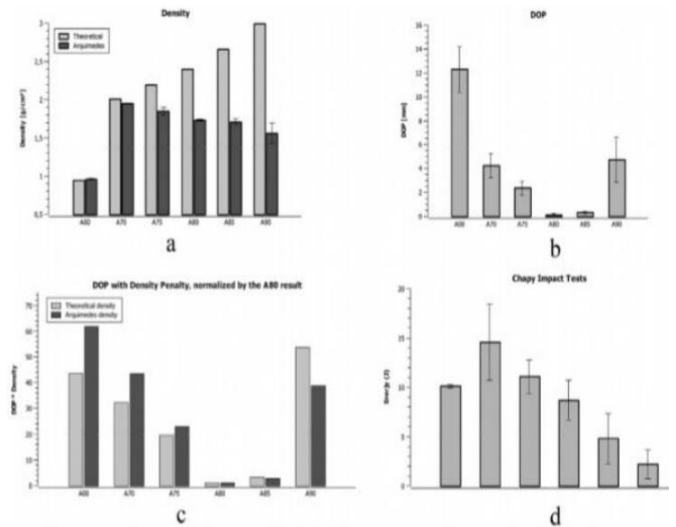
За први материјал је коришћена деветослојна шперплоча дебљине 12 mm, као други материјал коришћена су три слоја тканине Кевлар49, који је ојачан слојем епоксида. Трећи композитни материјал је био алуминијум ојачан карбонским влакнима. Матрица се саставља када се споје различити композитни слојеви. Код свих матрица су коришћене две шперплоче. Поставка за тестирање је била удаљена 10 m, због безбедности, и направљена је од челичног стола и оквира у коме се постављају горе наведене матрице (приказано на Сл.2) [10].



Сл.2. Приказ челичног стола на који се постављају матрице за испитивање [10].

Друга студија случаја

У циљу добијања резултата пенетрације, односно продирања пројектила кроз материјале, биће приказана студија случаја код које су коришћене различите концентрације алуминијум – триоксида. Вредност дубине пенетрације добијене су мерењем дубине ударне шупљине створене у материјалу који се налазио иза мете. На том месту је постављена и дрвена плоча, која има функцију да смести пројектил у случају да промаши узорак. Балистичка испитивања су обављена пушком на компримовани ваздух, тако што је пројектил испаљен само на дрво и тако што је испаљен у мету која је постављена испред дрвета. Спроведена су Charpy ударна испитивања ради разматрања механичких карактеризација. Слика бр.3. показује резултате Charpy тест удара, под а) је приказана густина материјала који је коришћена у експерименту, у зависности од различитих концентрација алуминијум - триоксида која је коришћена, под б) дубина пенетрације, ц) дубина пенетрације са густином и д) резултати примене Charpy теста који одређује механичке карактеристике материјала. Charpy тест је показао да што је већа количина глинице, жилавост композитног материјала је мања [8].



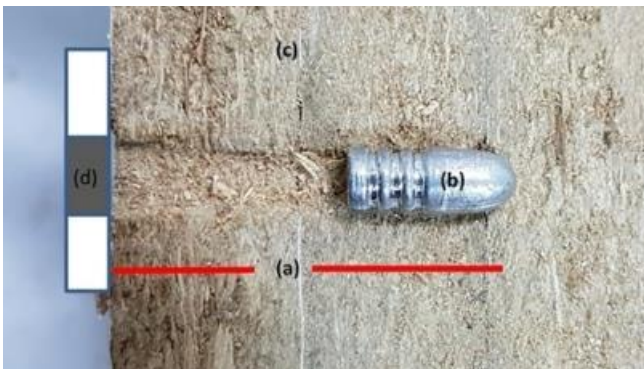
Сл.3. резултати Charpy теста, а) је приказана густина материјала који је коришћена у експерименту, б) дубина пенетрације, ц) дубина пенетрације са густином и д) резултати примене Charpy теста [8].

