

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

168/2

(Број захтева)

06.02.2025.

(Датум)

Веће научних области техничких наука(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)**ЗАХТЕВ****за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и
о одређивању ментора**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

**Пенетрација оклопних челика високе тврдоће пројектиlima стрелачке муниције
са тврдим језгром**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинство (ужа научна област: Војно машинство – системи наоружања)

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:

РАДОВАН (Велибор) ЂУРОВИЋ

2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):

Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35

3. Година завршетка претходног нивоа студија:
- 2019.

4. Година уписа на докторске студије:
- 2019.

5. Назив студијског програма докторских студија:
- Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Предраг Елек

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Djurovic, R., Elek, P., Markovic, M., Jevtic, D.: Modification and experimental validation of the Forrestal-Warren perforation model for high hardness armor steel plates of intermediate thickness, Defence Technology, Vol. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.11.006>, ISSN 2096-3459, IF(2023)=5.0 (M21)
2. Alameri, O., Elek, P.: Efficiency Analysis of Fragmentation Warheads Through Advanced Modeling Techniques: Experimental and Numerical Study, Shock and Vibration, Vol. 2024, Article ID 3288510, 20 pages, ISSN 1070-9622, IF(2023)=1.2 (M23)
3. Marković, M., Elek, P., Jaramaz, D., Jevtić, D., Đurović, R., Jaramaz, L., Micković, D.: Analysis of parameters influencing the pressure and temperature distribution in the gunbore evacuator, Thermal Science, Vol. 27, No. 1B, 2023, pp. 727-738, ISSN 0354-9836, IF(2023)=1.1 (M23)
4. Alazeezi, M., Popović, N., Elek, P.: Two-component propellant grain for rocket motor: Combustion analysis and geometric optimization, Thermal Science, Vol. 26, No. 2, 2022, pp. 1567-1578, ISSN 0354-9836, IF(2022)=1.7. (M23)
5. Jevtić, D., Micković, D., Jaramaz, S., Elek, P., Marković, M., Živković, S.: Modeling of Gas Parameters in the Cylinder of the Automatic Gun During Firing, Thermal Science, Vol. 24, No. 6, 2020, pp. 4135-4145, ISSN 0354-9836, IF(2020)=1.625. (M23)

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 06.02.2025. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 168/2
Датум: 06.02.2025. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 06.02.2025. године донело је:

О Д Л У К У
о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Радована Ђуровића**, маг. инж. маш. под насловом **„Пенетрација оклопних челика високе тврдоће пројектилима стрељачке муниције са тврдим језгром“**.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Милош Марковић, ванр. проф., др Ивана Тодић, ванр. проф. и др Небојша Христов, ванр. проф., Универзитет одбране, Војна академија.

За ментора докторске дисертације именује се др Предраг Елек, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена подобности теме и кандидата **Радована В. Ђуровића**, маг. инж. маш. за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа бр. 215/3 од 24.12.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Радована В. Ђуровића, маг. инж. маш. за израду докторске дисертације под називом: **„Пенетрација оклопних челика високе тврдоће пројектилама стрељачке муниције са тврдим језгром”**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Радован Ђуровић рођен је 18.10.1995. године у Пећи. Основне академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2014/2015. године, а завршио 2017. године са просечном оценом 9.73 (девет и 73/100). Мастер академске студије на модулу Системи наоружања уписао је школске 2017/18. године. Исте је завршио са просечном оценом 9.85 (девет и 85/100), одбравивши у јулу 2019. године дипломски (мастер) рад на тему „Пројектовање бојне главе са парчадним и кумулативним дејством“ из предмета Конструкција пројектила са оценом 10 (десет). Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2019/20. године, са научно-истраживачком оријентацијом на области конструкције пројектила и балистике на циљу.

За све три године Основних академских студија, као и за обе године Мастер академских студија, примио је Похвалу за одличан успех поводом дана Машинског факултета у Београду. Поред тога, добитник је и две студентске стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, као и две стипендије „Доситеја“ Фонда за младе таленте Министарства омладине и спорта Републике Србије. По завршетку Мастер академских студија проглашен је за Студента генерације уписане на факултет школске 2014/2015. године.

