

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду

Марија М. Петровић

Анализа заштите оклопних средстава

Мастер рад

Крагујевац, 2018.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Пројектили и упаљачи

Предмет: Интеграција наоружања на мобилне платформе

Број индекса: 395/2017

Марија М. Петровић

Анализа заштите оклопних средстава

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Александар Кари – ментор

Датум одбране: _____

2. _____

Оцена: _____

3. _____

У оквиру овог рада кандидат треба да:

1. Опише начин функционисања заштите тенкова;
2. Наведе примере са тактичко техничким карактеристикама система за активну и реактивну заштиту тенкова;
3. Изради алогоритам и поставити математички модел за симулацију рада заштите;
4. У закључку дати коментар добијених резултата у смислу објашњења потребних података за решавање симулације.

Препоручена литература:

[1] др Младен Пантић, дипл. инж. Опстанак тенка на бојишту, Војна академија, Београд, 2007.

[2] Угрчић М., Благојевић М., Богданов Ј.: Методолошки приступи конструисању, изради и испитивању пројектила и бојних глава кумулативног дејства

[3] др Александар Стаматовић, Физика експлозије, Београд, 1996.

[4] др Александар Стаматовић, Конструисање пројектила, Београд, 1995.

Крагујевац, 2018.

Ментор:
пк доцент др Александар Кари, дипл. инж.

Садржај:

1. УВОД	1
2. СПРЕЧАВАЊЕ ПОГАЂАЊА И ПРОБИЈАЊА	6
2.1 Активна заштита текова	7
2.2 Реактивна заштита тенкова	8
2.3 Функционисање експлозивног реактивног оклопа.....	11
3. ОПИС КОНСТРУКЦИЈЕ САВРЕМЕНИХ РЕАКТИВНИХ ОКЛОПА.....	15
3.1 Експлозивни реактивни оклоп Blazer	15
3.2 Експлозивни реактивни оклоп „Контакт“	16
3.3 Експлозивни реактивни оклоп „Контакт-5“	17
3.4 Експлозивни реактивни оклоп „Реликт“	18
3.5 Експлозивни реактивни оклоп „Нож“	19
3.6 Експлозивни реактивни оклоп М99	20
4. КУМУЛАТИВНИ ПРОЈЕКТИЛИ И ЊИХОВО ДЕЈСТВО НА ОКЛОПНА ВОЗИЛА ...	22
4.1 Тандем-кумулятивна убојна средства.....	29
4.2 Пробојно дејство	32
4.3 Дејство иза пробијеног оклопа	32
4.4 Разорно дејство	33
5. ИЗРАДА АЛГОРИТМА И ПОСТАВЉАЊЕ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА.....	34
5.1 Алгоритми	34
5.2 Математички модел	36
5.3 Простирање ударног таласа и реакција основног оклопа приликом активирања експлозивног реактивног оклопа.....	45
6. ЗАКЉУЧАК	55
7. ЛИТЕРАТУРА.....	59

Резиме

У овом раду биће дат опис и начин функционисања заштите тенкова. Затим, опис са тактичко-техничких карактеристика система за активну и реактивну заштиту тенкова, и на крају ће бити приказан алгоритам и постављен математички модел за симулацију рада заштите. Главни циљ овог рада је да се покаже како ће експлозивно-реактивни оклоп реаговати приликом поготка са кумулативним пројектилом и да ли може спречити уништење тенка прликом поготка ракете са тандем кумулативном бојевом главом.

Кључне речи: *тенк, експлозивно-реактивни оклоп, кумулативне бојеве главе, кумулативни пројектил.*

Abstract

In this work will be given a description and the way of functioning of protection of tanks. Then, a description of the tactical-technical characteristics of the system for active and reactive tanks protection, and finally, the algorithm and the mathematical model for the simulation of the protection work will be presented. The main goals of this paper is to show up how explosive reactive armor will be react when hit with hige explosive antitank projectiles and whether it can prevent the destruction of the tank during a missile strike with a shaped charge warheads.

Keywords: tank, explosive reactive armour, shaped charge warheads, hige explosive antitank projectiles.

1. УВОД

Тенк је тешко оклопљено и добро наоружано гусенично борбено возило намењено за уништавање непријатељске пешадије, оклопних возила и утврђених положаја. Тенк служи као подршка пешадији или делује самостално. Има главни топ великог калибра који се најчешће налази у покретној куполи и додатне митраљезе. Својим оклопом штити посаду, а има могућност кретања по тешким теренима [9].

Заштита тенкова је веома важна у ратним условима. Повећање заштите тенкова праћено је сталним усавршавањем противоклопних средстава, које је имало за циљ повећање пробојности што је оставрено повећањем калибра и оптималним тренутком иницирања бојеве главе помоћу уграђеног телескопског наставка. Развој експлозивно-реактивног оклопа значајно је смањио ефикасност ових система, али се зато појављују противоклопне ракете са тандем бојевим кумулативним главама са предпуњењем, чија је функција да поништи заштитни ефекат експлозивно-реактивног оклопа (HOT, ERYX и др.). Исти тренд развоја уочава се и код поткалибарних пројектила на бази тешких метала који постижу изузетно велику кинетичку енергију (брзина је преко 1500 m/s) [1].

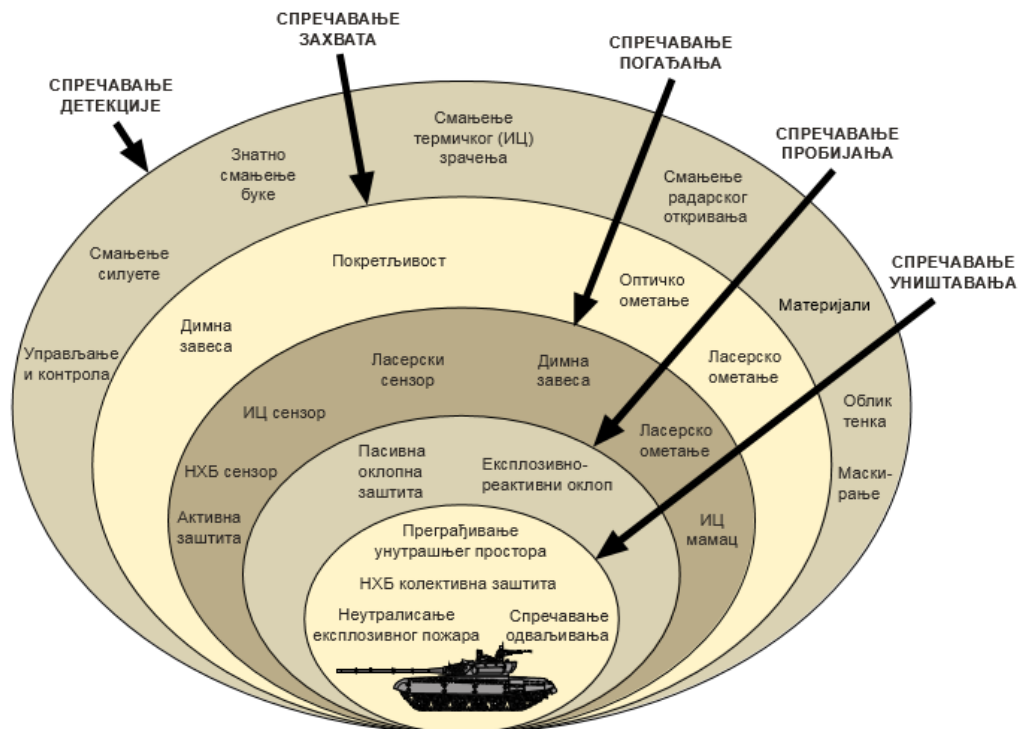
Основне карактеристике оклопних борбених возила су:

- ватрена моћ,
- покретљивост и
- оклопна заштита.

Ниво ових карактеристика и њихов међусобни однос различит је за сваку врсту борбених возила. Тако на пример ниво оклопне заштите и ватрене моћи расте почев од транспортера до тенкова.

Заштита оклопних борбених возила заснива се на оклопу и активним мерама за супротстављање испољеном дејству непријатеља, а да се при томе очувају основне перформансе у условима борбе и у случају када су погођена да обезбеде преживљавање посаде и да се после делимичног оштећења задрже у борбеном строју.

Да би се остварио што већи ниво опстанка тенкова на бојишту, треба предузети низ поступака којима се спречава откривање, захват, погађање, пробијање и њихово уништење са посадом. Те мере које се реализују применом разних техничких решења на тенку, приказане су на слици 1 [1].



Слика 1. Поступци за повећање опстанка тенка [1]

Заштићеност тенка у савременој борби се обезбеђује његовом општом концепцијом и конструкцијом, ватреном моћи и покретљивошћу: што су мање димензије тенка, што је јаче његово наоружање и већа покретљивост утолико је он отпорнији на бојишту. Основу нерањивости чини његова поуздана оклопна заштита, због чега су на основним тенковима предњи део тела и купола са највећом дебљином оклопне заштите. Проблем поуздане заштите савременог тенка компликован је и тиме што се у борби против тенкова користе различите врсте пројектила са различитим ефектима заснованим на различитим физичким принципима. Ради супротстављања тим средствима, од оклопне заштите се тражи да има изузетно висока и разнолика својства, која се могу рационално обезбедити једино вишеслојним оклопом [1].

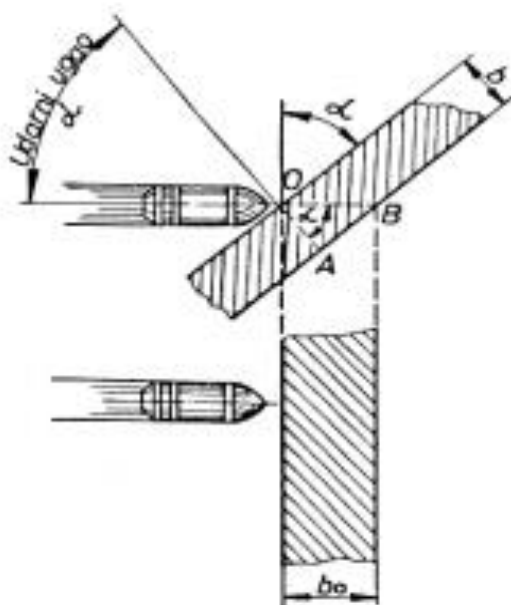
а) Захтеви за оклопну заштиту

У захтеве за оклопну заштиту, пре свега, спадају:

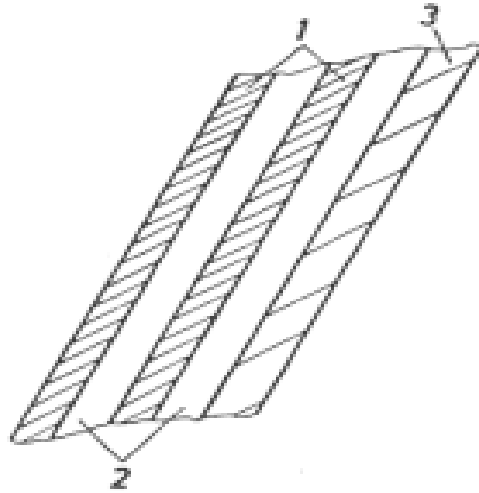
- поуздана заштита посаде и унутрашње опреме тенка од противоклопних средстава и пројектила,
- отпорност и крутост тела и куполе,
- херметичност тела и куполе.

Ради испуњења ових захтева предузимају се следеће мере:

- најважнији делови тела и куполе тенкова израђују се од легираних челика средње тврдоће, чврстоће и вискозности, уз одговарајућу термичку и механичку обраду;
- одговарајућа комбинација дебљине (b) и угла нагиба (α) чеоних плоча, предњих и бочних делова куполе и тела тенка обезбеђује заштиту од ударног дејства противоклопних топова;
- угао нагиба панцирне плоче према вертикали знатно повећава њену отпорност на дејство пројектила, пре свега тиме што се повећава пут пројектила кроз оклоп ради његовог потпуног пробијања (слика 2);
- коришћењем комбинованих вишеслојних преграда са слојевима од специјалних материјала ефикасно се слаби кумулативни млаз или радијација (на слици 3 приказан је вишеслојни такозвани сендвич оклоп);



Слика 2. Утицај угла нагиба оклопне плоче на њену отпорност на дејство пројектила [9]



Слика 3. Вишеслојни оклоп 1 – оклопни челик; 2 – пенаста пластична маса; 3 – алуминијум [9]

- ради повећања чврстоће и крутости на појединим местима куполе и пода тела тенка уграђују се пресована и заварена уздужна и попречна ребра [1].

У данашње време, основно обележје у развоју тенкова је све шири примена нових типова оклопа, на принципу комбиновања челичних плоча са другим врстама материјала (алуминијум, пластични материјали ојачани стакленим влакнима, керамика и др.).

Показало се, кад је у питању оклопна заштита, да хомогени монолитни материјали немају довољну чврстоћу, јер у њима истовремено делују напони на сабијање, истезање и смицање, што је редовни случај при продирању пројектила кроз оклоп. Решење ефикасне заштите, уз прихватљиве дебљине оклопа, нађено је у комбинацији материјала, тако да један буде отпоран на сабијање и довољно тврд, а да други има велику затезну чврстоћу, уз велику могућност пластичног деформисања.

У почетку се као тврда компонента користио цементиран челик, али тиме није био решен проблем масе, па су се развили двокомпонентни материјали (тзв. композитни оклоп). Позната решења оваквих типова оклопа су: СНОВНАМ, STILLBREW оклоп или пасивни оклоп велике густине VARMA, серија 1, фирме "VICKERS".

Са усавршавањем и развојем нових типова оклопа се није стало. Напротив, дужи низ година се интензивно ради на активно – реактивном експлозивном оклопу, тј. активном оклопу. Овим оклопом су опремљени готово сви савремени тенкови садашње генерације, чиме је вишеструко повећана ефикасност заштите, пре свега против пројектила са кумулативним ефектом. Најпознатији тип овакве врсте оклопа је "БЛАЗЕР" оклоп [1].

б) Мере за повећање противкумулятивне и противнуклеарне заштите тенка

У мере за повећање заштите тенка спадају:

- примена заштитног екрана који слаби дејство кумулативног млаза на путу ка оклопу (намена противоклопног екрана је да изазове превремену експлозију кумулативног пројектила на што већој удаљености од оклопа; екран тенка је плосната или мрежаста метална плоча или дебело гумирано платно);
- примена специјалних, релативно лаких металних и неметалних материјала, високих ватросталних својстава, за слабљење кумулативног млаза;
- давање оклопу велики угао нагиба у односу на вертикалну осу, чиме се повећава пут кумулативног млаза (еквивалентна дебљина оклопа) [1].

2. СПРЕЧАВАЊЕ ПОГАЂАЊА И ПРОБИЈАЊА

Оклоп се кроз историју тенка постављао под све мањим углом. Први тенкови имали су превише вертикално постављених плоча па је оклопна заштита била мања. Код модерног тенка предња страна тела је постављена под малим углом што повећава укупан пут пројектилу код пробијања оклопа. Тиме су се добиле дебљине оклопа веће од 1000 mm. Предња страна је зашиљена што повећава вероватноћу да се код удара гранате у оклоп, она одбије (склизне) од трупа. У модерно време све се више пажње придодаје изгледу куполе. Тако је купола Леопарда 2 (слика 4) спреда зашиљена како би се повећала могућност да граната склизне низ оклоп [1].