Трећа студија случаја

Пре самог експеримента су најпре припремљени узорци, композити у облику диска са различитим масеним односом алуминијума и УХМВПЕ материјала. Узорци су припремљени механичким мешањем - употребом механичког миксера у трајању од десет минута и означени следећим ознакама: A20, A40, A60, A80, A85, A90 и A95. Узорци су произведени у облику дискова дебљине 5 mm и пречника 51 mm. Дискови су затим пресовани на температури од 230°C у трајању од десет минута, употребом силе од 90 kN. Поред горе наведених узорака, коришћена су још два под ознаком A00 и A100, који представљају чисте узорке алуминијума и УХМВПЕ [11].

Од потребног материјала, коришћена је ваздушна пушка Gunprover CCC са пригушивачем буке Padrao armas. Пројектил је био калибра 22, са процењеном масом од 3,3 g. Након пуцања из оружја, брзина удара је мерена коришћењем уређаја под називом Air Chroni хронограф модела МК3, који поседује прецизност од 0,15 m/s. Након балистичког испитивања слике су добијене применом SEM - скенирајућег електронског микроскопа [11].

Приликом балистичког испитивања пушка је постављена на растојању од 5 m од мете. Мета је сачињена од композитног диска који је причвршћен на плочи од медијапана. МДФ плоче су коришћене због хомогености материјала, јер су равне и густе, без зрна дрвета, и постављене су као преграде због њихових добрих перформанси. На слици 4 испод може се видети резултат продирања пројектила, дубина пенетрације, изглед пројектила и изглед МДФ плоче [11].

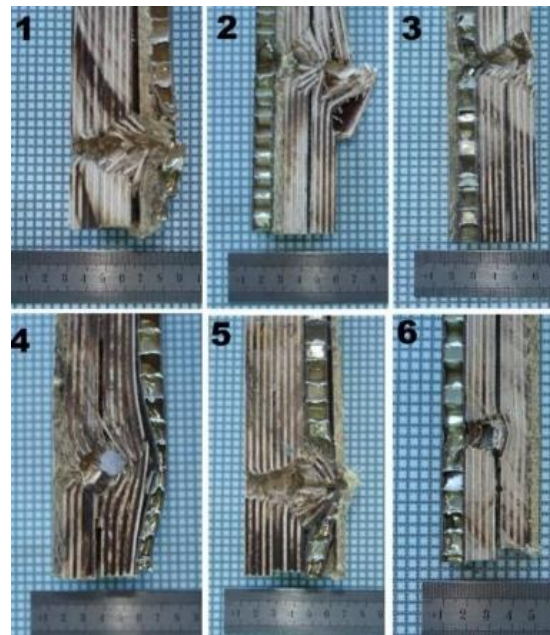


Сл. 4. Приказ дубине пенетрације под а), пројектил под ознаком б), ц) МДФ плоча, д) композитни диск [11].

IV. РЕЗУЛТАТИ

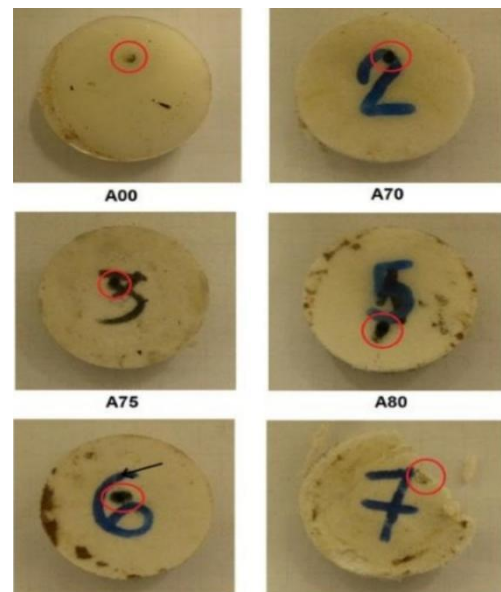
У случају прве студије случаја, након балистичких испитивања, комбинација панела композитних материјала је исечена на два дела дуж путање пројектила. На слици бр.5. је приказан први слој материјала који је пројектил пробио оклоп. Иако је уочено раслојавње слоја шперплоче, кевлар и саће су остали нетакнути. Док је последњи слој саћа ојачаног угљеничним влакнима сломљен. Што доводи до закључка да ова комбинација не може да заштити човека од пројектила. Код другог материјала који је имао обрнути редослед матрице, јавља се раслојавње шперплоче. Последњи део шперплоче је разбијен на делове. Што представља један од најгорих комбинација панела [10].