Од октобра 2020. године запослен је на Машинском факултету Универзитета у Београду као сарадник у звању асистента са пуним радним временом за ужу научну област Војно машинство – системи наоружања. Ангажован је на одржавању вежби из предмета Основи погона пројектила на Основним академским студијама, као и из предмета: Физика експлозивних процеса, Погон ракета, Конструкција пројектила и Балистика на циљу на Мастер академским студијама. Учествовао је у изради студије „Истраживање могућности оптимизације основне кумулативне бојеве главе калибра 125 mm“ (према уговору бр. 08/192-484 од 09.12.2022. године) за потребе Војнотехничког института у Београду, као и на задатку „Услуга извођења софтверске симулације процеса у БГЕФП и КБГ и оптимизације конструкције ради добијања максималне могуће ефикасности, уз софтверску подршку у припреми и спровођењу“, према уговору бр. 865-МС326-7/21 од 01.03.2024 за истог наручиоца.

У склопу Erasmus+ програма мобилности посетио је током јула 2021. године Егејски Универзитет (University of the Aegean) у Грчкој. Учествовао је у дванаест Комисија за одбрану и оцену мастер рада на Катедри за системе наоружања. Аутор је и коаутор: једног рада објављеног у врхунском међународном часопису (M21), једног рада објављеног у међународном часопису (M23), пет саопштења са међународног скупа штампаних у целини (M33), два саопштења са међународног скупа штампана у изводу (M34), као и једног помоћног уџбеника.

Поред матерњег српског језика, говори, чита и пише на енглеском језику, а служи се и руским језиком.

Активно користи бројне инжењерске софтверске алате, укључујући: PTC Creo Parametric, ANSYS, MATLAB, SolidWorks.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

1.2.1 Положени испити на Докторским студијама

Кандидат Радован В. Ђуровић уписао је Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2019/20. године (бр. индекса Д04/2019). Положио је све испите предвиђене Планом усавршавања студената докторских студија, укључујући и Пројекат идеје докторске дисертације, чиме је остварио укупно 120 ЕСП бодова и испунио основни услов за пријаву докторске дисертације. Списак положених предмета, остварених ЕСП бодова и оцена дат је табеларно.

1.2.2 Учешће у извођењу наставе

Почевши од шк. 2020/21 године, кандидат је активно и континуално укључен у наставни процес Катедре за системе наоружања Машинског факултета Универзитета у Београду. У звању асистента, ангажован је на припреми и одржавању вежби из предмета Основи погона пројектила на Основним академским студијама, као и из предмета: Физика експлозивних процеса, Погон ракета, Конструкција пројектила и Балистика на циљу на Мастер академским студијама.

Редни број	Назив предмета	Година студија, семестар и број ЕСПБ				Оцена
		1. година		2. година		
		I	II	III	IV	
1.	Виши курс математике (о)	5				8 (осам)
2.	Нумеричке методе (о)	5				10 (десет)
3.	ОМНИР и комуникација (о)	5				10 (десет)
4.	Примена експлозива (и)	5				10 (десет)
5.	Одабрана поглавља из механике (о)		5			10 (десет)
6.	Одабрана поглавља балистике на циљу (и)		5			10 (десет)
7.	Погон пројектила (и)		5			10 (десет)
8.	Ефикасност и поузданост наоружања (и)			5		10 (десет)
9.	Одабрана поглавља из конструкције пројектила (и)			5		10 (десет)
10.	Истраживање и публикување 1	10				10 (десет)
11.	Истраживање и публикување 2		15			10 (десет)
12.	Истраживање и публикување 3			20		10 (десет)
13.	Истраживање и публикување 4				8	10 (десет)
14.	Пројекат идеје докторске дисертације				22	10 (десет)

Легенда: о – обавезни предмет, и – изборни предмет.

1.2.3 Списак објављених радова

Категорија M20 – радови објављени у научним часописима међународног значаја

Рад у врхунском међународном часопису (**M21**)

1. **Djurovic R.**, Elek P., Markovic M., Jevtic D.: *Modification and experimental validation of the Forrestal-Warren perforation model for high hardness armor steel plates of intermediate thickness*, Defence Technology, KeAi Communications Co., ISSN: 2214-9147, IF(2023): 5.0, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.11.006>

Рад у међународном часопису (**M23**)

2. Marković M., Elek P., Jaramaz D., Jevtić D., **Đurović R.**, Jaramaz L., Micković D.: *Analysis of parameters influencing the pressure and temperature distribution in the gun bore evacuator*, Thermal Science, Vol. 27(1B), pp. 727-738, 2023, ISSN: 2334-7163, IF(2023)=1.1, <https://doi.org/10.2298/TSCI220409102M>