Слика 4. Тенк, „Леопард 2“ [7]

Један од најефикаснијих начина заштите тенка је спречавање његовог погађања од стране противтенковских средстава противника. Посебан проблем код пројектовања оклопа представља избор материјала који је уско повезан са масивношћу оклопа. Данашњи оклопи с обзиром на употребљаване материјале могу се поделити на четири типа [9]:

1. Хомогени оклопи,
2. Двослојни оклопи,
3. Вишеслојни оклопи,
4. Активни оклопи.

Табела 1. Приказ заштите тенкова кроз историју [1]

Раздобље	Први светски рат	Други светски рат	Хладни рат	1990. године до данас
Тенк	Mark 1	T-34	МАХ-30	M1 Abrams
Врста оклопа	Хомогени, заварене челичне плоче	Хомогене челичне плоче	Хомогени челик + експлозивно-реактивни оклоп	Вишеслојни оклоп + плоче од осиромашеног уранијума
Дебљина оклопа	6 – 12 mm	70 mm	133 mm	до 1000 mm

У околностима веома интензивног развоја софистицираних противтенковских средстава указана је потреба за изналажење потпуно новог начина заштите оклопних возила. Такав начин заштите назван је „активна заштита“ [1].

2.1 Активна заштита текова

Термин „активна заштита“ недавно је усвојен и, према мишљењу стручњака, може означавати целу класу система намењених за заштиту различитих војних објеката. Под активном заштитом се подразумева систем који је саставни део заштићеног објекта и у аутоматском режиму рада зауставља пројектиле који нападају овај објекат у непосредној околини. Са сигурношћу се може рећи да је систем активне заштите систем „противракетне одбране“ објекта, који ствара ватрену „активну зону заштите“ на безбедном растојању око ових објеката. Током последњих 10-20 година, више земаља је интензивно радило на развоју таквих система, али су, за сада, само руски конструктори успели у томе [1].

Активну заштиту карактеришу бројне предности у односу на експлозивно-реактивни оклоп, а то су:

- уништавање противтенковских средстава даље од оклопа тенка,
- способност заустављања циља са тандем бојевом главом,
- способност заштите рањивих тачака тенка (перископи, прикључци, итд.),
- ефикаснији сектор заштите по азимуту са једнаком тежином система заштите.

Познати системи који раде на принципу активне заштите су : ШТОРА, ДРОЗД и АРЕНА.

Неизбежно је да ће тенкови бити погођени у току борбених дејстава. Могућност да тенк преживи после поготка пројектила је једна веома важна карактеристика која омогућава да тенк у одређеној мери остане као борбено средство. Пошто постоје различита противничка оруђа и оружја, изазов за преживљавање погодака постаје већи.

Спречавање пробијања остварује се такозваном пасивном заштитом применом неколико типова оклопа и нових композитних материјала [1].

2.2 Реактивна заштита тенкова

Реактивна заштита је начин заштите борбених возила, која се остварује директном реакцијом на погодак, чиме активно делује на смањење пробојности пројектила. Реактивна заштита може бити реализована у облику следећих средстава [5]:

- експлозивни реактивни оклоп (ЕРО) и
- неексплозивни реактивни оклоп (НЕРО).

Експлозивни реактивни оклоп израђује се од појединачних елемената (тзв. касете ЕРО), које су причвршћене испред основног оклопа. Овакав назив се користи и на Западу (енг. *explosive reactive armour*, ERA), док се у Русији овакав тип заштите борбених возила назива „динамичка заштита“ (рус. динамическая защита). Код нас се среће и назив „активно-реактивни оклоп“ [5].

Касета експлозивног реактивног оклопа има експлозивно пуњење, смештено између две металне плоче мале дебљине. Експлозивно пуњење израђује се од бризантног експлозива мале осетљивости. Потребно је да основни оклоп борбеног возила поуздано штити од дејства касете експлозивног реактивног оклопа и преостале (резидуалне) пробојности пројектила након дејства експлозивног реактивног оклопа.

Услед пробијања предње плоче експлозивног реактивног оклопа, кумулативни млаз или панцирни пројектил врше активирање експлозивног пуњења које готово тренутно детонира, одбацујући облоге у истом правцу али у супротним смеровима. При вредности нападног угла кумулативног млаза $\alpha = 90^\circ$ струјна слика у пољу детонације експлозивног реактивног оклопа је још увек оносиметрична, јер се поклапају и оса симетрије кумулативног млаза и оса симетрије процеса експлозивне пропулзије иницираног експлозивног оклопа.

Супротно томе, распоред притиска по површини кумулативног млаза у зони поља детонације при малим вредностима угла α ствара обртни момент око тачке иницијације у равни дефинисаној осама симетрије млаза и активираниог оклопа, што има за последицу савијање, кидање и пертурбације млаза. При томе, покретне облоге и гасовити продукти детонације ступају у интеракцију са преосталим делом млаза, изазивајући ерозију, дестабилизацију и нарушавање његове физичке целовитости (слика 5) [5].



Слика 5. Шематски приказ дејства експлозивног реактивног оклопа [6]

Развој противоклопних средстава кумулативног дејства високе ефикасности наметнуо је потребу за развојем додатног вида оклопне заштите, како би се обезбедила даља перспектива тенкова који се налазе у оперативној употреби. Проблем је решен открићем и практичном применом експлозивног реактивног оклопа (ЕРО), чији у изванредни заштитни ефекти поново подигли ниво балистичке заштите тенка. Иако се услед монтаже експлозивног реактивног оклопа на оклопно тело тенка маса тенка увећава за додатних 0,8 до 1 тоне, што у одређеној мери умањује његове маневарске карактеристике, повећање балистичке заштите оправдава овакав вид модернизације постојећих тенкова. Масовна примена заштите помоћу експлозивног реактивног оклопа (ЕРО) у облику касета за додатну заштиту основног оклопа, постала је стандардна мера додатне заштите борбених возила. Чак и земље које нису биле склоне таквој заштити основних тенкова, после искустава у Авганистану, Ираку и другим државама, прихватају таква решења. То је у знатној мери повећало заштиту борбених возила од највећег броја противоклопних убојних средстава, примарно од кумулативних [11].

Процењује се да експлозивно реактивног оклопа прве генерације обезбеђују следећу еквивалентну заштиту борбених возила:

- 350-400 *mm* хомогеног панцирног челика од дејства кумулативних пројектила и
- 30-100 *mm* хомогеног панцирног челика од дејства поткалибарних стреластих панцирних артиљеријских пројектила [11].

На пример, руски експлозивно реактивног оклопа „Контакт-5“ пружа еквивалентну заштиту 500-700 *mm* хомогеног панцирног челика од кумулативних и 250-280 *mm* од поткалибарних стреластих пројектила.



Слика 6. Експлозивни реактивни оклопи на модернизованом тенку Т-75 (лево) и Т-90 (десно) [5]

Пионирски рад на истраживању и развоју експлозивног реактивног оклопа припада израелској фирми *Rafael* који је започет 1974. године. Разлог истраживања био је поражавајући исход рата из 1973. године, када је више стотина израелских тенкова уништено или избачено из строја, првенствено дејством кумулативних пројектила из лаких противоклопних средстава (ручни бацачи, ручни бацачи ракета, бестрзајни топови и др.). Развијен је експлозивно реактивни оклоп *Blazer*, који се у наредним сукобима показао као изузетно ефикасан.

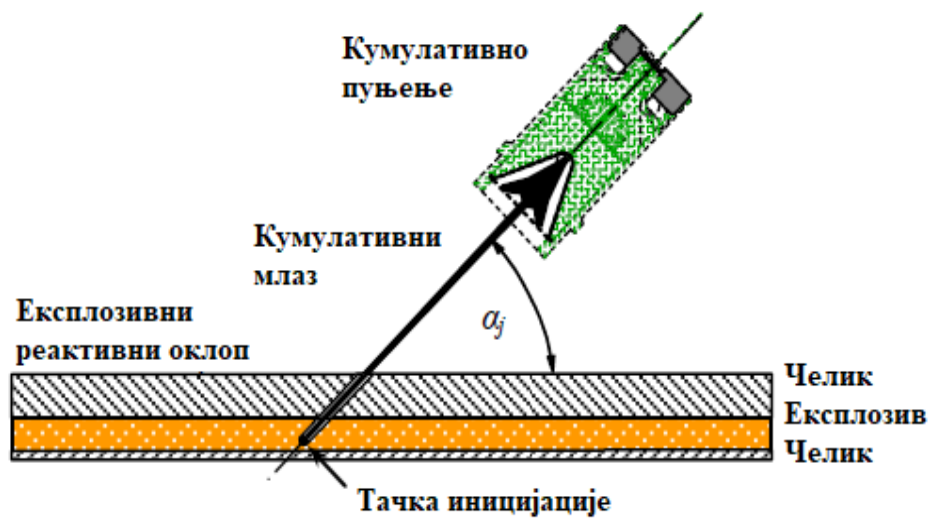
Код нас су истраживања у овој области започета крајем седамдесетих година 20. века, првенствено у циљу испитивања осетљивости експлозива на дејство кумулативног млаза, али су временом проширена и на истраживања за потребе развоја домаћег експлозивног реактивног оклопа. Истраживачко-развојни рад на овом пољу успешно је окончан развојем домаће касете експлозивног реактивног оклопа друге генерације (Касета активног оклопа, КАО М99) [10].

Осетљивост експлозива је подешена тако, да до иницирања долази само при контакту са кумулативним млазом, док у случају поготка панцирним зрном иницирање експлозива изостаје. У контакту са кумулативним млазом долази до интензивне деструкције и ерозије млаза тако да се пробојност млаза иза експлозивног реактивног оклопа драстично смањује.

Неексплозивни реактивни оклопи раде слично као експлозивно реактивно оклопи, али само што је уместо експлозива постављена гума унутар металне кутије. С обзиром да је унутрашњи слој гума уместо експлозива, кутија реактивног оклопа је лакша у односу на експлозивно реактивни оклоп, руковање је безбедније, у случају погађања пројектила околно људство је сигурније, може се поставити на било ком делу борбеног возила, а могу да се пакују у више слојева. Кључна предност ове врсте оклопа је да није осетљив на тандем кумулативне бојеве главе као експлозивно реактивни оклоп [5].

2.3 Функционисање експлозивног реактивног оклопа

У основи, експлозивни реактивни оклоп представља сендвич конструкцију састављену од два метална слоја (најчешће челична) са међуслојем од експлозива. Осетљивост експлозива је подешена тако, да до иницирања процеса детонације долази само при интеракцији са кумулативним млазом, док у случају поготка панцирним зрном активирање експлозива изостаје. У интеракцији са кумулативним млазом долази до интензивне деструкције и ерозије млаза тако да се пробојност млаза иза експлозивног реактивног оклопа драстично смањује [2].



Слика 7. Изглед експлозивног реактивног оклопа [2]

Посебан акценат је дат опису функције експлозивног реактивног оклопа, јер упућеност у његову функцију и познавање интеракције експлозивног реактивног оклопа и кумулативног пројектила отвара пут у тражењу решења за његово елиминисање.

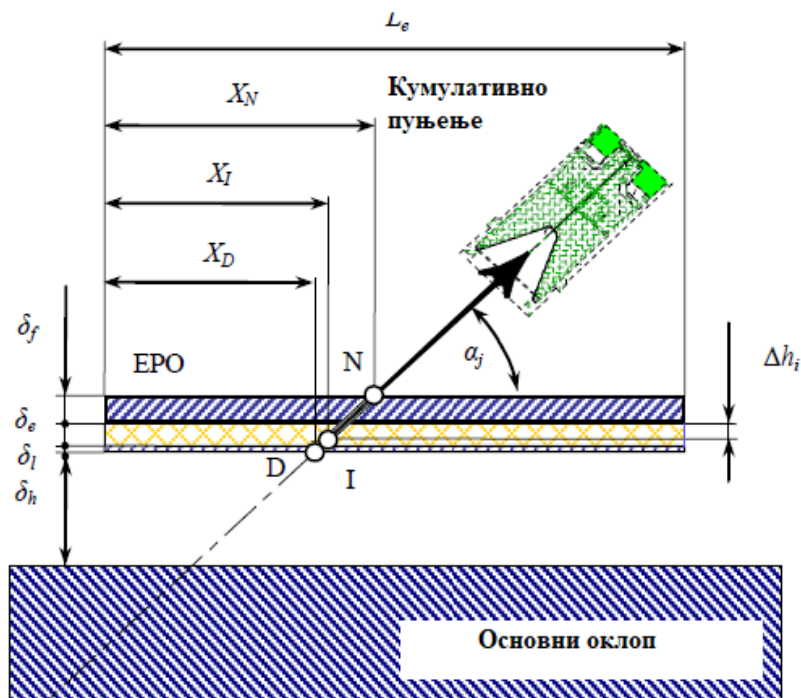
Другим речима, успешно пројектовање тандем-кумулативне бојне главе за неутралисање експлозивног реактивног оклопа и ефикасно дејство на основни оклоп није могуће без ових сазнања.

Трослојни сендвич састављен од две челичне облоге и експлозива се поставља под углом у односу на правац дејства кумулативног млаза. Активиран дејством млаза експлозивни слој у овом процесу интеракције готово тренутно детонира одбацујући облоге у истом правцу али у супротном смеру. При томе, покретне облоге у садејству са гасовитим продуктима детонације ступају у интеракцију са наилазећим делом млаза изазивајући ерозију, дестабилизацију и нарушавање његове физичке целовитости [2].

При вредности нападног угла кумулативног млаза $\alpha_j = 90^\circ$ струјна слика у пољу детонације експлозивног реактивног оклопа је још увек осносиметрична, јер се поклапају и оса симетрије кумулативног млаза и оса симетрије процеса експлозивне пропулзије иницираног експлозивног оклопа.

Супротно томе, распоред притиска по површини кумулативног млаза у зони поља детонације при малим вредностима угла α_j ствара обртни момент око тачке иницијације у равни дефинисаној осама симетрије млаза и активираног оклопа, што има за последицу савијање, кидање и пертурбације млаза.

Моделовање функције кумулативног пуњења је извршено применом једначина хидродинамичке теорије кумулације и пенетрације млаза, а разлетање металних облога експлозивног реактивног оклопа једначинама дводимензионалне експлозивне пропулзије. Радна скица геометрије и положаја експлозивног реактивног оклопа у односу на кумулативно пуњење и основни оклоп илустрована је на слици 8 [2].



Слика 8. Радна скица геометрије и положаја експлозивно реактивног оклопа [2]

Експериментална верификација теоријске анализе интеракције експлозивног реактивног оклопа и кумулативног млаза је извршена тестирањем пробојности на основном оклопу заштићеним елементом експлозивног реактивног оклопа.

Испитивањем су обухваћена пуњења различитог калибра: кумулативно пуњење малог калибра $d = 32 \text{ mm}$ (КЕП-М), кумулативно пуњење средњег калибра $d = 64 \text{ mm}$ (КЕП-С) и кумулативно пуњење великог калибра $d = 120 \text{ mm}$ (КЕП-В), следећих карактеристика:

- Standoff-одстојање: $h = 3$ калибра,
- Експлозивно пуњење: флегматизовани октоген, $\rho_e = 1,75 \text{ g/cm}^3$,
- Метална облога: бакар, $2\alpha = 50^\circ$, $\delta_{ob} \approx 0,02$ кал., $\rho_{ob} = 8,90 \text{ g/cm}^3$, и
- Кошуљица: дуралуминијум, $\delta_{om} \approx 0,025$ кал., $\rho_{om} = 2,75 \text{ g/cm}^3$ [2].