У трећем случају промењен је само редослед слојева саћа ојачаног угљеничним влакнима и слојевима кевлара који је ојачан епоксидом. Резултати су били исти као и у претходна два случаја, где није постигнута жељена заштита. Код четврте матрице, пројектил није могао да прође кроз други слој шперплоче, јер је ојачана кевларом49. Пета комбинација показује да пројектил није могао да савлада први слој јер није тврди композит. У шестој комбинацији пројектил је успешно апсорбован као и код комбинације четири, где је у овом случају откривено веће раслојавње шперплоче него у четвртом композиту [10].



Сл. 5. приказ резултата продирања пројектила кроз материјал након балистичко тестирања [10].

У случају друге студије случаја, слика 6. показује узорке након балистичког удара. Примећено је да узорци А00, А70, А75 и А80 нису имали лом дугог домета услед удара. Узорак А85, се није сломио али се може уочити пукотина која почиње у подручју удара, док узорак А90 је фрагментован током балистичког теста [8].

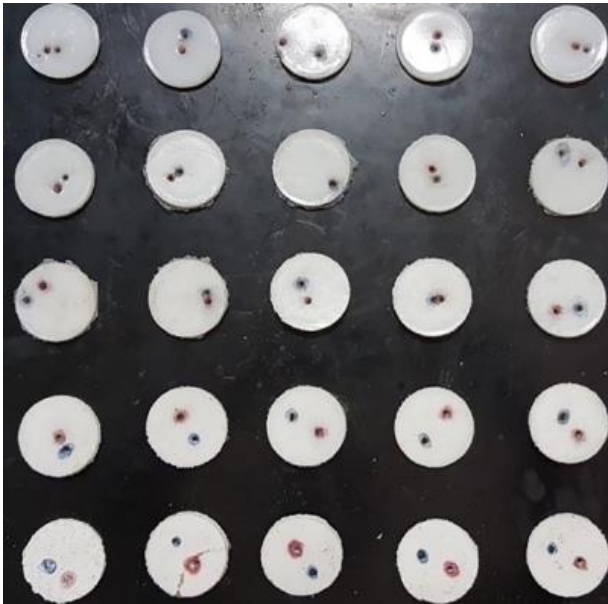


Сл. 6. резултат након балистичког теста у случају друге студије случаја [8].

У случају друге студије случаја, резултати су показали да што је дубина пенетрације већа, деформација је мања. Код узорак А80 и А85 се уочава значајна деформација пројектила него код осталих. Анализом је утврђено да узорак са кконцентрацијом А80 има најбоље перформансе у погледу дубине продирања [8].

Када је реч о резултатима у трећој студији случаја где су од материјала корићени 60 % алуминијумов прах, тврдоће

