

**НАУЧНО-НАСТАВНОМ ВЕЋУ
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, одржаној 26.05.2016. године, одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Сенише Д. Пашагића, дипл. инж. хемијске технологије, под називом: „**Пиротехничке смеше за израду пуњења гасогенератора *Base Bleed* пројектила 37 и 57 mm**”.

Након прегледа докторске дисертације Комисија подноси Научно-наставном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

А. Приказ садржаја докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата Сенише Д. Пашагића написан је на 142 стране и садржи следећа поглавља: Увод (3 стране), Теоретски део (49 страна), Експериментални део (20 страна), Приказ и анализа резултата испитивања (39 страна), Закључак (4 стране), Литература од 53 референце (4 стране). Кандидат је уз текст дисертације приложио и списак радова проистеклих из докторске дисертације (1 страна), Биографију (1 страна) и додатке прописане правилима Универзитета о подношењу докторских теза на одобравање (4 стране).

Рад садржи 49 слика (12 слика из постојеће литературе, 37 слика представља властите резултате), 18 табела (све табеле представљене у раду су научни допринос кандидата) и 53 литературска навода. Такође, рад садржи и кратак Извод на српском и енглеском језику.

У поглављу Увод дат је кратак осврт на област истраживања и тему рада, као и основни циљ докторске дисертације. Обрађена је проблематика смањења домета класичних пројектила услед појаве отпора ваздушне средине током лета пројектила. Резултујући отпор представљен је кроз његове компоненте: таласни отпор, отпор трења и отпор дна пројектила, при чему је учешће последње компоненте износи и до 50% укупног отпора. Као најраспрострањеније техничко решење смањења отпора дна пројектила наведена је уградња јединице гасогенератора и наглашен је примат употребе двобазних и композитних ракетних горива у изради пуњења јединице ГГ у досадашњој индустријској производњи. Истакнуто је да је индустријска примена пиротехничких смеша као потенцијалних енергетских материјала за израду пуњења јединице ГГ скоријег датума и искључиво је везана за израду пуњења ГГ пројектила малих калибара. Наведени су проблеми оскудности и противуречности литературних навода везаних за потенцијалне саставе пиротехничких смеша за израду пуњења ГГ, као и непостојање конкретних експерименталних резултата испитивања којима би поменути наводи били поткрепљени. Представљен је план и смер истраживања на којима је заснована ова докторска дисертација а све у циљу успостављања теоретске и експерименталне базе из области истраживања пиротехничких смеша за израду пуњења ГГ ББ пројектила малих калибара. Наведене су гориве компоненте, органска једињења и метални прахови, који су били предмет истраживања током израде докторске дисертације, док је оптимизација пиротехничких смеша спроведена ускладу са економским и технолошким аспектима производње и имплементације потенцијалних техничких решења у индустријској производњи. У том смислу, испитан је утицај квалитета употребљених компонената (трговачки и лабораторијски квалитет) на функционалне карактеристике израђених састава пиротехничких пуњења ГГ ББ пројектила. Поред оптимизације удела и врсте

гориве компоненте извршена је и оптимизација оксидационих компоненти са аспекта генерисања максималних количина нискомолекулских продуката сагоревања, повећања поузданости припаљивања и стабилности процеса сагоревања израђених пиротехничких смеша. Карактеризација пиротехничких смеша и њиховог процеса сагоревања обављена је кроз истраживање утицаја технолошких параметара производње пиротехничких смеша на функционалне карактеристике израђених састава. Кроз завршна истраживања пиротехничких смеша на бази органских горива, лактозе, развијена метода повећања брзине сагоревања пиротехничких смеша уградњом бакарних грејача у пиротехничка пуњења, која не подразумева измене њиховог састава и продуката сагоревања.