3. ОПИС КОНСТРУКЦИЈЕ САВРЕМЕНИХ РЕАКТИВНИХ ОКЛОПА

3.1 Експлозивни реактивни оклоп *Blazer*

Израелци су први пут у свету применили овакву врсту оклопа под називом *Blazer* за заштиту борбених возила од кумулативних пројектила. Експлозивно пуњење овог оклопа је смештено у металне кутије (касете) које је неосетљиво на дејство стрељачке муниције и артиљеријских пројектила малог калибра (до 30 mm). Поставља се на 50-100 mm испред основног оклопа. Њиме се покривају чеони део оклопног тела тенка, бочне стране и предњи део кровне плоче куполе и бочни противкумулятивни штитници. У свакој касети налази се танко експлозивно пуњење од пластичног експлозива са хексогеном, смештено између две металне плоче дебљине до 3 mm [5].



Слика 9. Експлозивно реактивног оклопа *Blazer* на тенку *M60A1* [5]

Касета се за оклопно тело тенка причвршћује вијцима. Укупна маса експлозивног реактивног оклопа распоређеног на тенку не прелази 1000 kg.

Највећа предност оваквог оклопа јесте у томе да обезбеђује једноставност и лакоћу у руковању, док се у његове недостатке убраја:

- потенцијална опасност за људство које се налази у близини тенка,
- проблем смештаја додатне опреме на тенк која може бити оштећена од детонације,
- могућност померања касета и стварања међупростора, при чему основни оклоп остаје незаштићен,
- проблем заштите од тандем кумулативних пројектила (први млаз иницира пуњење у касети, а други млаз продире кроз основни оклоп тенка) [5].

3.2 Експлозивни реактивни оклоп „Контакт“

Експлозивни реактивни оклоп „Контакт“ развијен је 1978. године и производи се у московском научноистраживачком институту „НИИ Стали“. Усвојен је у наоружање 1983. године. Наменен је за постављање на тенкове или стационарне објекте у циљу повећања заштите од кумулативног дејства. Може се користити за модернизацију тенкова Т-55, Т-62, Т-72 и Т-80. У зависности од тенка, експлозивног реактивног оклопа „Контакт“ формира се од одговарајућег броја експлозивних касета 4С20 (табела 2) [5].

Табела 2. Преглед потребних количина касета и укупне масе ЕРО „Контакт“ [5]

Тенк	Т-55	Т-62	Т-72	Т-80
Маса ЕРО, <i>kg</i>	1750	1750	1200	1750
Количина експлозивних касета	194	211	168	око 200

Применом експлозивног реактивног оклопа „Контакт“ остварује се повећање еквивалентне оклопне заштите тенка, према следећем:

- 400-450 *mm* од кумулативног дејства лаких преносних противоклопних средстава,
- 200-250 *mm* од кумулативног дејства артиљеријских пројектила [5].

3.3 Експлозивни реактивни оклоп „Контакт-5“

Експлозивно реактивног оклопа „Контакт-5“ развијен је у Совјетском Савезу 1985. године. Усвојен је у наоружање 1986. године. Спада у другу генерацију експлозивног реактивног оклопа и представља побољшану верзију експлозивног реактивног оклопа „Контакт“. Касете експлозивног реактивног оклопа „Контакт-5“ су потпуно изменљиве са експлозивног реактивног оклопа „Контакт“ и, што је најважније, и најсавременијим експлозивног реактивног оклопа „Реликт“ [5].



Слика 10. Експлозивно реактивни оклоп „Контакт-5“ на чеоној оклопној плочи тенка Т-72 [1]

Експлозивно реактивни оклоп „Контакт-5“ састоји се од појединачних експлозивних касета 4С22, које се монтирају по ободу оклопног тела и куполе. Димензија сваке касете је $251,9 \times 131,9 \times 13 \text{ mm}$, масе око $1,37 \text{ kg}$. Експлозивно пуњење је масе 280 g (еквивалент тротила износи 0,33).

Експлозивно пуњење се иницира само у контакту са кумулативним млазом, што је изузетно важно по питању безбедности људства које се налазу у непосредној близини оклопа. Експлозивно пуњење касете 4С22 се не може иницирати у следећим случајевима:

- дејством панцирно-запаљивих пројектила калибра $12,7 \text{ mm}$ или мањег,
- дејством ударног таласа у ваздуху или парчадним дејством разорног пројектила, активираних на удаљености већој од 10 m ,
- дејством отвореног пламена или запаљиве смеше на бази напалма.

Век употребе је најмање 10 година. За додатну заштиту тенка Т-72Б потребно је 240 касета 4С22, а тенка Т-90 252 касете. Укупна маса експлозивног реактивног оклопа је око 1500 kg. Еквивалентна заштита од кумулативних пројектила је већа за 1,9-2 пута, а од поткалибарних панцирних пројектила за 1,2 пута [5].

3.4 Експлозивни реактивни оклоп „Реликт“

Експлозивно реактивни оклоп „Реликт“ развијен је у руском „НИИ Стали“ 2006. године и припада трећој генерацију експлозивног реактивног оклопа. У наоружање оружаних снага Руске федерације усвојен је 2006. године. За формирање експлозивног реактивног оклопа „Реликт“ користе се касете 4С23 и 4С24. Предности овог типа експлозивног реактивног оклопа су у следећем:

- 2 пута мањи садржај експлозива за исти ниво заштите од кумулативног дејства,
- већа стабилност експлозива,
- већу ефикасност против тандем кумулативних бојних глава и
- модуларна конструкција, којом се омогућава брза и једноставна замена касета (због оштећења или модернизације) [5].



Слика 11. Упоредни приказ експлозивног реактивног оклопа „Контакт -5“ на тенку Т-90А и експлозивног реактивног оклопа „Реликт“ на тенку Т-90СМ [5]

3.5 Експлозивни реактивни оклоп „Нож“

Експлозивни реактивни оклоп „Нож“ је треће генерације који је развијан у периоду 1997-1998. године, а 2003. године уведен је у оперативну употребу оружане снаге Украјине. Експлозивно реактивни оклоп „Нож“ је развијен са задатком да се превазиђу главни недостаци руског експлозивног реактивног оклопа „Контакт“, као што су велика осетљивост касета на малокалибарске артиљеријске пројектиле и потпунија заштита људства, које се налази у близини борбеног возила у тренутку активирање неке од касета експлозивног реактивног оклопа. Основне предности експлозивног реактивног оклопа „Нож“ су [5]:

- повећана поузданост,
- побољшање ефикасности на заштиту од панцирних пројектила као и од кумулативних пројектила,
- поједностављење и повећање одржавања целог система,
- смањење масе, а самим тим и оптерећење на оклопно тело борбеног возила,
- смањена осетљивост касета експлозивног реактивног оклопа на дејство ударног таласа, насталог услед опаљења из тенковског топа.

Дејство се остварује помоћу мањих линеарних кумулативних млазева („кумулативно сечиво“, „кумулативни нож“).



Слика 12. Изглед пресека касете експлозивног реактивног оклопа „Нож“ [5]

Експлозивно реактивни оклоп „Нож“ формира се од кумулативних касета „ХСЧКВ 19“, димензија $250 \times 125 \times 250 \text{ mm}$, масе $2,8 \text{ kg}$ или „ХСЧКВ 34“ $36 \times 125 \times 26 \text{ mm}$, масе $2,1 \text{ kg}$. Свака касета садржи 7 линеарних кумулативних експлозивних пуњења од преобликоване бакарне цеви дебљине 2 mm са експлозивним пуњењем на бази хексогена, чија је дебљина око 6 mm . Кошуљица касете је дебљине 20 mm , а простор између кумулативних пуњења испуњен је везивним материјалом [5].



Слика 13. Принцип рада експлозивног реактивног оклопа „Нож“ [5]

Услед удара поткалибарног пројектила брзине $1500\text{--}1800 \text{ m/s}$ или кумулативног млаза брзине $6500\text{--}10000 \text{ m/s}$ долази до активирања свих 7 кумулативних пуњења. Настали кумулативни млазеви „секу“ пројектил или кумулативни млаз на више делова [5].

3.6 Експлозивни реактивни оклоп М99

Средином деведесетих година 20. века, по угледу на страна решења, код нас је развијен експлозивни реактивни оклоп, намењен за додатну заштиту модернизованих тенкова Т-55, Т-72 и М84. Августа 1998. године представљен је експлозивно реактивни оклоп, који се формира од касета КАО М99. Употреба овог оклопа у мањој мери умањује покретљивост, али знатно увећава ниво заштите од кумулативних и нешто мање од поткалибарних пројектила. Експлозивно реактивни оклоп није осетљив на дејство отвореног пламена, експлозије суседних касета експлозивног реактивног оклопа или разорних пројектила калибра до 23 mm и на топлотне изворе. Касете КАО М99 се распоређују по чеоним површинама тенка и делимично по бочним странама оклопног тела. Касета КАО М99 је димензија $152 \times 305 \times 65 \text{ mm}$, масе 6 kg , од чега је експлозивно пуњење масе 350 g [5].



Слика 14. Изглед пресека касете КАО М99 (лево) и експлозивног реактивног оклопа М99 на модернизованом тенку Т55 (десно) [5]

Основне карактеристике експлозивног реактивног оклопа КАО М99:

- Модуларне је градње, па се може уградити на све типове тенкова;
- Смањује пробојност кумулативних пројектила до 80% у зависности од калибра пројектила, нападног угла (заштитне карактеристике експлозивног реактивног оклопа се смањују са повећањем нападног угла кумулативног пројектила) и растојања експлозивног реактивног оклопа од основног оклопа.
- Смањује пробојност панцирних пројектила до 25%. Повећава заштиту од поткалибарних панцирних пројектила (енг. *APDS* и *APSFDS*), што га по заштитним карактеристикама сврстава изнад експлозивног реактивног оклопа 1. генерације, као што су израелски BLAZER и руски КОНТАКТ.

Овај тип експлозивног реактивног оклопа је отпоран на дејство муниције калибра до 23 *mm*, парчадног дејства артиљеријских пројектила, затим на детонацију суседних кутија, на вибрације и механичке ударе. Маса читавог комплет КАО М99 је око 750 *kg*, односно 1000 *kg* ако се уграђује и на бочне стране тенка [5].

4. КУМУЛАТИВНИ ПРОЈЕКТИЛИ И ЊИХОВО ДЕЈСТВО НА ОКЛОПНА ВОЗИЛА

Кумулативни ефекат представља прераспodelу и усмеравање енергије експлозије у одређеном правцу и њено концентрисање (фокусирање) на малу површину. То се постиже погодним геометријским обликовањем оне стране експлозивног пуњења, у коју се жели концентрисати енергија експлозије. По правилу, та страна је супротна од стране са које се врши иницирање. Обликовање експлозивног пуњења подразумева израду удубљења у експлозивном пуњењу, које је најчешће симетричног купастог (ређе полулоптастог) облика [4].

Пројектили кумулативног дејства намењени су за пробијање препрека различите структуре и састава и служе за уништавање и онеспособљавање оклопних борбених средстава и армирано бетонских конструкција. Функционални део кумулативног пројектила је кумулативно експлозивно пуњење (КЕП), чији основни елементи су: експлозивно пуњење са облогом кумулативне шупљине и кошуљицом. Генерално посматрано, кумулативно експлозивно пуњење представља затворени систем експлозивне пропулзије [6].

Поред основних елемената, оно садржи и иницијално-детонаторски склоп који је веома важан са становишта оптимизације облика детонационог таласа у експлозивном пуњењу.

Иницијацијом пуњења хемијска енергија експлозивног пуњења се нагло ослобађа и трансформише у топлотну и механичку енергију гасовитих продуката детонације.

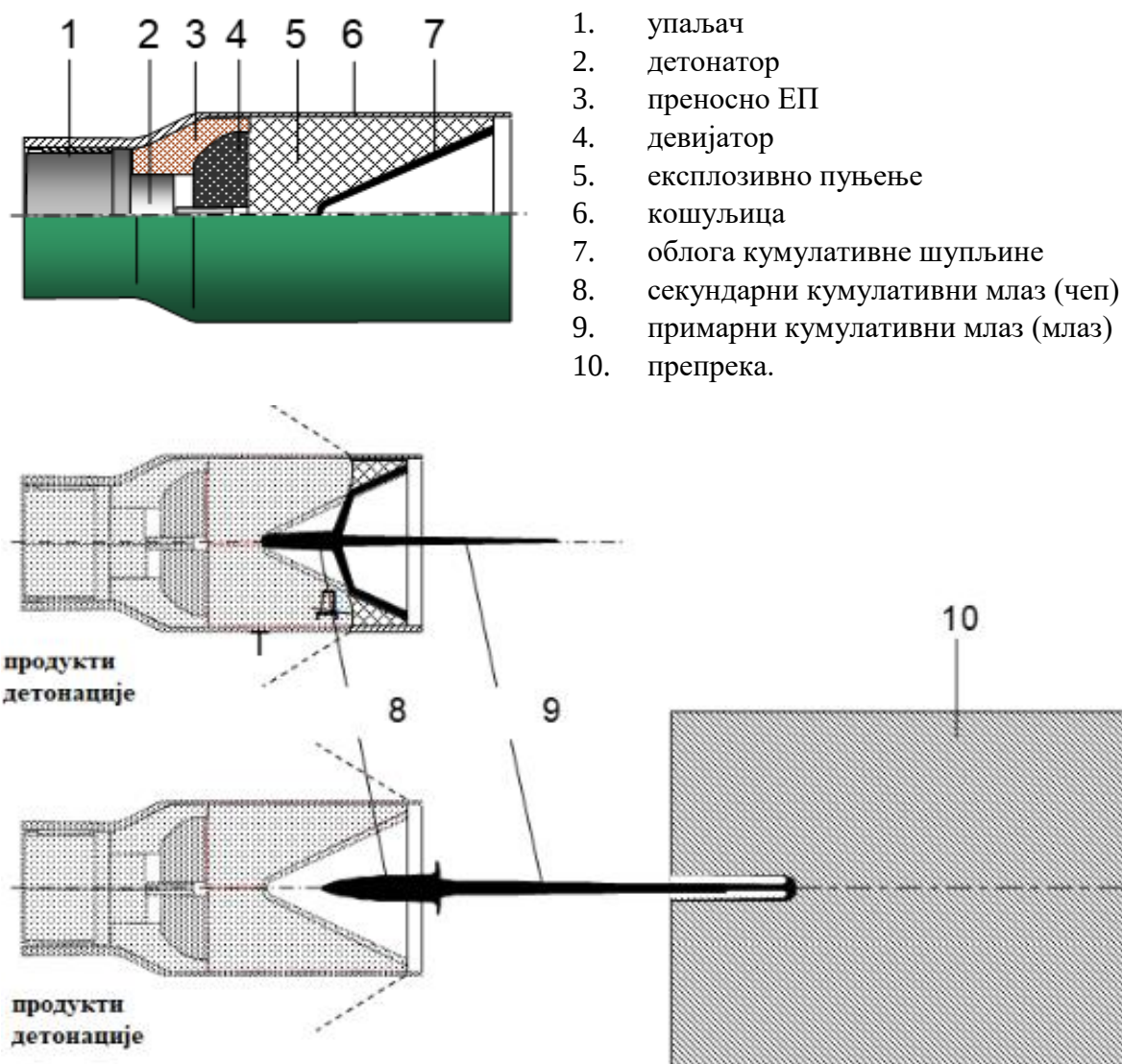
Изложена врло високом притиску и температури, метална облога кумулативне шупљине (ОКШ) поприма својства квази-течног флуида и урушава се ка оси пуњења. При судару оносиметрична струја урушеног материјала облоге дели се на примарни (кумулативни млаз) и секундарни (чеп) кумулативни млаз.