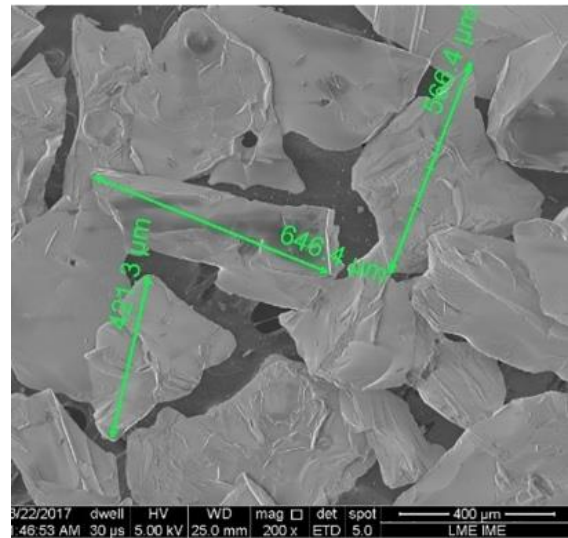
9.25. Мипелон ПМ-200 пречника 10 μm . Мипелон је фини полиетиленски прах, под називом и УХМВПЕ. Приликом пуцања из ваздушне пушке, испалено је по два пројектила у сваком од пет понављања. Резултати су приказани на Сл. 7, где се уочава да су оба пројектила у сваком од понављања продрла у диск [11].



Слика 7. Приказ резултата након продирања пројектила у композитни материјал [11].

Пошто су маса пројектила и брзина удара биле исте за све тестове, резултати се могу одмах тумачити. Узорци са највећом вредношћу био је чист узорак А00 и узорак А90. Ови резултати показују то да је адхезија између алуминијума и УХМВПЕ веома слаба. Узорак са концентрацијом А20 има већу вредност дубине пенетрације за разлику од чистог узорка А00. са повећањем концентрације глинице унутар композитног материјала повећава се ефекат смицања. За концентрације глинице које су изнад 60 %, примећује се значајно смањење дубине пенетрације пројектила, што је последица присутне концентрације УХМВПЕ праха [11].

На слици 8 је приказан изглед честица алуминијумовог праха употребом SEM микроскопа. На слици се могу видети димензије ових честица, њихов изглед, као и дужина изражена у μm . На слици се може уочити неправилни облик честица, који побољшава крутост материјала. Будући да честице глинице поседују малу густину и садрже континуиране поре које су испуњене УХМВПЕ-ом, постиже се крутост композита [11].



Слика 8. Изглед Алуминијумов-ог праха применом SEM микроскопа [11].

V. ЗАКЉУЧАК

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

У случају прве студије случаја, закључак јесте да и поред тога што су композитни материјали поседовали неки вид ојачања, то није било довољно да спречи продирање пројектила, те се оваква врста материјала не може употребити у војној и цивилној индустрији. Приликом проучавања оваквих материјала веома је важно узети у обзир већи број перформанси који ће бити испитан. Редослед слојева материјала игра веома важну улогу, што приказује прва студија случаја. Пројектил мора да дође најпре у контакт са тврдом делом материјала, који ће апсорбовати почетну енергију ударца пројектила, други слој треба бити мекши како би апсорбовао енергију након удара, док последњи слој треба да буде такав да средишњи слој држи на окопу и да апсорбује посталу енергију пројектила.

Док друга студија случаја показује да композитни материјали са примесом алуминијум - триоксида поседују добре перформансе и добру моћ пенетрације. Алуминијум - троксид је познат по својој високој тврдоћи и чврстоћи, што га чини идеалним додатком у композитним материјалима како би се повећала отпорност на пробој. Композитни материјали могу омогућити инжењерима да прилагоде састав и структуру како би се постигла оптимална комбинација чврстоће и отпорности на пробој, прилагођавајући се специфичним захтевима оклопне заштите. Примена композитних материјала са додатком Al_2O_3 могу да зауставе продирање пројектила, што га чини погодним у системима оклопне заштите, као што су оклопна возила и панцири. У случају треће студије случаја примећено је да узорци који су садржали у себи додаток УХМВПЕ праха у великим количинама, да је дубина пенетрације пројектила смањена. Док код чистих узорaka,

узорака који су садржали само алуминијум или само УХМВПЕ прах је дубина пенетрације пројектила знатно повећана.