У поглављу *Теоретски део* дат је кратак историјат развоја пројектила и метода за повећања аеродинамичности пројектила, детаљније објашњена употреба „паметних“ материјала. Дато је детаљно објашњење феномена „отпора дна пројектила“ и представљена су нека од широко прихваћених техничких решења конструкције јединице ГГ. Објашњена је улога јединице ГГ и дефинисани су основни захтеви које потенцијална пиротехничка смеша мора да испуни како би својим сагоревањем испунила улогу ГГ у повећању домета пројектила. Постављени су принципи оптимизације и израде пиротехничких смеша, са становишта репродуктивности функционалних карактеристика и постизања жељених ефеката избором адекватних компонената. Наведена је подела пиротехничких смеша према њиховој намени и ефектима које постижу кроз свој процес сагоревања. Објашњена је феноменологија сагоревања хетерогених кондензованих система и дате су поставке испитивања најбитнијих функционалних карактеристика пиротехничких смеша: максимални притисак продуката сагоревања, брзина сагоревања, енергетски потенцијал, температура samozапалења и топлотна проводљивост. На крају овог поглавља докторске дисертације обрађена је проблематика стабилности пиротехничких смеша и методе испитивања.

У поглављу *Експериментални део* дефинисане су фазе истраживања израде пиротехничких пуњења јединице ГГ ББ пројектила, при чему свака од фаза истраживања као свој интегрални део обухватала оптимизацију састава на основу резултата испитивања из претходне фазе истраживања. У овом поглављу докторске дисертације детаљно су објашњени експериментални услови, методологија и карактеристике уређаја коришћених за карактеризацију и испитивање функционалних карактеристика пиротехничких смеша. Дефинисани су експериментални услови припреме пројектила и план извршења полигонских испитивања муниције 57 mm са уграђеном јединицом ГГ. Пиротехничка пуњења јединице ГГ израђена су пресовањем пиротехничких смеша на бази магнезијума и лактозе. Испитан је утицај технолошких параметара израде пиротехничких пуњења ГГ ББ пројектила на вредности брзине сагоревања. Дефинисана је експериментална поставка, услови припрема узорака и испитивања утицаја уграђених бакарних грејача на повећање брзине сагоревања пиротехничких смеша.

Поглавље *Приказ и анализа резултата испитивања* конципирано је тако да прати аналогију испитивања представљену у претходном поглављу. Детаљно је обрађен утицај различитих органских горивих компоненти и магнезијума на функционалне карактеристике пиротехничких смеша. Аспект употребе различитих оксидационих компоненти, приликом оптимизације састава, базиран је на испитивању утицаја биланса кисеоника на брзину сагоревања и фаворизације производње нискомолекулских продуката сагоревања пиротехничких смеша. Анализирани су резултати полигонских испитивања са становишта стабилности процеса припаљивања и сагоревања пиротехничких састава на бази лактозе и магнезијума. Кроз вишепараметарску анализу резултата испитивања дефинисани су међусобни утицаји одговарајућих параметара на брзину сагоревања узорака пиротехничких смеша. Представљени су и анализирани резултати испитивања утицаја различитих адитива на брзину сагоревања и методе уградње бакарних грејача развијене током израде докторске дисертације.

У поглављу Закључак сумирани су најважнији резултати тезе и изведени закључци до којих се дошло на основу резултата изнетих у поглављу Приказ и анализа резултата испитивања. Докторска дисертација се завршава поглављем Литература, где су наведене све референце према редоследу појављивања у тексту.