Кумулативни млаз, поред високе густине поседује и огромну брзину, реда неколико хиљада метара у секунди, због чега лако продире кроз препреку и од најквалитетнијег панцирног челика.

Природа кумулативног ефекта, на коме је заснована функција кумулативног пуњења, омогућава да се раде једноставније анализе, разложи на неколико узастопних фаза које се на погодан начин могу третирати независно [6].

Са тог аспекта, кумулативни ефекат чини следеће фазе:

1. Иницијација кумулативног експлозивног пуњења,
2. Ширење (еволуција) детонационог таласа (ДТ),
3. Урушавање облоге кумулативне шупљине под дејством продуката детонације,
4. Судар урушених елемената облоге и формирање кумулативног млаза,
5. Еволуција формираног кумулативног млаза и
6. Продирање кумулативног млаза у препреку [6].

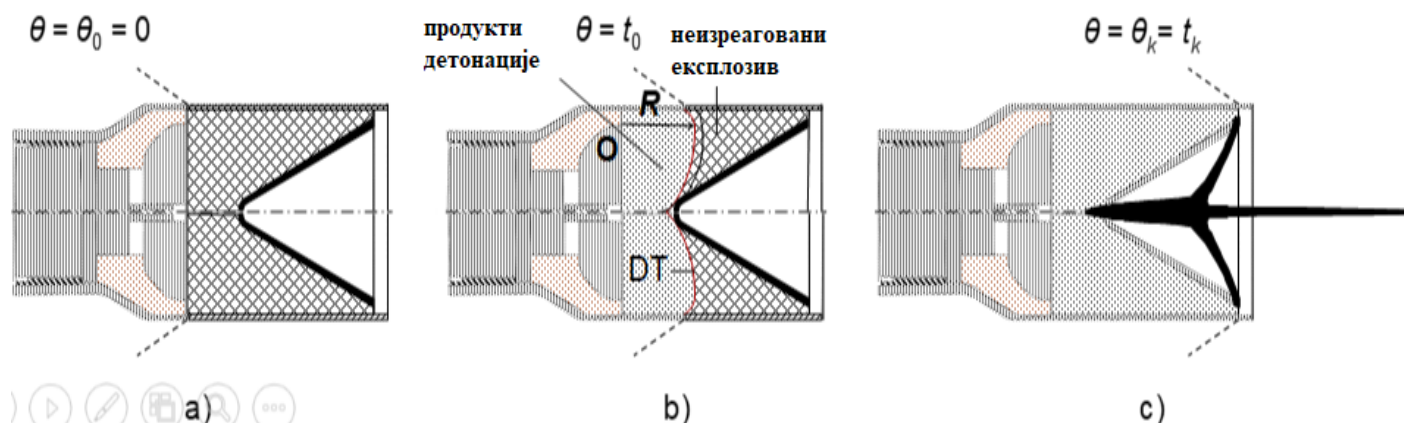


Слика 15. Делови кумулативног пројектила [6]

У анализи кумулативног ефекта иницијација преносног експлозивног пуњења обично бива изостављена, јер нема директног утицаја на сам процес. Супротно томе, иницијација експлозивног пуњења по прстенастој контактної површини има изразит утицај на облик и кретање детонационог таласа у експлозивном пуњењу, а самим тим и на процес кумулације.

Сматра се да је за кумулативно пуњење могуће направити оптимални избор односа конструкционих параметара иницијатора, детонатора, преносног експлозивног пуњења и девијатора чиме су обезбеђени:

- центричност примарне иницијације кумулативно пуњења и
- осна симетричност и потпуност секундарне иницијације кумулативног пуњења [6].



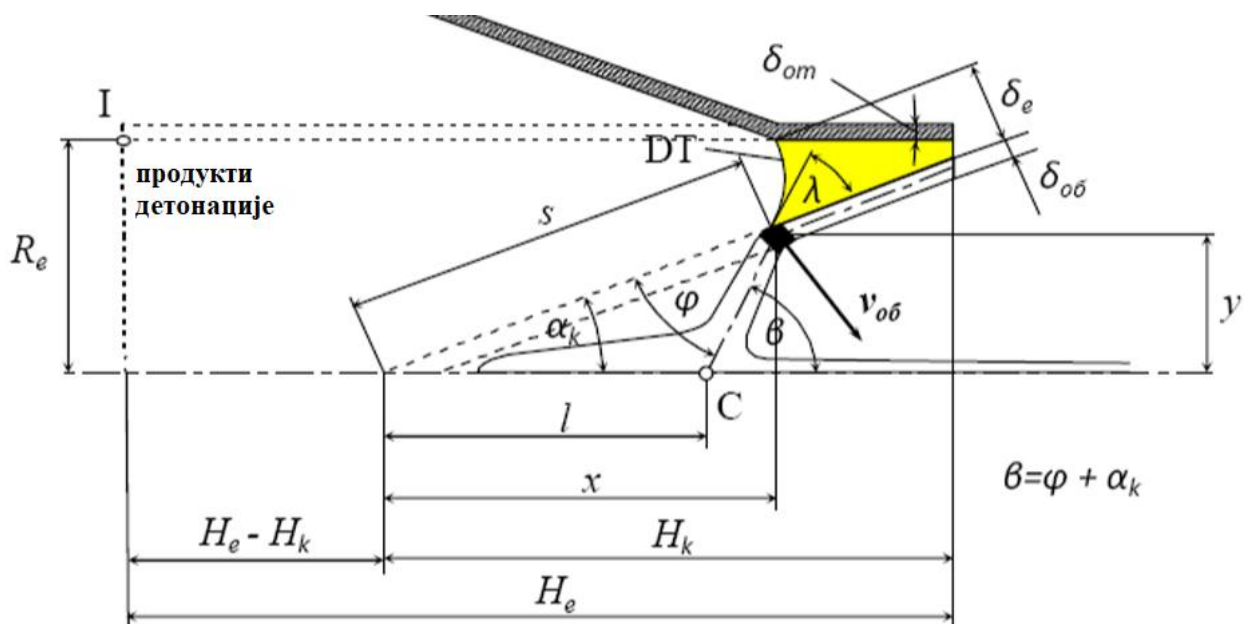
Слика 16. Приказ кумулативног млаза [6]

Фаза ширења (еволуције) детонационог таласа обухвата период од тренутка иницијације експлозивног пуњења до тренутка у коме је комплетно пуњење детонирало. За почетак ове фазе узима се тренутак када је $\Theta_0 = 0$. Карактеристични тренутак у овој фази представља наилазак детонационог таласа (ДТ) на облогу кумулативне шупљине (ОКШ) означен са t_0 , у ком уједно започиње и процес урушавања облоге кумулативне шупљине.

У тренутку $\Theta = \Theta_k = t_k$, када детонира комплетно експлозивно пуњење, завршава се разматрана фаза кумулативног процеса. Облик детонационог таласа током кретања кроз експлозивно пуњење најчешће се одређује апроксимирањем профила детонационог таласа деловима кружнице са центром иницијације у тачки О на периферном делу девијатора.

Урушавање облоге кумулативне шупљине под дејством притиска гасовитих продуката детонације је изразито нестационаран процес, који започиње у тренутку t_0 наиласком детонационог таласа на врх облоге.

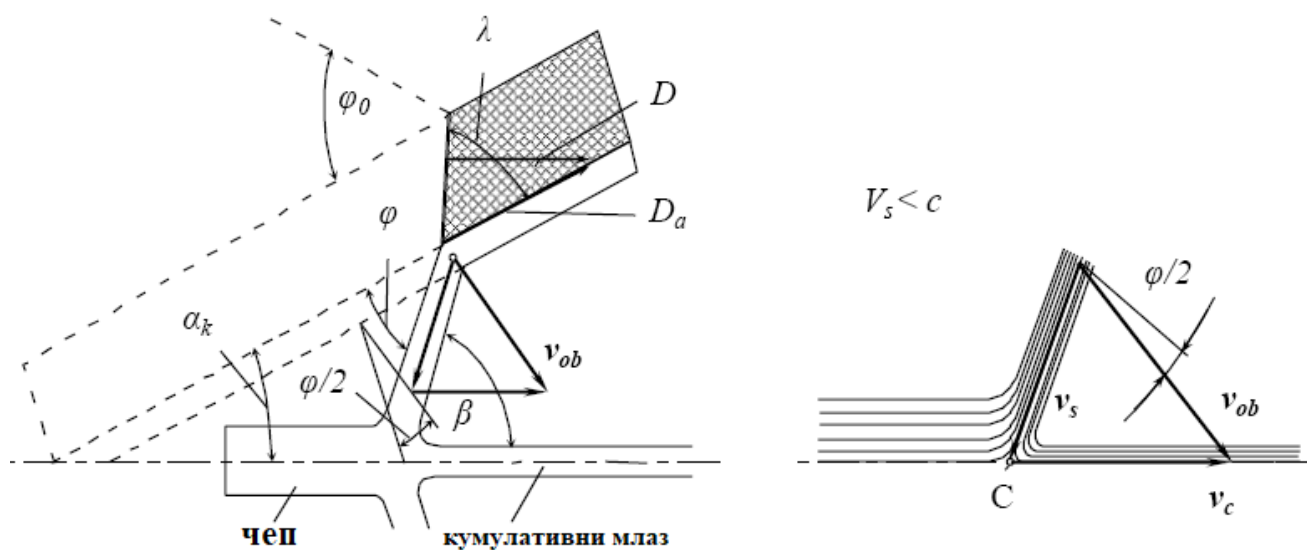
За аналитичко дефинисање ове фазе кумулативног процеса искоришћен је систем једначина дводимензионалне експлозивне пропулзије. Наведени систем једначина омогућава довољно тачно одређивање вредности угла урушавања и брзине урушавања кумулативне облоге, као и положај сваког елемента облоге у функцији времена све до тачке судара на оси кумулативног пуњења [6].



Слика 17. Ширење детонационог таласа и урушавање облоге кумулативне шупљине [6]

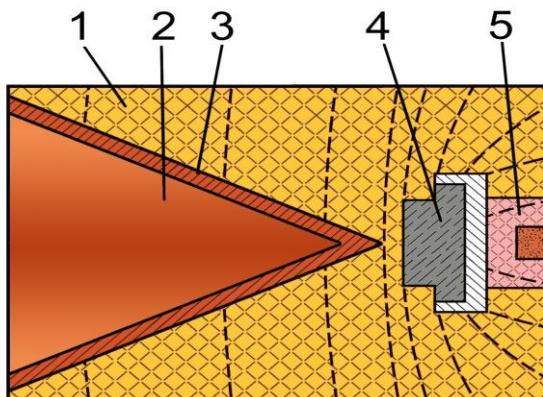
Након урушавања и судара елемената облоге кумулативне шупљине на оси пуњења, сагласно законима о одржању масе, количине кретања и енергије, формирају се примарни и секундарни кумулативни млаз који се, посматрано у координатном систему везаном за тачку C , крећу дуж осе пуњења у истом правцу али у супротном смеру.

Изрази за одређивање брзине, масе и кинетичке енергије кумулативног млаза и чепа изведени су на основу хидродинамичке теорије кумулације за стационаран случај.



Слика 18. Математички приказ [6]

Дејство експлозивног пуњења са кумулативном шупљином може се знатно повећати ако се кумулативна шупљина обложи металом, који се под притиском детонационог таласа деформише и претвара у танак усмерен млаз, тзв. кумулативни млаз. Кумулативни млаз има огромну кинетичку енергију, тако да може пробијати металне препреке велике дебљине (слика 19) [4].

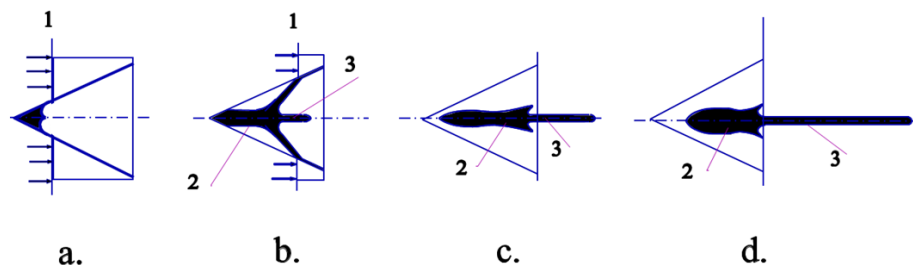


Слика 19. Шематски приказ главних делова кумулативног експлозивног пуњења:
1 – експлозивна материја (ЕМ); 2 – кумулативна шупљина (КШ); 3 – облога кумулативне шупљине (ОКШ); 4 – девијатор; 5 – детонатор. [6]

Намена и главни делови кумулативних експлозивних пуњења:

Детонациони талас (1) креће се кроз експлозивно пуњење према шупљини и захвата металну облогу кумулативне шупљине (слика 20). Под дејством притиска у детонационом таласу долази до сабијања и деформације облоге и до потискивања облоге према оси кумулативне шупљине. После спајања струја на оси кумулативне шупљине, делови облоге формирају јасно уочљива два дела [4]:

- лево од тачке спајања настаје од спољних слојева металне облоге секундарни део млаза (2; тзв. “чеп”),
- десно од тачке спајања формира се од унутрашњих слојева облоге примарни део кумулативног млаза (3).



Слика 20. Ток кумулативног млаза [4]

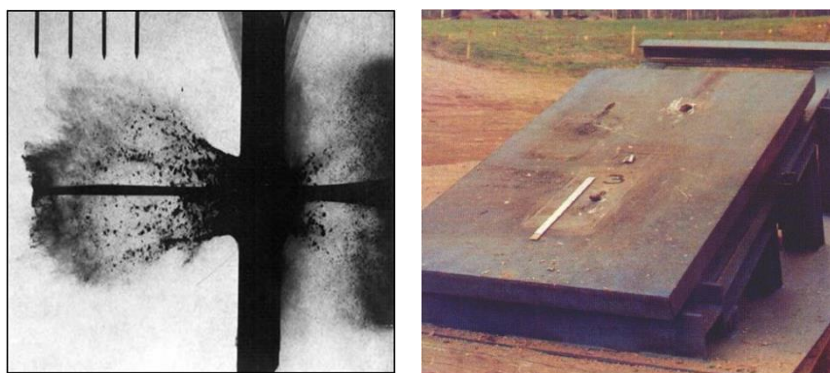
Друга фаза наступа кратко време после сабијања, деформисања и потискивања облоге. Висока пластичност метала веома је повољна, нарочито у току сабијања, деформисања и потискивања облоге.

Због разлике у брзинама секундарног и примарног дела, долази до одвајања примарног од секундарног дела млаза. Може се сматрати да се највећа ефикасност кумулативног експлозивног пуњења са металном облогом постиже у случају ако до одвајања примарног од секундарног дела долази када престане отицање метала из секундарног у примарни део млаза [4].

Ефикасност кумулативног дејства и утицајни параметри:

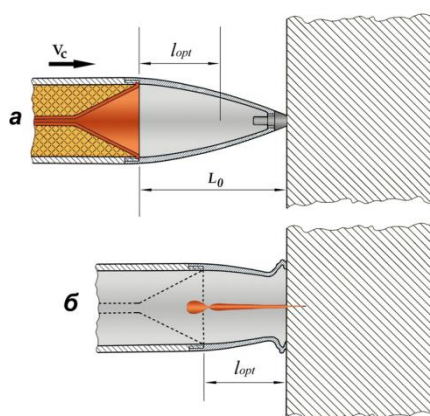
Ефикасност кумулативних пројектила најчешће се изражава преко пробојности одређеног материјала (слика 21). Пробојност се може изражавати на следећи начин:

- у mm хомогеног панцирног челика (ХПЧ), и то под одређеним углом или
- помоћу способности успешног пробијања одређене мете-циља (нпр. једнострука, двострука или трострука НАТО мета и сл.)