Категорија М30 – зборници међународних научних скупова

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (М33)

3. **Ђуровић Р.**, Elek P., Marković M., Jevtić D., Erčević M.: *Numerical analysis of the tungsten carbide-cobalt cored bullet penetrating the high-hardness steel plate*, 10th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2022, pp. 161-168, Belgrade, 13-14 October 2022.
4. Elek P., **Ђуровић Р.**, Hristov N., Jerković D., Aničić A.: *Experimental investigation on the perforation of high-hardness steel plate by an API projectile*, 10th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2022, pp. 144-149, Belgrade, 13-14 October 2022.
5. Marković M., Elek P., Jevtić D., **Ђуровић Р.**, Todić I.: *Numerical analysis of the inhomogeneous obstacle influence on the precursor shaped charge warhead performance*, 10th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2022, pp. 155-60, Belgrade, 13-14 Oct. 2022.
6. Elek P., Đorđević M., Marković M., Jevtić D., **Ђуровић Р.**: *Experimental and analytical study of behind armor debris after perforation of a steel plate by an AP projectile*, 33rd International Symposium on Ballistics, Bruges, Belgium, 16-20 October 2023. DESTech Publications, Inc., ISBN: 978-1-60595-692-3.
7. Elek P., Marković M., Jevtić D., **Ђуровић Р.**: *Modeling of shaped charge jet penetration depth: Analytical and numerical approach*, 11th Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2024, 09-11 October 2024, Tara, Serbia. Belgrade: Military Technical Institute, ISBN: 978-86-81123-94-2.

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (М34)

8. Elek P., Marković M., Jevtić D., **Ђуровић Р.**: *Modeling of penetration depth of a shaped charge jet*, 9th Congress of the Serbian Soc. of Mech., Vrnjačka Banja, July 5-7, 2023.
9. Elek P., Marković M., Jevtić D., **Ђуровић Р.**: *Numerical and analytical modeling of a shaped charge penetration depth*, Proceedings of the 4th International Conference on Impact Loading of Structures and Materials, pp. 88-89, Fraunhofer Institute for High Speed Dynamics, Ernst-Mach-Institut, EMI, Freiburg, Germany, May 2024.

Уџбеничка литература – помоћни уџбеник

10. Марковић, М., Јевтић, Д., **Ђуровић, Р.**, Миличић, Л.: Пројектовање ракета и лансера – практикум, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2023.

1.3 Оцена подобности кандидата за рад на докторској дисертацији

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада кандидата Радована В. Ђуровића, Комисија констатује да је исти:

- положио све испите и испунио све обавезе предвиђене наставним планом и програмом Докторских студија, чиме је стекао 120 ЕСПБ и тиме остварио услов да му се одобри израда докторске дисертације,
- публиковао и изложио више радова и саопштења у међународним научним часописима и на међународним научним скуповима из области којој припада предложена тема докторске дисертације.

Биографски и библиографски подаци, положени испити на Докторским студијама, те научне и стручне активности кандидата, према мишљењу Комисије, квалификују Радована В. Ђуровића за самосталан и успешан научноистраживачки рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Постизање захтеваног степена балистичке заштите војних и цивилних средстава и структура заснива се, готово неизоставно, на примени оклопних челика у изради како основног, тако и додатног оклопа. Међу предностима употребе ових челика, а које укључују високе балистичке перформансе, технологичност производње и обраде те релативно ниску цену, нарочито је значајна њихова способност да у крајње сложеним условима експлоатације очувају механичка својства и интегритет структуре. Ипак, услед релативно велике густине челика, те ограничења у погледу максималне дозвољене масе оклопа, оклопни челици најчешће се примењују у виду плоча мале или средње дебљине чиме се директно ограничава остварив степен балистичке заштите. Како би се наведени недостатак у одређеној мери умањео, могуће је имплементирати методе попут закошења оклопа, те примене вишеслојног, размакнутог и/или перфорираног оклопа [1-4]. Поред тога, као нарочито корисна метода повећања балистичких перформанси оклопа показала се примена челика повишених вредности тврдоће, укључујући ту и оклопне челике високе тврдоће (енг. ННА - High hardness armor) [5, 6]. Поменута група челика одликује се тврдоћом од 477 до 534 ВНН и уз групу ваљаних хомогених оклопних челика (енг. РНА – Rolled Homogenous Armor) представља најчешће примењени материјал у конструкцији савремених оклопних средстава [7].