Б. Опис резултата тезе

Током истраживања употребе пиротехничких смеша за израду пуњења гасогенератора ББ пројектила израђени су различити састави на бази високоенергетског металног праха (магнезијум) и органских једињења (лактоза, глукоза, сорбитол, витамин Ц) у улози гориве компоненте. Као везивне компоненте за израду пиротехничких састава коришћени су Витон А и идитол. Испитан је утицај различитих адитива (елементарно гвожђе, Fe_2O_3 , угљеник, и др.) на повећање брзине сагоревања. У првој фази истраживања извршена је анализа и поређење резултата испитивања пиротехничких смеша израђених од различитих врста горива, оксиданаса, везива и адитива ради у циљу испитивања њиховог утицаја на функционалне карактеристике пиротехничких смеша (брзина сагоревања, енергетски потенцијал, температура samozапалења и максимални притисак продуката сагоревања). Установљено је да су састави са идитолом, као везивном компонентом, остварили и до 42% више брзине сагоревања од аналогних састава са Витоном А. Сви испитани састави су сагоревали стабилно уз генерисање велике количине гасовитих продуката. У зависности од састава смеше остварене су брзине сагоревања у широком опсегу од 0,65 mm/s (004/09П1) до 3,22 mm/s (029/09П1). Додатком Fe_2O_3 , као адитива, повећана је топлотна проводљивост смеше и постигнута највиша брзина сагоревања код смеша са Витоном А, од 1,1 mm/s, уз значајно повећање количине чврстих продуката сагоревања. Истраживањем утицаја адитива на вредности брзине сагоревања утврђено је да и врло мале количине елементарног гвожђа имају значајан утицај на брзину сагоревања, и до 15,3 % више вредности БС у односу на исте саставе без овог адитива. Састави у којима се као главно оксидационо средство користио калијум-нитрат захтевали су употребу високоенергетског горива које ће својим сагоревањем неутралисати ендотермност процеса деградације калијум-нитрата. Резултати испитивања енергетског потенцијала указују на чињеницу да референтни састав са магнезијумом, као горивом компонентом, има чак 76,5 % више вредности од састава са лактозом, 027/09П1. Састави са лактозом, за исту густину пуњења, у манометарској бомби остварили су и до 50 % више вредности притиска продуката сагоревања од смеше на бази магнезијума. Вредности максималног притиска продуката сагоревања пиротехничких смеша на бази различитих органских горивих компонената не показује значајна одступања. У другој фази истраживања испитани су смеше без употребе адитива, како би до изражаја дошао утицај гориве компоненте на функционалне карактеристике. Највише брзине сагоревања постигнуте су са саставима на бази аскорбинске киселине, 4,77 mm/s, а најниже на бази лактозе, 2,89 mm/s. Смеше на бази органског горива показале су се „отпорнијим“ на утицај густине пуњења на брзину сагоревања у односу на пиротехничку смешу на бази магнезијума. Како би се испитала стабилност припаљивања и сагоревања пуњења ГГ на бази пиротехничких смеша, израђени су пиротехнички смеше на бази лактозе и магнезијума и испитане кроз полигонска испитивања, на полигону „Миоковци“ код Чачка. Кроз полигонска испитивања закључено је да је смеша на бази лактозе, иако јој је енергетски потенцијал нижи за 43,3 % у односу на састав са магнезијумом, погоднија за израду пуњења ГГ од праха магнезијума са аспекта поузданости и стабилности сагоревања током лета пројектила. Пиротехничка пуњења ГГ на бази магнезијума остварила су половичан успех по питању стабилности рада током лета пројектила. Насупрот њима, пиротехничка пуњења ГГ на бази лактозе постигла потпуну припаљивост и континуитет процеса