Слика 21. Дејство кумулативног млаза о препреку [6]

Пошто се већина кумулативних убојних средстава креће ка циљу (слика 22), дужина предњег дела пројектила L_0 (тј. балистичке капе), мора бити већа од оптималног растојања кумулативног експлозивног пуњења од препреке l_{opt} . Разлика у дужини последица је кретању пројектила током времена реакције упаљача и времена формирања кумулативног млаза.



Слика 22. Приказ удара кумулативног пројектила на препреку [6]

Најчешће се оклопи борбених возила израђују од метала (панцирни челик или дуралуминијум). Пробојност кумулативног експлозивног пуњења је у случају грађевинских материјала већа у односу на челик:

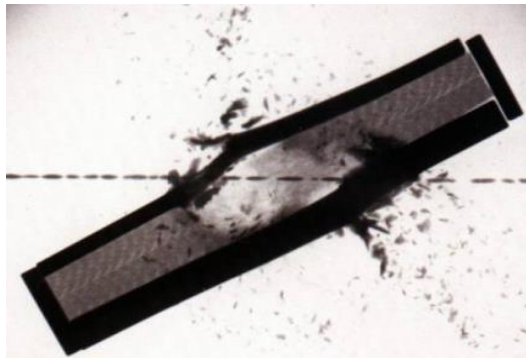
- армирани бетон – око 3 пута;
- камен – око 3-4 пута;
- цигла – око 4 пута;
- глина и сабијена земља – око 5 пута.

Међутим, ако се оклоп изради вишеслојно, где се између металних плоча поставе слојеви материјала велике температуре топљења, густине и тврдоће, пробојност кумулативног експлозивног пуњења значајно опада. Савремена оклопна борбена возила имају вишеслојне оклопе, са унутрашњим слојевима од керамичких материјала, осиромашеног уранијума (амерички тенк M1A1 "Абрамс") и сл.

Нарочиту ефикасност у циљу смањења пробојности кумулативног експлозивног пуњења остварује се употребом тзв. реактивног оклопа. Такав оклоп реагује током пробијања кумулативног млаза, чиме долази до дестабилизације млаза и смањења пробојности.

Реактивни оклоп може бити израђен од бризантне експлозивне материје, и тада се назива експлозивни реактивни оклоп (ЕРО; енг. explosive reactive armour, ERO). Наилазак кумулативног млаза изазива детонацију у експлозивном пуњењу експлозивног реактивног оклопа, због чега долази до одбацивања предње плоче експлозивног реактивног оклопа и ерозије млаза. Поред тога, и струјање продуката детонације врши скретање и кидање млаза.

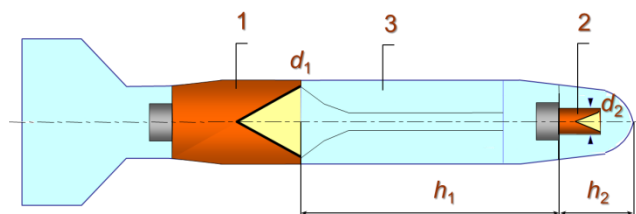
Савремени експлозивно реактивни оклоп за борбена возила израђује се у облику кутија (касета), које се постављају на основни оклоп борбеног возила (слика 23). Експлозија једне кутије експлозивног реактивног оклопа не сме да иницира експлозивно пуњење у суседним кутијама. Основни оклоп мора да издржи напрезања услед експлозије кутије експлозивног реактивног оклопа, због чега није могућа примена на свим возилима [6].



Слика 23. Приказ кутија на борбеном возилу [6]

4.1 Тандем-кумулятивна убојна средства

Кумулативна убојна средства (УБС) са тандем-експлозивним пуњењима (тандем-кумулятивна бојна глава) представљају најсавременија решења (слика 24). Уз високу вредност пробојности ефикасна су и против оклопних циљева опремљених eksploзивним реактивним оклопом. Тандем-кумулятивна бојна глава састоји се од два саосна кумулативна пуњења, основног и кумулативног предпуњења, смештених на одређеном међусобном растојању. Кумулативно предпуњење је смештено у оживалном делу пројектила на растојању 1,5 до 2,0 калибра од врха пројектила ($h_2=(1,5-2,0)d_2$), а основно на растојању 2,0 до 5,0 калибра ($h_1=(2,0-5,0)d_1$) [6].



Слика 24. Ракетни пројектил са тандем кумулативном бојном главом

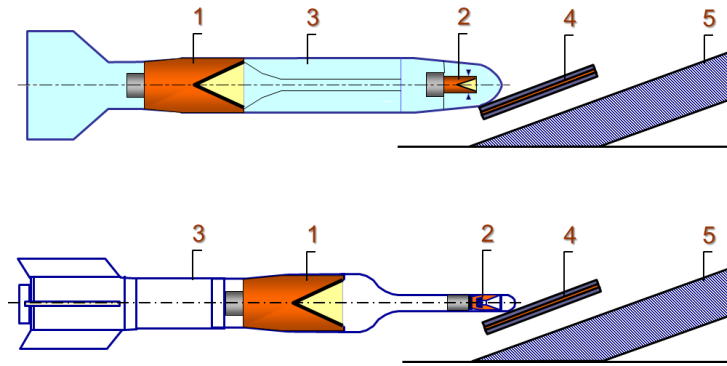
- 1.- Основно кумулативно пуњење;
2.- Кумулативно предпуњење;
3.- Ракетни пројектил [6]

Намена кумулативног предпуњења је да при поготку оклопног циља експлозивног реактивног оклопа, изврши његово активирање, односно неутрализацију. Са овог аспекта високи ниво пробојности није примарни циљ у решавању задатка оптимизације овог пуњења, већ високи степен поузданости активирања експлозивног оклопа. То је разлог што се ово пуњење, према доступним подацима из стране литературе, реализује у калибру $d_2=(25-40)$ mm. Мора да испуни следеће захтеве:

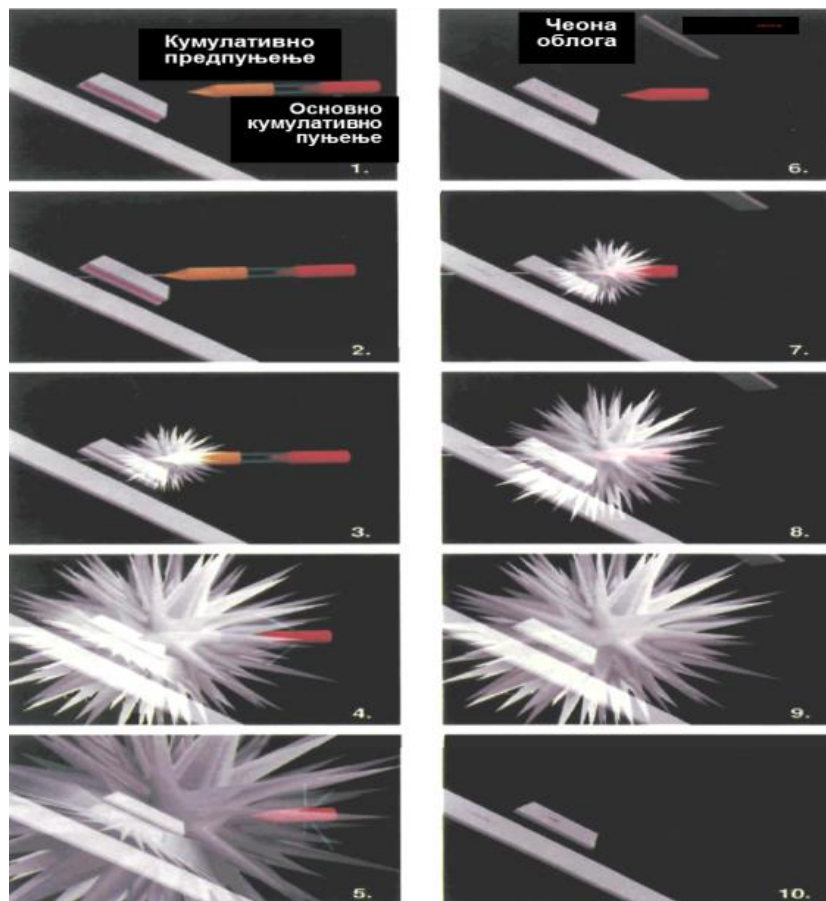
- да пробије најмање 50 mm панцирног челика стандардног квалитета,
- да чело резидуалног дела млаза (након пробијања чеоне облоге оклопа) поседује довољну брзину (мин. 3000 m/s како би се стекли услови за поуздано и потпуно активирање експлозива у експлозивно реактивном оклопу) [6].

Основно кумулативно пуњење активира се са одређеним временским кашњењем, потребним да се активирани елемент експлозивног реактивног оклопа неутралише до те мере, да се не компромитује пробојност пуњења.

Калибар основног пуњења у савременим решењима противоклопних средстава ове врсте износи од 120-160 mm, а маса 3,5 до 4,0 kg. Код савремених противоклопних средстава захтева се да пробојност основног кумулативног пуњења буде најмање 900 mm панцирног челика. Ефикасност основног пуњења у склопу тандем-кумулятивне бојне главе проверава се на препреци опремљеној експлозивним оклопом (слика 25) [6].



Слика 25. 1.- Основно кумулативно пуњење; 2.- Кумулативно предпуњење; 3.- Ракетни пројектил; 4.- Експлозини реактивни оклоп; 5.- Основни оклоп [6]



Слика 26. Типичне фазе у процесу интеракције експлозивног реактивног оклопа и пројектила са тандем кумулативном бојном главом [6]

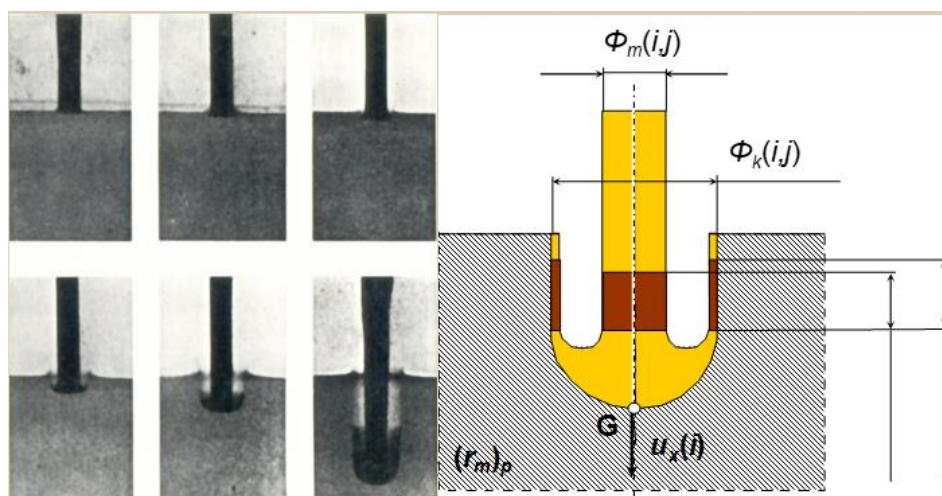
Под еволуцијом кумулативног млаза подразумевају се све промене млаза које се одвијају након формирања млаза (издужење млаза, контракција пресек, кидање млаза) све до наиласка кумулативног млаза на препреку.

Због градијента брзине, посматрано од врха ка репном делу млаза, долази до повећања дужине и смањења попречног пресека (контракција) кумулативног млаза.

Међутим, издужење млаза је ограничено механичким карактеристикама материјала од кога је израђена кумулативна облога, тако да после извесног времена долази до кидања (фрагментације) млаза.

Експериментално је утврђено да до кидања долази при критичној вредности издужења млаза $\delta_{кр}$ (за бакар $\delta_{кр} = 4-5$) и да је разлика брзина суседних фрагмената приближно константна за одређену врсту материјала (за бакар $\Delta v_m \sim 100$ m/s).

Продирање кумулативног млаза кроз препреку се такође, на адекватан начин описује једначинама хидродинамичке теорије кумулације и пенетрације млаза, према којој се, у првом приближењу, механичке карактеристике материјала млаза и препреке потпуно занемарују. На слици је приказан снимак и шематски приказ продирања бакарног млаза брзине $v_m = 1250$ m/s кроз дуралну препреку [6].



Слика 27. Продирање бакарног млаза у дуралну препреку [6]

При разматрању ефикасности пројектила кумулативног дејства полази се од циља ПОБ – по коме непријатељу треба нанети што веће губитке у живој сили и материјалним средствима, и на тој основи учинити га неспособним за даљу борбу. За остваривање тог циља кумулативни пројектили располажу следећим ефектима дејства:

- пробојно дејство,
- дејство иза пробијеног оклопа и
- разорно дејство пројектила [6].

4.2 Пробојно дејство

Основни ефекат кумулативног пројектила на оклопном циљу представља његово пробојно дејство или пробојност, која је дефинисана дужином пробијања у датим условима дејства. Услови у којима кумулативни пројектил испољава своје дејство на оклопном циљу зависе првенствено од места поготка, карактеристика отпорности погођеног места, врсте пројектила, као и од узајамног положаја пројектила и нападнуте површине оклопа. Оцена пробојности неког пројектила за успешно дејство по савременом тенку може се донети само на основу тактичког дијаграма отпорности таквог тенка и на основу података о ефикасности кумулативног пројектила на његовој конфигурацији и квалитету оклопа.

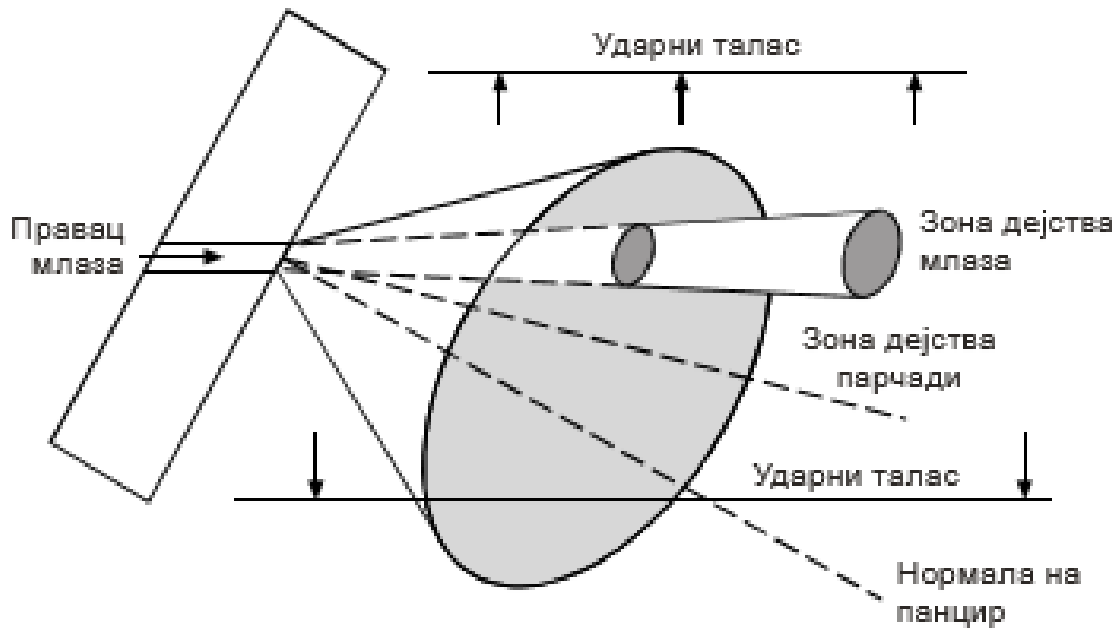
С обзиром на податке о високом проценту уништених тенкова од експлозије горива у њему, постоји велика потреба да се разматра случај појаве експлозије горива при продору кумулативног млаза кроз резервоар са горивом, дакле случај када кумулативни пројектил погоди оклопни циљ, а кумулативни млаз продре кроз оклоп возила у његов резервоар. Стога је за таква разматрања значајнији ефекат иза пробијеног оклопа [1].