Као једна од највећих претњи по интегритет оклопљених структура у условима савремених борбених дејстава препознати су пројектили стрељачког наоружања. Њихова широка распрострањеност и интензивна употреба резултат су: једноставности производње, одржавања и руковања стрељачким наоружањем; његових релативно малих димензија; задовољавајуће великог домета, те могућности примене против различитих врста циљева. Ефикасност и природа терминалног дејства пројектила стрељачке муниције у највећој мери зависе од својстава њиховог језгра. Тако су, на пример, пројектили са меким језгром, најчешће израђеним од олова, нарочито ефикасни против живе силе услед њихове склоности ка деформацији, скретању и фрагментацији при удару у мека ткива. Са друге стране, против оклопљених средстава војне технике се, услед одличних пенетрационих перформанси, примењују пројектили са тврдим језгром израђеним од материјала изузетних механичких својстава и високе тврдоће, попут: алатних челика, кермет композита, тврдог метала и сл. [8].

Конструкција ових пројектила, поред тврдог језгра које има улогу кинетичког пенетратора заслужног за испуњење основне функције пројектила и постизање жељене пенетрације, такође садржи и кошулицу, испуну од меког метала, а често и обележавајућу или запаљиву пиротехничку смешу. У зависности од односа између масено-димензијских својстава тврдог језгра и осталих елемената конструкције, могуће је направити разлику између пројектила са језгром (енг. *cored rounds*) и пројектила противоклопног дејства (енг. *armor-piercing rounds*) [7]. Иако између ове две групе пројектила постоји значајна разлика у пенетрационим перформансама у корист противоклопних зрна, обе групе су захваљујући постојању тврдог језгра погодне за примену против оклопних препрека мале и средње дебљине. За случај када је препрека израђена од оклопних челика високе тврдоће, пројектили са тврдим језгром оживалног или конусног врха показали су се као нарочито ефикасни услед њихове склоности да изазову лом препреке кроз механизам „меког“ формирања одсечка [6, 7]. Специфичност оваквог пенетрационог процеса огледа се у појави како дуктилних, тако и смичућих механизма лома што, услед значајно мањег отпора пенетрацији који препрека пружа током процеса формирања одсечка смицањем, може значајно умањити балистичку отпорност оклопа. Упркос томе, број истраживања у којима се детаљно и систематично разматра интеракција оклопних челика високе тврдоће и пројектила стрелачке муниције са тврдим језгром веома је скроман [9], нарочито када су у питању истраживања која разматрају појаву „меког“ формирања одсечка.

Познавање тока и исхода процеса пенетрације хомогених, монолитних плоча мале и средње дебљине израђених од оклопног челика високе тврдоће при удару пројектила стрелачке муниције са тврдим језгром од изузетног је практичног значаја, како са аспекта максимизације ефикасности пројектила, тако и са аспекта оптимизације балистичких перформанси оклопа. У складу са тим, истраживања у оквиру предложене дисертације усмерена су ка изучавању утицаја већег броја параметара значајних за разматрани пенетрациони процес, а који између осталог обухватају: конструкционе параметре тврдог језгра и пројектила; механичка својства препреке, конфигурацију оклопа; као и кинематске параметре који дефинишу тренутак сусрета пројектила и препреке. Додатно, предложени рад усмерен је ка дефинисању и евалуацији релевантних пенетрационих и постпенетрационих параметара, попут механизма лома препреке, својстава одсечака, брзине балистичког лимита и резидуалне брзине пројектила.

Предложено истраживање спровешће се кроз свеобухватни приступ који укључује примену експерименталних, аналитичких и нумеричких метода, поштујући при томе методолошке смернице и препоруке својствене истраживањима у домену балистике на циљу [9]. Наведени приступ омогућава смањење утицаја недостатака који прате засебну примену сваке од поменутих метода. Тако се, на пример, упркос предностима попут непосредног увида у балистичка својства и исход процеса пенетрације, експериментална испитивања одликују и изразитом стохастичношћу што доводи до потребе за спровођењем већег броја опита при идентичним условима у циљу добијања веродостојних резултата [10]. Услед тога, значајно се увећава утрошак времена и материјалних ресурса током истраживања, а додатну потешкоћу представља и потреба за применом софистициране мерне опреме и уређаја.