Алуминијум - триоксид је један од најчешћих састојака у композитним материјалима због својих механичких и термичких својстава. Док УМВПЕ прах за који смо рекли да представља веома фини полиетиленски прах, композитном материјалу би могао омогућити одређене карактеристике као што су: флексибилност и отпорност на ударце. Стога ће сама употреба ових материјала зависити од тога какве жељене перформансе инжењер желети да постигне у системима заштитне опреме.

VI. РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] С. Срећковић / Р. В. Радовановић, „Мастер рад на тему: Испитивање савремених антибалистичких материјала методама пенетрације са посебним освртом на керамичке композитне панеле,“ р. 100, 2023.
- [2] Р. В. Радовановић, Техничка средства полиције, Београд: Криминалистичко - полицијска академија, 2009.
- [3] Р. Алексић, И. Живковић / П. Ускоковић, Композитни материјали, Београд: Технолошко - металуршки факултет, 2015.
- [4] Е. Medvedovski, „Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2,“ *Ceramics international*, pp. 1-11, May 2010.
- [5] М. М. Петровић, „Испитивање композитних материјала помоћу уграђених фиброоптичких сензора приликом удара контролисаном енергијом,“ 2016.
- [6] W. Liu, Z. Chen, X. Cheng, Y. Wang, A. R. Amankwa / J. Xu , „Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor,“ *ScienceDirect*, pp. 33-40, January 2016.
- [7] K.-t. Lau, P.-y. Hung, M.-H. Zhu / D. Hui, „Properties of natural fibre composites for structural engineering applications,“ *ScienceDirect*, pp. 222-233, March 2018.
- [8] M. J. Oliveira, A. V. Gomes, A. R. Pimenta / A. B.-H. d. S. Figueiredo, „Alumina and low density polyethylene composite for ballistics applications,“ *Journal of Materials Research and Technology*, pp. 1791-1799, September–October 2021.
- [9] Vidya, L. Mandal, B. Verma / P. K. Patel, „Review on polymer nanocomposite for ballistic & aerospace applications,“ *materialstoday PROCEEDINGS*, 2020.
- [10] I. K. Yilmazcoban / S. Doner, „Ballistic Protection Evaluation of Sequencing the Composite Material Sandwich Panels for the Reliable Combination of Armor Layers,“ *Acta Physica Polonica Series a 130(1)*, pp. 342-346, July 2016.
- [11] A. B.-H. d. S. Figueiredo, É. P. Lima Júnior, A. V.

Gomes, G. B. M. d. Melo, S. N. Monteiro / R. S. d. Biasi, „Response to Ballistic Impact of Alumina-UHMWPE Composites,“ *ScieloBrazil*, May 2018.

ABSTRACT

The depth of penetration is one of the most frequently examined characteristics of materials when it comes to materials used for the purpose of ballistic protection of both body armor and armored vehicles. This type of experiment allows evaluating the ability of composite panels to stop or reduce the penetration of projectiles, which is of great importance when it comes to ballistic protection for soldiers as well as civilian protection. Aluminum trioxide (Al₂O₃) is a common addition to composite materials due to its mechanical properties, including high hardness, abrasion resistance, and thermal stability. Combined with other materials such as polymers, we get composite panels that have the potential to provide ballistic protection. In order to determine the depth of penetration, an experimental method is usually applied, which involves firing firearms of different calibers at the panels, where the depth of penetration is then measured, i.e. missile penetration. In addition to the depth of penetration, other factors are also taken into account, such as the type of substrate in question, the type of material the panels are made of, the distribution of energy during impact, etc. Based on the results, engineers can optimize the composition of the composite panels to achieve the desired ballistic performance. Such experiments are of great importance in the military industry for the development of ballistic protection for military vehicles, equipment and personal protection. In addition to the military industry, it is increasingly used in the civil protection of the automotive industry and construction.

Experimental representation of the depth of penetration of composite panels composed of aluminum trioxide in order to analyze ballistic performance

Selena Srećković, Radovan V. Radovanović.