4.3 Дејство иза пробијеног оклопа

Дејство кумулативног пројектила иза пробијеног оклопа, оцењује се у односу на учинак тог дејства по посаду возила и унутрашњим елементима као што су: разни агрегати и склопови, мотор и његови уређаји, борбени комплет, резервоари за гориво и др. У случају да при продору кумулативног млаза, кроз оклопно средство, не дође до активирања муниције или паљења горива из резервоара, за неутралисање посаде постоје следећи ефекти дејства кумулативног млаза иза пробијеног оклопа:

- парчадно дејство честица одваљеног метала са унутрашње стране оклопа (тзв. одваљивање) и честица расутог млаза,
- кинетичка енергија преосталог дела кумулативног млаза и чепа,
- надпритисак ударног таласа,
- запаљиво дејство дела млаза и чепа,
- токсично дејство гасова од експлозивног пуњења мине и
- светлосни ефекат.

Механичка оштећења на унутрашњим компонентама оклопног средства настају углавном дејством преосталог дела кумулативног млаза и чепа. Степен тих оштећења зависи првенствено од расположиве енергије млаза и чепа, после пробијања оклопа, и отпорности, односно, осетљивости самог елемента. Шематски приказ зона дејства млаза и парчади одваљеног метала по унутрашњости оклопног средства дат је на слици 28 [1].



Слика 28. Зона дејства млаза и парчади метала у унутрашњости тенка [1]

На слици су јасно уочљиве две зоне. Једна, знатно мања, симетрично распоређена у односу на осу пробоја представља зону дејства кумулативног млаза и чепа. Друга, знатно ширира, представља зону дејства парчади одваљеног метала са унутрашње стране оклопа. Као што се види, ова зона није симетрична у односу на осу пробоја већ је увек закренута у правцу нормале на површину места пробоја.

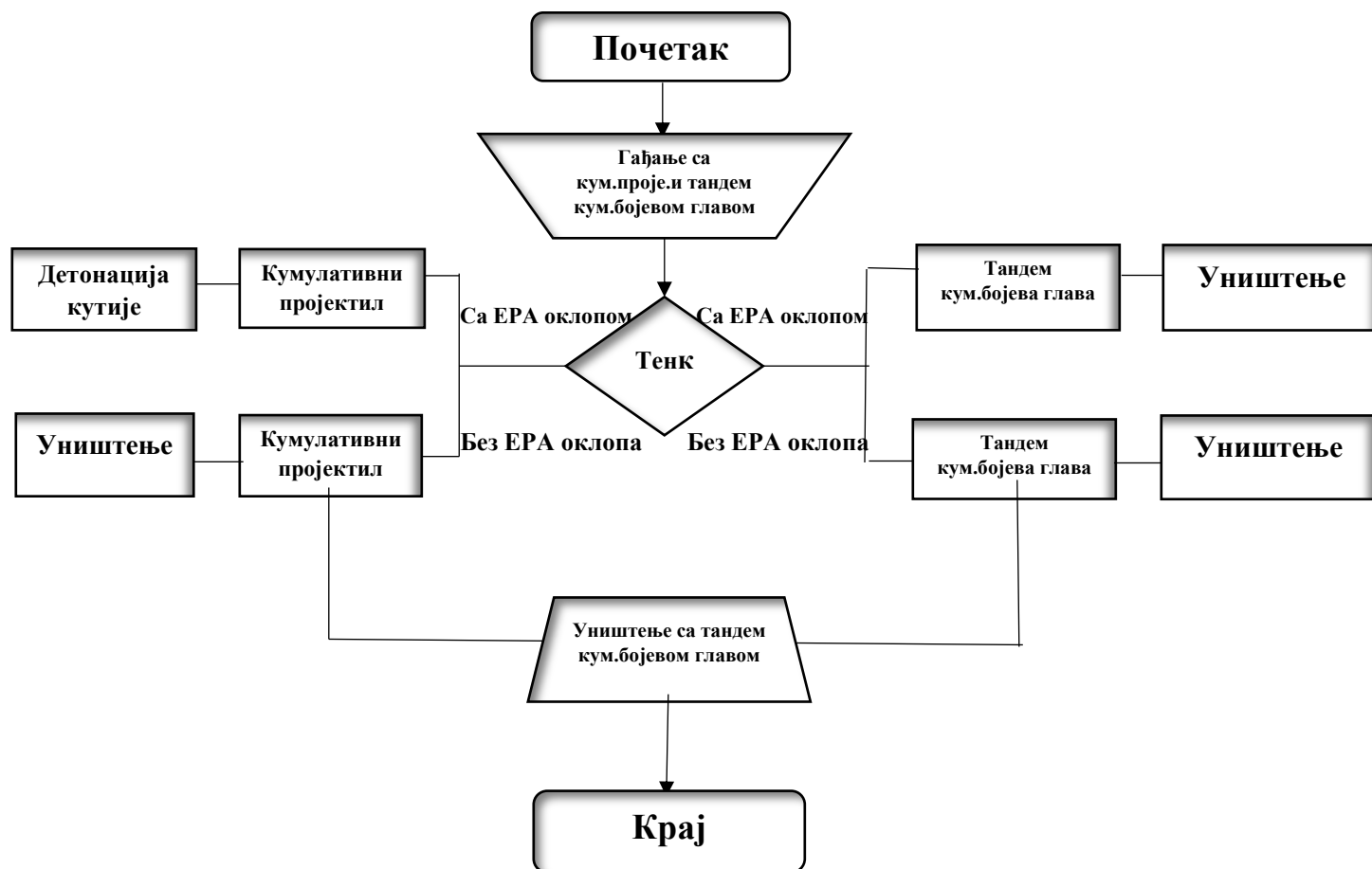
4.4 Разорно дејство

Разорно дејство кумулативног пројектила остварује се дејством продуката детонације експлозивног пуњења у непосредној близини поготка и испољава се у облику парчадно рушећег дејства по елементима циља. Материјални ефекат парчадно рушећег дејства пројектила на циљу зависи углавном од врсте и количине експлозивног пуњења, карактеристика кошуљице пројектила и отпорности циља на месту поготка. Код артиљеријских кумулативних пројектила са масивним челичним кошуљицама присутно је значајно парчадно дејство по осетљивим елементима циља. Насупрот томе кошуљице кумулативних бојевих глава ракетних пројектила израђене су у највећем броју случајева од лаких метала или пластичне масе, па се о ефекту парчадног дејства на оклопним циљевима не може ни говорити [1].

5. ИЗРАДА АЛГОРИТМА И ПОСТАВЉАЊЕ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА

5.1 Алгоритми

У алгоритму који следи је приказано дејство тенка са и без експлозивног реактивног оклопа приликом погодка са кумулативним пројектилом и тандем кумулативном бојевом главом.



Објашњење алгоритма:

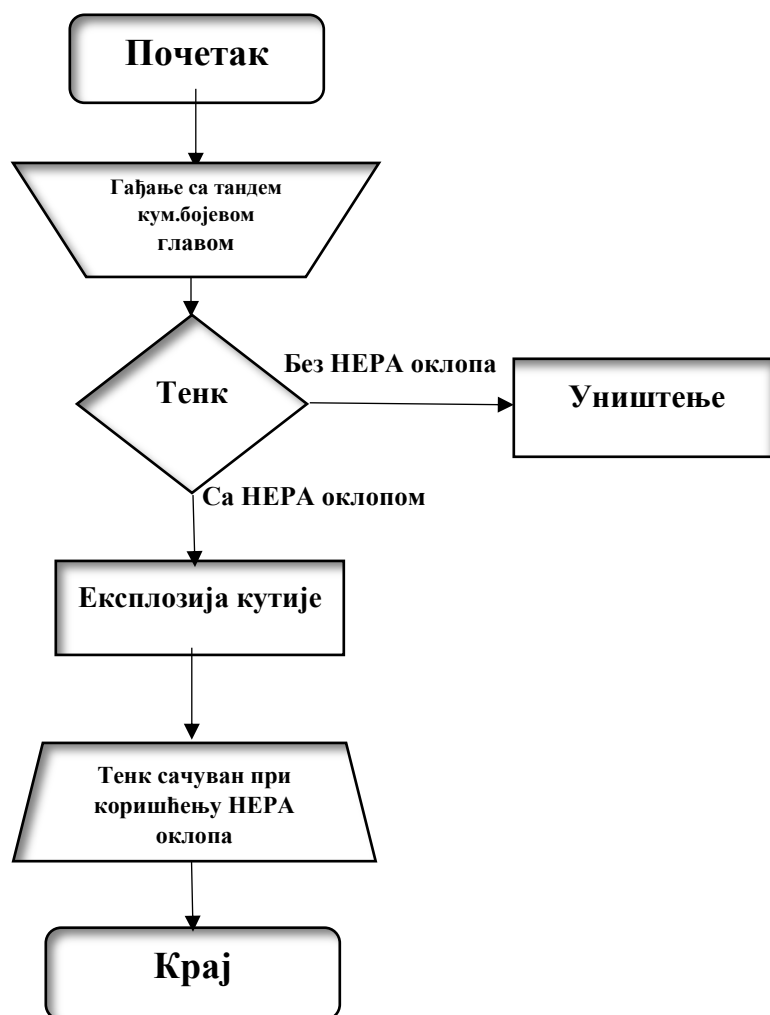
У улазном делу алгоритма је приказано са којим пројектилима се гађа. Гађање се врши са кумулативним пројектилом и са тандем кумулативном бојевом главом. На левој страни алгоритма је приказано дејство кумулативног пројектила на тенк. Тенк може бити са и без ЕРО (експлозивно-реактивни оклоп) оклопа. Приликом погодка кумулативног пројектила у тенк без експлозивног реактивног оклопа долази до уништења тенка, а када се на тенку налази експлозивно реактивни оклоп долази до детонације кутије и спречавања уништења тенка.

На том месту где је кутија детонирала, остаје празан део, па приликом гађања може доћи до поготка те шупљине и уништења тенка али та могућност је веома мала. Пренос детонације са једне на другу кутију је искључена, тј.кутије су тако пројектоване да не може доћи до преноса детонације са једне на другу кутију.

У другом делу алгоритма је приказано гађање тенка са тандем кумулативном бојевом главом. Приликом поготка тенка и са и без експлозивног реактивног оклопа, долази до уништења тенка. Објашњење је у томе што се тандем кумулативна бојева глава састоји од два пуњења. Основно пуњење и кумулативно предпуњење. Кумулативно предпуњење удара у експлозивно реактивни оклоп и уништава га, а основно пуњење се активира са малим кашњењем па зато долази и до пробоја основног оклопа а самим тим и уништења тенка.

У излазном делу алгоритма је приказано да до уништења тенка долази при гађању са тандем кумулативном бојевом главом.

Сада ће бити дат приказ алгоритма са НЕРА (неексплозивно реактивни оклоп) оклопом приликом поготка са тандем кумулативном бојевом главом.



Објашњење алгоритма:

У улазном делу алгоритма је приказано са којим пројектилом се гађа. У овом случају се гађање врши само са тандем кумулативном бојевом главом. Затим можемо видети да приликом погодка у тенк који није обложен са неексплозивним реактивним оклопом долази до уништења, а код тенка који на себи има неексплозивни реактивни оклоп као додатну заштиту неће доћи до уништења већ само до експлозије кутије.

У излазном делу алгоритма види се да ће тенк бити сачуван када на себи има неексплозивно реактивну заштиту.

5.2 Математички модел

Приликом израчунавања математичког модела постављају се два основна питања и то:

1. Шта се прорачунава?

Врши се прорачун параметара детонације експлозивног пуњења, затим прорачун параметара урушавања облоге кумулативне шупљине и на крају прорачун пробојности кумулативног млаза. Прорачунавају се редом:

- Брзина кумулативног млаза и чепа, v_m и v_n ,
- Елементарна маса елемената кумулативног млаза и чепа, dm_m и dm_n ,
- Елементарна кинетичка енергија кумулативног млаза и чепа dE_m и dE_n ,
- Пречници кумулативног млаза ϕ_m и чепа ϕ_n ,
- Брзина предњег, односно задњег пресека млаза,
- Дужина елемента млаза,
- Пречник елемената млаза,
- Коефицијент продирања K_p ,
- Дужина продирања $\Delta P_m(i,j)$,
- Брзина продирања $u_x(i)$ и
- Време продирања $\Delta t(j)$ разматраног елемента кумулативног млаза [8].

2. Како се прорачунава?

Прорачун параметара детонације експлозивног пуњења:

$$D = 125,6 (1 + 0,0013 \rho_0) \varphi^{1/2} \quad (5.1)$$

$$p_{cj} = 24,06 \rho_0^2 \varphi \quad (5.2)$$

$$p_{cj} = 1/4 \rho_0 D^2 \quad (5.3)$$

$$w_{cj} = 1/4 D \quad (5.4)$$

$$a_{cj} = 3/4 D \quad (5.5)$$

$$\rho_{cj} \sim 4/3 \rho_0 \quad (5.6)$$

Прорачун параметара урушавања облоге кумулативне шупљине:

Привидна брзина детонације D_a рачуна се према изразу:

$$D_a = \frac{D}{\sin \lambda} \quad (5.7)$$

Угао слободне експанзије гасовитих продуката детонације φ_0 и коефицијент урушавања се израчунавају на основу израза [6]:

$$\varphi_0 = \lambda + \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \operatorname{arctg} \left(\frac{\kappa}{\sqrt{\kappa^2-1}} \operatorname{tg} \lambda \right)} - 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{\kappa}{\kappa+1} \operatorname{tg} \lambda \right) \quad (5.8)$$

$$K_r = a_r * \lambda^{br} = 0,1165 * \lambda^{-0,9533} \quad (5.9)$$

Лимитни (коначни) угао урушавања облоге кумулативне шупљине рачуна се на основу израза:

$$\frac{1}{\varphi_L} = \frac{1}{\varphi_0} + K_r * \rho_e * \mu_{ob} \quad (5.10)$$

Брзина урушавања сегмента облоге кумулативне шупљине је:

$$v_{ob} = 2 * D_a * \sin \left(\frac{\varphi_L}{2} \right) \quad (5.11)$$

Угао и брзина тачке судара су:

$$\beta = \varphi_L + \frac{\alpha_s + \alpha_u}{2} \quad (5.12)$$

$$v_C = D_a * \frac{\sin(\varphi_L)}{\sin(\beta)} \quad (5.13)$$

Прорачун пробојности кумулативног млаза:

$$v_m = D_a [1 - \cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right)] \quad (5.14)$$

$$v_m = -D_a [1 - \cos \varphi - \sin \varphi \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right)] \quad (5.15)$$

Маса елемента кумулативног млаза и чепа, Δm_m и Δm_n , у збиру су једнаке маси елементарног сегмента кумулативне облоге Δm [6].

$$\Delta m = 2\pi * (d_s - \delta_{ob}) * \delta_{ob} * \Delta x * \rho_{ob} \quad (5.16)$$

$$\Delta m_m = \Delta m * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (5.17)$$

$$\Delta m_n = \Delta m * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (5.18)$$

Кинетичке енергије делова кумулативног млаза и чепа ΔE_m и ΔE_n су:

$$\Delta E_m = \frac{m_m * v_m^2}{2} \quad (5.19)$$

$$\Delta E_n = \frac{m_n * v_n^2}{2} \quad (5.20)$$

Сада је потребно одредити вредности радијуса r_{Mi} у тачкама на крајевима елемента кумулативне облоге [6].

$$r_{Mi} = r_{M0} + \Delta x \tan\left(\frac{\alpha_s}{2}\right) * (i) \quad (5.21)$$

За израчунавање параметара еволуције кумулативног млаза неопходно је одредити координате тачке $x_{M'i}$.

$$x_{M'i} = H_e + h - \left(x_i + \frac{r_{Mi}}{\tan(\gamma)}\right) \quad (5.22)$$

За прорачун параметара еволуције формираног кумулативног млаза потребно је одредити почетну дужину свих елемената млаза [6].

$$\Delta l_{m0}(i) = x_{M'}(i-1) - x_{M'}(i) \quad (5.23)$$

Брзине предњег (v'_m) и задњег (v''_m) пресека посматраног елемента млаза одређене су уз претпоставку линеарне промене брзине млаза између посматраних елемената [6].

$$v'_m(i) = \frac{v_m(i) + v_m(i-1)}{2} \quad (5.24)$$

$$v''_m(i) = \frac{v_m(i) + v_m(i+1)}{2} \quad (5.25)$$

У прорачуну је неопходно увести и време.

$$t_u = \frac{\frac{r_{Mi}}{\cos(\gamma)}}{v_{ob}} \quad (5.26)$$

За одређивање дужине елемента млаза користи се израз:

$$\Delta l_{mG}(i, j = 0) = \frac{\Delta l_{m,0}(i)}{\sum \Delta l_{m,0}(i)} * \Delta l_{m,0}(i, j = 0) \quad (5.27)$$

Одређивање параметара пробијања препреке обухвата коефицијент продирања K_p , дужине продирања $\Delta P_m(i,j)$, брзине продирања $u_x(i)$ и времена продирања $\Delta t(j)$ разматраног елемента кумулативног млаза [6].