У циљу умањења неопходног броја опита често се, а нарочито у прелиминарним фазама истраживања, примењују предиктивни модели пенетрационих процеса. Ови модели засновани су на бројним претпоставкама и идеализацијама реалних пенетрационих процеса, те је у условима који значајније одступају од оних под којима су модели дефинисани неопходно имати у виду ограниченост њихове примене. Аналитички предиктивни модели могу се поделити на: моделе засноване на теорији локализоване интеракције; моделе засноване на теорији ширења шупљине; моделе засноване на законима одржања енергије и количине кретања; моделе пенетрације смичућим формирањем одсечка; као и на вишефазне моделе [11, 12]. У оквиру предложеног истраживања, а у складу са раније описаном појавом пробоја механизмом „меког“ формирања одсечка, нарочита пажња посветиће се моделима из последње две групе. Поред тога, размотриће се и приступ који предлаже модификацију постојећих модела пенетрације дуктилним механизмима лома, попут Форестал-Вореновог перфорационог модела заснованог на цилиндричном ширењу шупљине [13], са циљем инкорпорације негативног утицаја лома кроз механизам смицања. Сходно томе, резултати прикупљени током експерименталних испитивања упоређиће се са предикцијама више релевантних модела, као и са модификацијом модела Форестал-Ворена која уводи појам индекса балистичке вредности [14]. Коначно, истражиће се и могућност дефинисања ефективне дебљине препреке и оправданост њеног увођења у перфорационе једначине модела заснованих на теорији ширења шупљине уместо номиналне дебљине препреке.

Захваљујући могућности добијања потпуног увида у ток и феномене процеса пенетрације, методе нумеричког моделирања балистичких удара препознате су као нарочито значајан метод истраживања. Ипак, примена ових метода без пратеће валидације одговарајућим експерименталним подацима може довести до нетачних резултата и погрешних закључака. Као примарни узроци неприхватљивих одступања издвајају се отежана карактеризација понашања материјала у условима удара великим брзинама, као и недостаци постојећих мрежних метода просторне дискретизације [15, 16]. У оквиру рада на предложеној дисертацији, формираће се нумерички модели идентични спроведеним опитима у којима ће се испитати утицај одабира модела чврстоће и лома материјала на квантитативне и квалитативне показатеље исхода процеса пенетрације. Такође, при развоју модела пројектила и препреке испитаће се утицај одабира методе просторне дискретизације пројектила и препреке, како са аспекта веродостојности добијених резултата, тако и са аспекта утршка времена и рачунарских ресурса. У том циљу, поред Лагранжеве методе мрежне просторне дискретизације примениће се и безмрежна *Smoothed-Particle Hydrodynamics* метода која налази све већу примену у моделирању балистичких феномена услед одсуства потребе за увођењем вештачке, нумеричке ерозије прекомерно деформисаних елемената мреже. По дефинисању оптималног приступа развоју нумеричких модела, испитаће се утицај конструкционих параметара пројектила и препреке, као и кинематских параметара њиховог сусрета на ток и исход процеса пенетрације.

Основни циљеви предложеног истраживања јесу:

- Преглед и систематизација постојећих сазнања у области пенетрације оклопних челика високе тврдоће пројектилима стрељачке муниције са тврдим језгром;

- Развој и експериментална верификација система и метода за детекцију, аквизицију и обраду пенетрационих и постпенетрационих параметара значајних за оцену балистичких перформанси пројектила и препреке;
- Спровођење експерименталних испитивања са циљем одређивања балистичких перформанси више пројектила стрелачке муниције различитог калибра, конструкције и својстава тврдог језгра против препрека од оклопног челика високе тврдоће, на широком опсегу ударних брзина, при различитим вредностима односа пречника језгра и дебљине препреке;
- Испитивање применљивости постојећих аналитичких, емпиријских и полуемпиријских модела у разматраним условима удара, уз компарацију са прикупљеним експерименталним подацима;
- Развој методе за интеграцију утицаја лома препреке кроз механизам адијабатског смицања формирањем одсечка у предиктивне моделе засноване на искључиво дуктилном лому;
- Развој и верификација нумеричких модела разматраних пенетрационих процеса уз испитивање применљивости мрежних и безмрежних метода просторне дискретизације и различитих модела чврстоће и лома материјала при условима балистичког удара.