сагоревања, када је са основном смешом била упресована и припална смеша. Пуњења ГГ са пиротехничком смешом на бази лактозе сагоревала су без појаве бљеска иза дна пројектила што је потврђено снимцима ултрабрзе камере. У трећој фази истраживања испитан је утицај различитих технолошких параметара на вредности функционалних карактеристика испитаних пиротехничких састава. Установљено је да се повећањем удела везива смањују вредности брзине сагоревања и коефицијента варијације уз последично побољшање хомогености испитаних пиротехничких састава. Уочена одступања у односу на тренд пада БС и коефицијента варијације са повећањем удела везива објашњавају се нехомогеношћу смеша, коју је немогуће елиминисати током процеса израде пиротехничких смеша. Пад БС смеша на бази лактозе при повећању удела везива од 3-6 % износи само 5,63 %, док је код смеша на бази витамина Ц забележен пад од чак 48,65 %. Узимајући у обзир да су сви параметри испитивања за смешу на бази лактозе и витамина Ц идентични разлика у паду БС повећањем удела везива може се објаснити само различитим физичко-хемијским особинама гориве компоненте. Утицај биланса кисеоника на вредност брзине сагоревања релативно је мали и уско повезан са повећањем удела оксиданса, као компоненте са бољом топлотном проводношћу. Присуство компоненте која се топи на нижим температурама, лактоза, фаворизује пренос топлоте ка несагорелим слојевима смешу резултујући појавом максимума брзине сагоревања при неутралном билансу кисеоника. Повећањем густине пуњења остварује се прилично уједначен утицај на смањење вредности БС за све испитане саставе. Поред тога, код састава на бази витамина Ц идентификована је појава да се са повећањем густине пуњења уједначава прираст брзине сагоревања пиротехничких смеша, што се објашњава повећањем утицаја калијум-перхлорат у процесу предгревања несагорелих слојева смешу при максималним густинама пуњења. Утицај дебљине облоге пуњења ГГ на брзину сагоревања, заснован је на повећању површине са које се емитује топлота из зоне хемијских реакција у околину, чиме се остварује негативан утицај на вредности брзине сагоревања. Вишепараметарском анализом утврђено је да код састава на бази лактозе, при смањењу дебљине зида облоге, позитиван ефекат на прираст БС остварује удео гориве компоненте-због њене фазне трансформације на нижим температурама, чиме се повећава кондуктивни пренос топлоте кроз пуњење. Насупрот томе, код састава на бази витамина Ц, одлучујући утицај на вредности БС остварује удео оксиданса. Повећање дебљине облоге има негативан утицај на БС пиротехничких састава са органским горивом (мала топлотна проводљивост) и за одређену дебљину облоге може се описати константом која највише зависи од вредности коефицијента топлотне проводности материјала облоге. Последња фаза истраживања базирана је на испитивању алтернативних метода „финог подешавања“ брзине сагоревања пиротехничких пуњења на бази органских горива. Кроз двофазни процес пресовања пиротехничких пуњења ГГ, извршена је уградња по три бакарне жице у централни део пуњења ради побољшања процеса провођења топлоте кроз пуњење. Уградња бакарних жица у пуњења ГГ, у својству пасивних грејача, показала се као метода са великим потенцијалом којом се без измене састава пиротехничке смешу и продуката сагоревања повећава брзина сагоревања. Испитивање утицаја „бакарних грејача“ на брзину сагоревања извршено је са смешама на бази лактозе и аскорбинске киселине. Резултати испитивања указују на врло уједначен утицај бакарних грејача на вредности брзине сагоревања свих испитаних састава. Повећање брзине сагоревања у односу на саставе без уграђених бакарних грејача кретало се у опсегу од 14 до 18 %. Позитиван утицај бакарних грејача на брзину сагоревања потврђују и снимци термовизијске камере, на којима је уочено формирање унутрашње зоне са температурама вишим и до 40°C од оних у остатку узорка, поменуто зона није уочена код узорка у које нису били уграђени бакарни грејачи. Максимално повећање температуре посматране зоне узорка констатовано је након првих 10 s загревања, с тим да се овај тренд наставља

све до 60 s загревања узорака, када температуре посматране зоне са и без БГ почињу да конвергирају.

На основу резултата испитивања може се закључити да се оптимални састав пиротехничке смеше за израду пиротехничког пуњења ГГ ББ пројектила 37 и 57 mm, у зависности од калибра и услова лета пројектила, налази у границима које дефинишу смеше на бази лактозе (002/12П1) и витамина Ц (009/12П1). Услови лабораторије пиротехничког пуњења ГГ дефинисани су следећим параметрима: густина пуњења 1,73-1,87 g/cm³ - овај опсег обезбеђује неопходни структурни интегритет пуњења; маса припалне смеше М4 од 1,5 до 2,0 - у зависности од дужине цеви оруђа из којег се испаљује пројектил, упресоване заједно са основном пиротехничком смешом. Након израде пуњења ГГ обавезна је херметизација пуњења, било на нивоу самог пуњења или јединице ГГ. Пожељан материјал облоге пиротехничког пуњења ГГ представља алуминијум. Спољашњи пречник облоге пуњења требао да буде бар за 1,5-2,0 mm мањи од унутрашњег пречника кућишта јединице ГГ. Приликом разматрања начина утврђивања облоге пуњења у јединици ГГ, треба тежити минималној контактної површини између облоге пуњења и кућишта јединице ГГ ради смањења дисипације топлоте преко кућишта јединице ГГ (оптимални спољашњи изглед облоге пиротехничког пуњења јединице ГГ одговара изгледу лаборисаних пуњења представљених на Слици 15 ове дисертације).