Тако је вредност коефицијента продирања K_p једнака:

$$K_p = \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_p}} = \sqrt{\frac{8930}{7850}} \sim 1,07 \quad (5.28)$$

Отали параметри продирања се рачунају на основу следећих једначина:

Дужина продирања $\Delta P_m(i,j)$

$$\Delta P_m(i,j) = K_p \Delta l_m(i,j) = 1,07 * \Delta l_{mG}(i,j) \quad (5.29)$$

Брзине продирања $u_x(i)$

$$u_x(i) = \frac{K_p}{1+K_p} * v'_m(i) = 0,517 * v'_m(i) \quad (5.30)$$

Времена продирања $\Delta t(j)$

$$\Delta t(j) = \frac{\Delta P_m(i,j)}{u_x(i)} \quad (5.31)$$

За потребе овог рада извршена је симулација и прорачун за две различите врсте експлозива:

За прву врсту експлозива изабран је тротил.

Потребно је израчунати параметре урушавања металне кумулативне облоге кумулативног пуњења бојне главе калибра 64 mm. Експлозивно пуњење је иницирано по кружној линији смештеној на периферији његове задње површине (крајња периферна тачка експлозивног пуњења). Еволуција детонационог таласа је у виду концентричних кругова. За израчунавање брзине урушавања кумулативне облоге користи се Рихтеров метод [6].

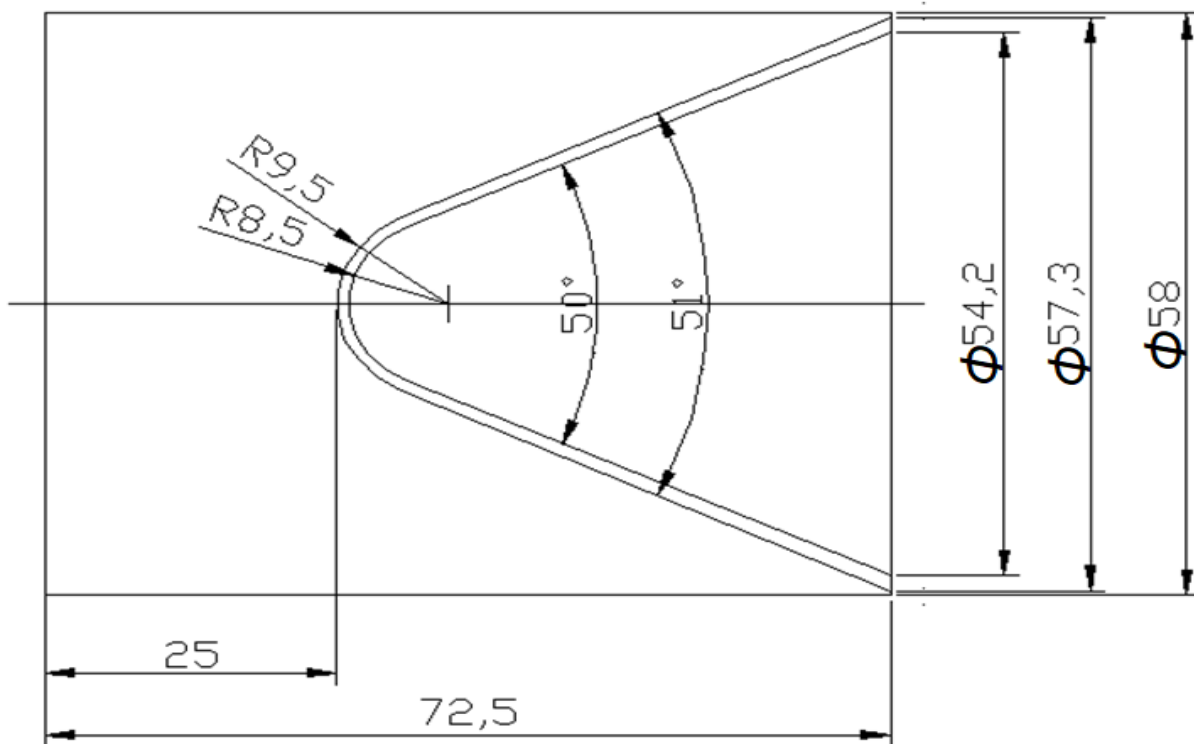
Поред конструкционог цртежа облоге кумулативне шупљине, потребни су и следећи подаци:

- Калибар: **d = 64 mm**
- Експлозивно пуњење: **ТН60 (40% тротила и 60% хексогена)**

подаци за тротил: ($C_7H_5N_3O_6$; $M_t = 227,13 \text{ g/cm}^3$; $dHf_T^0 = -46,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)

- Средња густина експлозивног пуњења: **$\rho_e = 1,52 \text{ g/cm}^3$**
- Висина експлозивног пуњења: **$H_e = 72,5 \text{ mm}$**
- Кумулативна облога: **електролитички бакар, $\rho_{ob} = \rho_m = 8,93 \text{ g/cm}^3$**
- Коефицијент издужења кумулативног млаза: **$\xi = 4,0$ ($\xi = 400\%$)**
- Унутрашњи угао кумулативне облоге: **$\alpha_u = 50^\circ$**

- Спољни угао кумулативне облоге: $\alpha_s = 51^\circ$
- Унутрашњи радијус врха кумулативне облоге: **8,5 mm**
- Спољни радијус врха кумулативне облоге: **9,5 mm**
- Растојање кумулативног експлозивног пуњења од препреке (Stand off): **h = 3 kal.**



Слика 29. Конструкциони цртеж

Прорачун параметара детонације ЕП

Прорачун параметара детонације експлозивног пуњења врши се Камлетовом методом. Еквивалентна хемијска формула тротила је:



Брзина и притисак детонације једнаки су:

$$D = 125,6 (1 + 0,0013 \rho_0) \varphi^{1/2} = 7388 \text{ m/s}$$

$$p_{cj} = 24,06 \rho_0^2 \varphi = 390,62 \text{ kbar}$$

$$p_{cj} = 1/4 \rho_0 D^2 \sim 207,39 \text{ kbar}$$

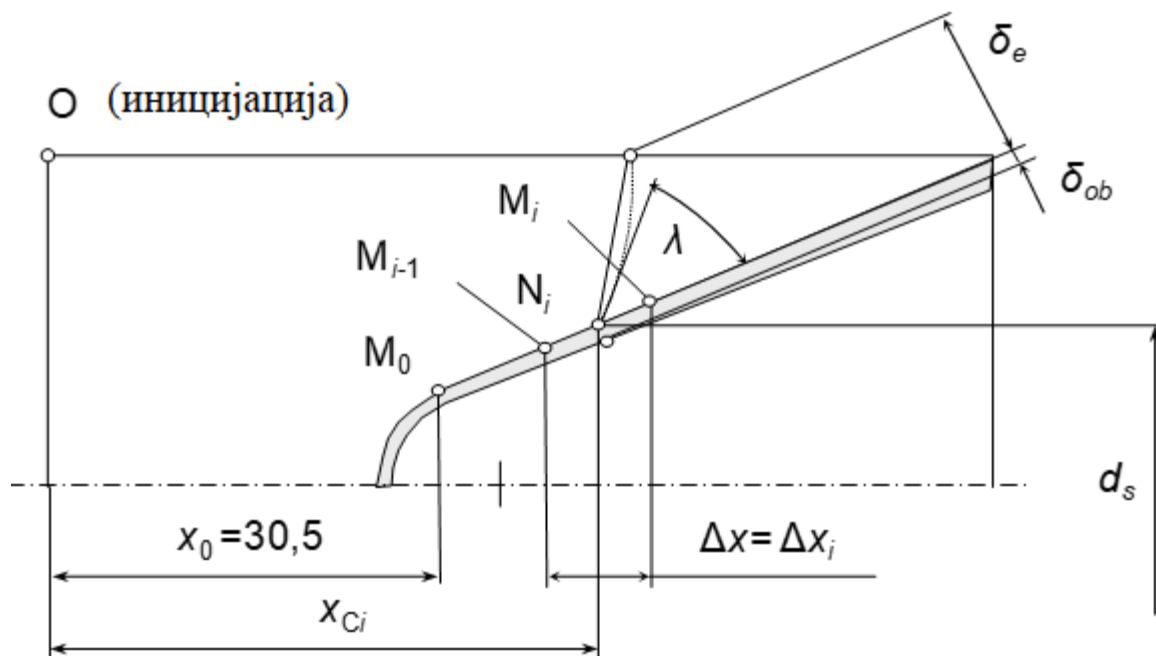
$$w_{cj} = 1/4 D \sim 1847 \text{ m/s}$$

$$a_{cj} = 3/4 D \sim 5541 \text{ m/s}$$

$$\rho_{cj} \sim 4/3 \rho_0 \sim 2,03 \text{ g/cm}^3$$

У циљу одређивања параметара урушавања кумулативне облоге извршена је њена дискретизација на седам једнаких делова висине 6 mm, почев од тачке $M_0(x_0; y_0) = M_0(30,5; 8,6)$.

Полазни параметри урушавања $\delta_e(i)$, $\delta_{ob}(i)$ и $\lambda(i)$ су одређени на половини сваког сегмента од $i = 1-7$ са аксијалном координатом $x_c(i)$. Заобљени део облоге кумулативне шупљине неће се разматрати, јер има занемарљив утицај. [6]



Слика 30. Приказ параметара [6]

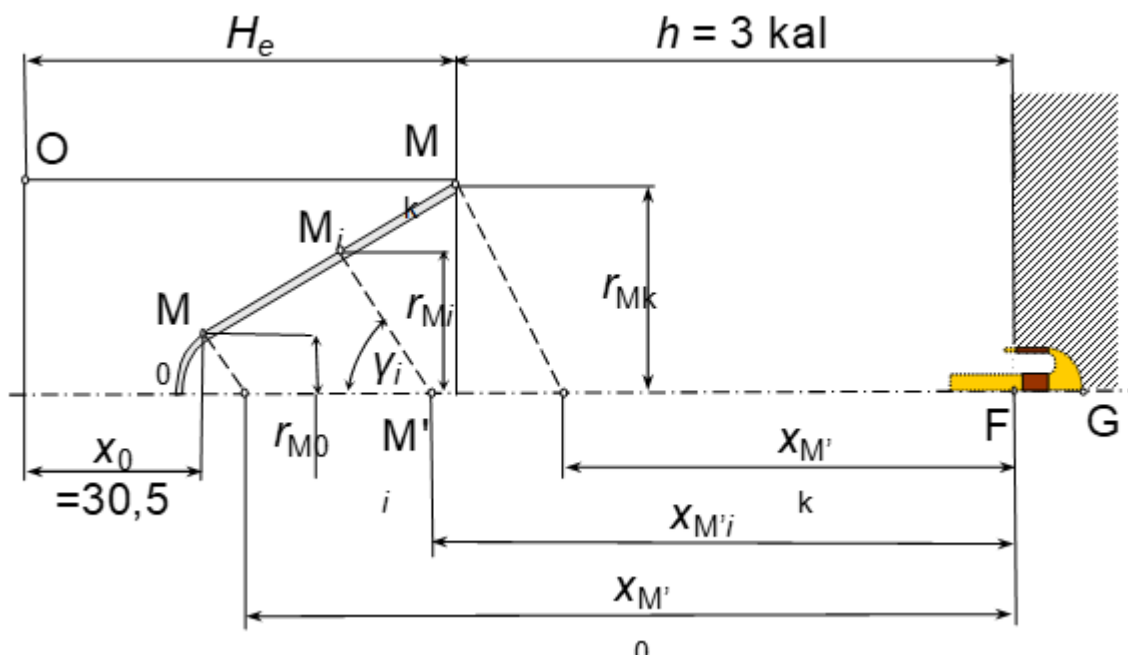
На основу горе наведених једначина добијају се следећи резултати:

Табела 3. Резултати прорачуна брзине, масе и кинетичке енергије примарног и секундарног кумулативног млаза

Ред.број i	V_m	V_n	Δm	Δm_m	Δm_n	ΔE_m	ΔE_n
-	-	°	m ³ /kg	°	m/s	°	m/s
1.	8918	3442	6,59	1,99	4,60	79,133	27,249
2.	8631	3697	9,10	2,80	6,30	104,292	43,054
3.	8069	3577	11,70	3,55	8,15	115,568	52,139
4.	7647	3438	14,47	4,20	10,27	122,801	60,695
5.	7316	3308	17,66	4,95	12,72	132,472	69,597
6.	6734	2904	21,08	5,12	15,96	116,088	67,294
7.	5555	2093	24,55	5,11	19,44	78,842	42,580
Σ			105,16	27,72	77,44	749,196	362,608