Релевантни библиографски извори:

- [1] Iqbal M.A., Senthil K., Madhu V., Gupta N.K.: *Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles*, International Journal of Impact Engineering, 2017, 110, 26-38
- [2] Kilic N., Bedir S., Erdik A., Ekici B., Tasdemirci A., Guden M.: *Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile*, Materials and Design, 2014, 63, 427-38
- [3] Scazzosi R., Giglio M., Manes A.: *Experimental and Numerical Investigation on the Perforation Resistance of Double-Layered Metal Shield under High-Velocity Impact of Armor-Piercing Projectiles*, Materials, 2021, 14(3), 626
- [4] Rahman N.A., Abdullah S., Zamri, W.F.H., Abdullah M.F., Omar M.Z., Sajuri Z.: *Ballistic Limit of High-Strength Steel and Al7075-T6 Multi-Layered Plates Under 7.62-mm Armour Piercing Projectile Impact*, Latin American Journal of Solids and Structures, 2016, 13(9), 1658-676
- [5] Ubeyli M., Yildirim. R.O., Ogel B.: *On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors*, Materials and Design, 2007, 28, 1257-62
- [6] Ryan S., Li H., Edgerton M., Gallardy D., Cimpoeu S.J.: *The ballistic performance of an ultra-high hardness armour steel: An experimental investigation*, International Journal of Impact Engineering, 2016, 94, 60-73
- [7] Crouch I.: *The Science of Armour Materials*, Woodhead Publishing, 2017
- [8] Kolmakov A.G., Bannykh I.O., Antipov V.I., Vinogradov L.V., Sevost'yanov M.A.: *Materials for Bullet Cores*, Russian Metallurgy, 2021, 351-362
- [9] Tria D.E., Trebinski R.: *Methodology for experimental verification of steel armour impact modelling*, International Journal of Impact Engineering, 2017, 100, 102-16

- [10] Kilic N., Ekici B.: *Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition*, Materials and Design, 2013, 44, 35-48
- [11] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T.: *Analytical engineering models of high speed normal impact by hard projectiles on metal shields*, Central European Journal of Engineering, 2013, 3(3), 349-73
- [12] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T.: *High-speed Penetration Dynamics: Engineering Models and Methods*, World Scientific, 2013
- [13] Forrestal M.J., Warren T.L.: *Perforation equations for conical and ogival nose rigid projectiles into aluminum target plates*, International Journal of Impact Engineering, 2009, 36, 220-5
- [14] Saleh M.: *On the use of a modified Forrestal-Warren analytical perforation model for high hardness steel armour and Ti-6Al-4V*, International Journal of Impact Engineering, 2019, 132, 103384
- [15] Borvik T., Dey S., Clausen A.H.: *Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles*, International Journal of Impact Engineering, 2009, 36, 948-64
- [16] Mohotti D., Sudharshan R., Ngo T., Mendis P.: *Use of Coupled Smooth-Particle Hydrodynamics/Lagranigan Method in the Simulation of Deformable Projectile Penetration*, International Journal of Protective Structures, 2015, 6(3), 419-37

3. Полазне хипотезе

Истраживање у оквиру предложене докторске дисертације засновано је на следећим полазним хипотезама:

1. Процес пенетрације оклопних челика високе тврдоће пројектиlima стрелачке муниције са тврдим језгром одвија се кроз комбинацију пенетрационих механизма која у најнеповољнијем случају са аспекта балистичке отпорности препреке укључује дуктилно формирање отвора у првој, те адијабатско формирање одсечка смицањем у другој, завршној фази пенетрационог процеса.
2. Појава адијабатског формирања одсечка смицањем доводи до наглог губитка интегритета препреке и тренутног престанка пружања отпора даљој пенетрацији.
3. Тврдо језгро пројектила стрелачке муниције могуће је при пенетрацији оклопних челика посматрати као круто, недеформабилно тело. Насупрот томе, остали елементи конструкције поменутих пројектила, попут нпр. кошуљице, могу се занемарити услед минорног утицаја на ток и исход процеса пенетрације.
4. Понашање тврдог језгра и препреке од оклопног челика високе тврдоће у разматраним условима балистичког удара могуће је са довољном тачношћу представити нумеричким моделом заснованим на мрежној техници Лагранжеве просторне дискретизације.