Ц. Упоредна анализа резултата тезе са резултатима из литературе

Поред изузетне оскудности литературе која се бави проучавањем пиротехничких смеша за израду пуњења ГГ ББ пројектила, још веће искушење приликом израде ове докторске дисертације је представљало потпуно одсуство експерименталних резултата који би потврдили неку од теза изнетих у доступној литератури. Постоји изванредан број доступних радова који се баве конструкцијом јединице ГГ (B. Boggs, H. Zilcosky, W. Smith, „*Gun Fired Projectile Having Reduced Drag*“, United States Patent, No 4.130.061, 1978; L. Nicasto, J. Munger, „*Base Drag Reduction*“, United States Patent, No 3.885.385, 1975; K. Andersson, Nils-Erik Gunners, Y. Nilsson, „*Base Bleed Unit*“, United States Patent, No 4.807.532, 1989. и A. Franzen, V. Johansson, „*Base-Bleed Gas Generator For a Projectile, Shell or The Like*“, United States Patent, No 4.846.071, 1989), међутим, радови у којима се експлицитно спомињу и конкретне пиротехничке смеше за израду пуњења ГГ ББ пројектила су изузетно ретки. Радови у којима се ипак и спомену састави конкретних пиротехничких смеша (Brian F. Boggs, West Simsbury, Conn.; Hector J. Zilcosky, Christiana, Pa.; William M. Smith, Simsbury, Conn., *Gun Fired Projectile Having Reduced Drag*, United States Patent, No 4.130.061, 1978; R. Greene, „*Solid pyrotechnic compositions for projectile base-bleed systems*“, United States Patent, US5056436 A, 1991) углавном се пружају препоруке компонената које би дошле у обзир при изради пиротехничких пуњења јединице ГГ. На основу свега наведеног закључује се да не постоје резултати испитивања пиротехничких смеша за израду пуњења јединице ГГ ББ који би послужили за адекватну упоредну анализу са резултатима проистелим из ове докторске дисертације.

Д. Научни радови и саопштења у којима су публиковани резултати из докторске дисертације

Резултати докторске дисертације Синише Д. Пашагића публиковани су у 5 радова, од којих су 2 рада објављена у истакнутом међународном часопису (M22), један у водећем часопису националног значаја (M51) и 2 саопштења са међународних скупова штампана у целини (M33):

Радови у истакнутом међународном часопису (M22)

1. S. Pašagić, D. Antonović, S. Brzić, „*Influence of Technological Parameters on the Combustion Velocity of Pyrotechnic Compositions for Gas Generator of Base Bleed Projectiles*“, Central European Journal of Energetic Materials, 2015, 12(2), p. 331-346, (ISSN 1733-7178, IF= 1.925).

2. S. Pašagić, D. Antonović, R. Sirovatka, J. Petković, „*Influence Copper Wire Heat Guides on the Combustion Velocity of Organic Based Charges for Gas Generators of Base Bleed Projectiles*“, Central European Journal of Energetic Materials, 2015, 12(3), p. 563-577, (ISSN 1733-7178, IF= 1.925).

Радови у водећем часопису националног значаја (M51)

1. S. Pašagić, „*Investigation of Pyrotechnic Charges for Base Bleed Projectiles*“, Scientific Technical Review, Vol.61(3-4), 2011, p. 56-62, (ISSN 1820-0206).

Саопштења са међународног скупа штампана у целини (M33)

1. S. Pašagić, J. Petković, „*Usage of Organic Substances as Fuels in Production of Gase Generator Pyrotechnic Charges for Base-Bleed Projectiles*“, 4th International Conference on Defensive Technologies, OTEH 2011, October 2011.

2. S. Pašagić, J. Petković, „*Organic substances in production of gas generator pyrotechnic charges*“, Military Technologies and Systems Conference, Bulgaria, December 2011.

Е. Закључак комисије

Докторска дисертација кандидата Сенише Д. Пашагића, дипл. инж. хемијске технологије, представља оригиналан научни и стручни допринос проучавању пиротехничких смеша за израду пуњења гасогенератора *Base Bleed* пројектила. Резултати који чине део дисертације до сада су публиковани у виду два рада у истакнутом међународном часопису и једним радом у водећем часопису националног значаја. На основу изложеног, Комисија позитивно оцењује докторску дисертацију кандидата и предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом

„Пиротехничке смеше за израду пуњења гасогенератора *Base Bleed* пројектила 37 и 57 mm”

кандидата Сенише Д. Пашагића, дипл.инж. хемијске технологије прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области природних наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Душан Антоновић
редовни професор Универзитета у Београду
Технолошко-металуршки факултет

др Gordana Ušćumlić
редовни професор Универзитета у Београду
Технолошко-металуршки факултет

др Душан Мијин
редовни професор Универзитета у Београду
Технолошко-металуршки факултет

др Зијах Бурзић
научни саветник Војнотехничког института у Београду

У Београду, 13.06.2016.