4. Научне методе истраживања

Научне методе које ће се применити у оквиру предложене докторске дисертације су:

- Методе експерименталног истраживања балистичких удара, укључујући методе мерења, аквизиције и обраде сигнала, којима се омогућава непосредна евалуација значајних терминалнобалистичких параметара;
- Методе квалитативне оцене постпенетрационих оштећења препреке и исхода балистичких опита;
- Метода аналитичког моделирања пенетрационих процеса применом теорије ширења шупљине;
- Нумеричко моделирање пенетрационих процеса засновано на примени методе коначних елемената у динамичким условима где се интеграција по времену врши експлицитно;
- Мрежне и безмрежне методе Лагранжеве просторне дискретизације нумеричког модела пројектила и препреке;
- Метода компаративне анализе, којом се омогућава поређење података прикупљених током балистичких опита са резултатима добијеним применом предиктивних модела и нумеричких симулација.

5. Очекивани научни допринос

У складу са наведеним циљевима истраживања, на бази полазних хипотеза и уз примену наведених метода истраживања, очекује се да ће успешна реализација предложеног рада довести до следећих научних доприноса:

- Предложиће се модификација предиктивних модела заснованих на теорији ширења шупљине која успоставља појам ефективне дебљине препреке и исти уводи у пенетрационе једначине за прорачун брзине балистичког лимита и излазне брзине пројектила. На тај начин, дефинисаће се и у обзир узети изразито негативан утицај који лом препреке кроз механизам адијабатског формирања одсечка смицањем има на балистичке перформансе оклопних челика високе тврдоће.
- Експериментално, аналитички и нумерички ће се одредити значајни квалитативни и квантитативни показатељи тока и исхода процеса пенетрације, попут: зависности између ударне и излазне брзине пенетратора; брзине балистичког лимита; промене степена оштећења препреке са ударном брзином; масено-димензијских својстава одсечака; доминантних механизма пенетрације и сл.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања током израде предложене докторске дисертације приказан је кроз следеће активности:

- Преглед и систематизација постојећих резултата и сазнања из релевантне научно-стручне литературе.
- Спровођење експерименталних испитивања у контролисаним условима балистичког тунела, уз употребу више репрезентативних примерака пројектила стрелачке муниције са тврдим језгром, као и плоча од ННА челика различитих вредности дебљине.
- Преглед постојећих емпиријских, полуемпиријских и аналитичких модела за прорачун значајних параметара пенетрационих процеса, са посебним освртом на предиктивне моделе засноване на сферном и цилиндричном моделу ширења шупљине у препреци.
- Развој методе интеграције утицаја адијабатског формирања одсечка смицањем у прорачунске моделе засноване на механизму дуктилног формирања отвора.
- Развој нумеричких модела који одговарају спроведеним балистичким експериментима, уз посебан осврт на истраживање утицаја примењене методе просторне дискретизације, модела чврстоће, те модела лома материјала пројектила и препреке.
- Упоредна анализа експерименталних, теоријских и нумеричких резултата уз дискусију, извођење закључака и препоруке за будућа истраживања.

Предвиђено је да докторска дисертација има следећу структуру:

1. Уводна разматрања
2. Преглед досадашњих истраживања
3. Експериментално испитивање балистичких својстава
4. Предиктивни модели пенетрационих процеса
5. Нумеричко моделирање пенетрационих процеса
6. Упоредна анализа резултата
7. Закључак
8. Прилози
9. Литература

7. Закључак и предлог

Анализом пријаве теме докторске дисертације кандидата **Радована В. Ђуровића**, маг. инж. маш., Комисија за оцену подобности и научне заснованости теме докторске дисертације закључује да је предложена тема научно утемељена и актуелна, као и да кандидат испуњава све предвиђене услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета. Сходно томе, Комисија предлаже Већу докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду да се кандидату **Радовану В. Ђуровићу**, маг. инж. маш., одобри израда докторске дисертације са темом:

Пенетрација оклопних челика високе тврдоће пројектилима стрељачке муниције са тврдим језгром

Тема припада области техничких наука – машинство, ужој научној области војно машинство – системи наоружања за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан.

За ментора предметне дисертације предлаже се **др Предраг Елек, редовни професор** на Катедри за системе наоружања Машинског факултета Универзитета у Београду, који у претходних десет година има девет објављених радова у научним часописима са SCIE Web of Science листе у домену машинског инжењерства – система наоружања, дакле има све неопходне компетенције у оквиру научне области којој припада тема докторске дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Милош Марковић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Ивана Тодић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Небојша Христов, ванредни професор
Универзитет одбране, Војна академија