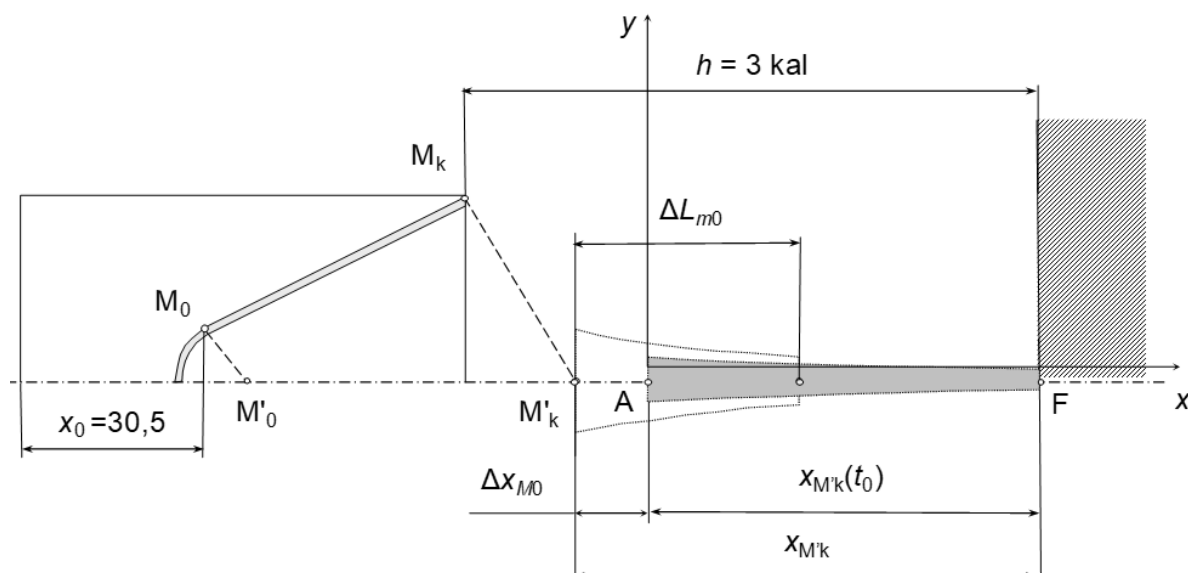
Након урушавања облоге кумулативне шупљине долази до еволуције кумулативног млаза током кретања до препреке. Најпре је потребно одредити растојање од основне облоге кумулативне шупљине до препреке:

$$h = 3 \cdot d \text{ mm} = 192 \text{ mm}$$

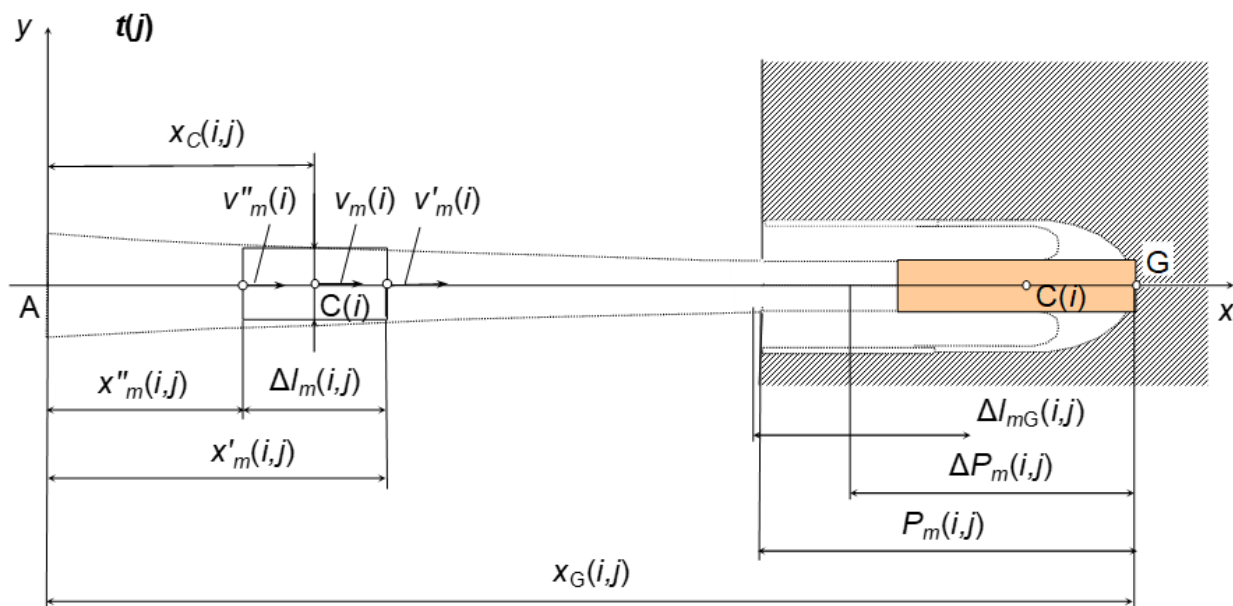


Слика 31. Приказ вредности [6]

На основу до сада израчунатих параметара може се приступити одређивању положаја и дужине кумулативног млаза у тренутку када врх стигне до препреке.



Слика 32. Шематски приказ положаја кумулативног млаза у тренутку удара у препреку [6]



Слика 33. Шематски приказ кумулативног млаза током еволуције и продирања кроз препреку [6]

Табела 4. Резултати прорачуна параметара еволуције и продирања примарног кумулативног млаза за коначан тренутак $t = 71,44 \mu s$

Ред.број i	$\Delta l_{mG}(i, j - 1)$	$\Delta l_{mG}(i, j)$	$\Delta P_m(i, j)$	$P_m(i, j)$	$u_x(i)$	$\Delta t(j)$	$t(j)$
-	mm	mm	mm	mm	m/s	μs	μs
0.	-	-	-	-	-	-	-
1.	-	-	27,07	27,07	4711	5,75	5,75
2.	-	-	33,63	60,70	4663	7,21	12,78
3.	-	-	39,45	100,15	4362	9,04	21,82
4.	-	-	49,99	150,14	4147	12,05	33,87
5.	-	-	77,77	227,91	3920	19,84	53,71
6.	-	-	29,62	257,53	3836	7,72	61,43
7.	26,94	26,94	28,83	286,36	2880	10,01	71,44

Након извршеног прорачуна за тротил добијено је да је дужина пробијања кумулативног експлозивног пуњења 286,36 mm а време продирања 71,44 μs . Што значи да се нормална пробојност од 300 mm хомогеног панцирног челика може смањити за 4,5%.

За други експлозив изабран је октоген.

- Експлозивно пуњење: Флегматизовани октоген (FO-3S)
- Средња густина експлозивног пуњења: $\rho_e = 1,75 \text{ g/cm}^3$

Еквивалентна хемијска формула октогена је:



Брзина и притисак детонације једнаки су:

$$D = 125,6 (1 + 0,0013 \rho_0) \varphi^{1/2} = 8578 \text{ m/s}$$

$$p_{cj} = 24,06 \rho_0^2 \varphi = 320,43 \text{ kbar}$$

Брзина детонације октогена флегматизованог са 3% свит-воска чији су масени удео и Иризаров коефицијент $s_a = 0,03$ и $U_a = 6910 \text{ m/s}$, једнака је:

$$D_{F03S} = s_0 * D_0 + s_{SV} * U_{SV} \sim 8528 \text{ m/s}$$

$$p_{cj} = 1/4 \rho_0 D^2 \sim 318,18 \text{ kbar}$$

$$w_{cj} = 1/4 D \sim 2132 \text{ m/s}$$

$$a_{cj} = 3/4 D \sim 6396 \text{ m/s}$$

$$\rho_{cj} \sim 4/3 \rho_0 \sim 2,33 \text{ g/cm}^3$$

Табела 5. Резултати прорачуна брзине, масе и кинетичке енергије примарног и секундарног кумулативног млаза

Ред.број i	V_m	V_n	Δm	Δm_m	Δm_n	ΔE_m	ΔE_n
-	-	°	m ³ /kg	°	m/s	°	m/s
1.	10689	4248	6,59	2.74	3.85	156,530	34,738
2.	9902	4217	9,10	4.09	5.01	200,511	44,547
3.	9317	4131	11,70	5.29	6.21	229,603	52,987
4.	8815	3962	14,47	6.89	7.58	267,691	59,493
5.	8441	3814	17,66	8.45	9.21	301,033	66,987
6.	7774	3352	21,08	9.60	11.48	290,088	64,494
7.	6412	2417	24,55	9.56	14.99	196,524	43,785
	Σ		105,16	46.62	58.33	1641,98	367,031

Табела 6. Резултати прорачуна параметара еволуције и продирања примарног кумулативног млаза за коначан тренутак $t = 68,15 \mu s$

Ред.број i	$\Delta L_{mG}(i, j - 1)$	$\Delta L_{mG}(i, j)$	$\Delta P_m(i, j)$	$P_m(i, j)$	$u_x(i)$	$\Delta t(j)$	$t(j)$
-	mm	mm	mm	mm	m/s	μs	μs
0.	-	-	-	-	-	-	-
1.	-	-	27,07	27,07	4811	5,62	5,62
2.	-	-	33,63	60,70	4864	6,91	12,53
3.	-	-	39,45	100,15	4553	8,66	21,19
4.	-	-	49,99	150,14	4340	11,52	32,71
5.	-	-	77,77	227,91	4058	19,16	51,87
6.	-	-	29,62	257,53	4191	7,07	58,94
7.	33	33	35,31	292,84	3833	9,21	68,15

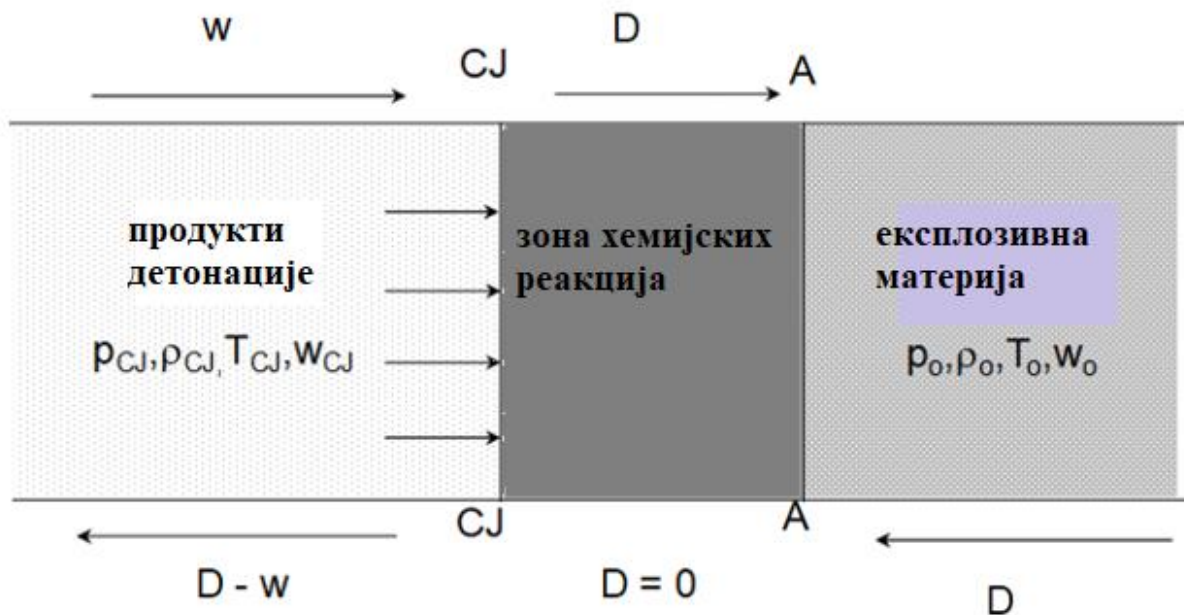
Након извршеног прорачуна за октоген добијено је да је дужина пробијања кумулативног експлозивног пуњења 292,84 mm а време продирања 68,15 μs . Што значи да се нормална пробојност од 300 mm хомогеног панцирног челика може смањити за 2,4%. Када се упореде ова два експлозива може се закључити из добијених резултата да је пробојност код октогена већа зато што је октоген јачи експлозив, самим тим је и време продирања код октогена мање него код тротила.

5.3 Простирање ударног таласа и реакција основног оклопа приликом активирања експлозивног реактивног оклопа

Детонација је ужи појам од експлозије и представља процес надзвучног простирања фронта хемијских реакција кроз експлозивну материју помоћу ударног таласа.

Простире се ударним таласом, брзина процеса је надзвучна, гасовити продукти се крећу у смеру кретања фронта хемијских реакција и не зависи од спољних услова. [3]

Детонациони талас се састоји из ударног таласа и зоне хемијских реакција.



Слика 34. Поједностављена шема детонације [3]

D – брзина детонације, која је једнака брзини кретања зоне хемијских реакција,

w – брзина продуката детонације који се крећу за фронтом таласа,

$p_{CJ}, \rho_{CJ}, T_{CJ}$ – параметри стања у Чепмен-Жугеовој равни (иза зоне хемијских реакција)

p_0, ρ_0, T_0 – параметри стања испред зоне хемијских реакција,

U_{CJ} – унутрашња енергија продуката детонације иза зоне хемијских реакција,

U_0 – унутрашња енергија полазне материје,

Q_v – унутрашња енергија, односно топлота експлозивног разлагања. [3]

У шематској представи идеалне детонације (Слика 34) раван талас А-А простире се у експлозивној средини константном брзином V_D , праћен зоном униформне дебљине којој се одиграва хемијска реакција (експлозивна средина прелази у гасовите продукте реакције). Зона хемијских реакција завршава се у равни А'-А', паралелно равни А-А, која се назива раван Champan-Jougeuet. У овој равни разлагање експлозивне средине је завршено. [3]

Поставља се питање како то да детонација једне кутије експлозивног реактивног оклопа се не преноси на друге кутије и ако су оне на малом растојању?

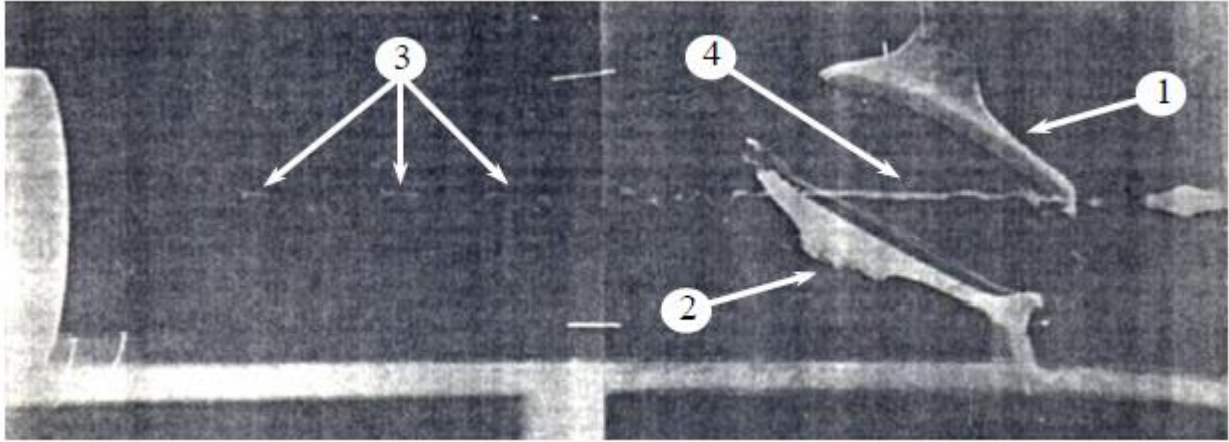
Одговор на то питање је то да кутија има усмерено дејство само у једном правцу, и зато не долази до ширења детонације и преноса детонације са једне на другу кутију.

Такође, основни оклоп који се налази иза експлозивно реактивног оклопа при гађању са кумулативним пројектилом остаје заштићен, зато што у интеракцији са кумулативним млазом долази до интензивне деструкције и ерозије млаза тако да се пробојност млаза иза експлозивног реактивног оклопа драстично смањује.

При вредности нападног угла кумулативног млаза $\alpha_j = 90^\circ$ струјна слика у пољу детонације експлозивно реактивног оклопа је још увек оносиметрична, јер се поклапају и оса симетрије кумулативног млаза и оса симетрије процеса експлозивне пропулзије иницираног експлозивног оклопа. Супротно томе, распоред притиска по површини кумулативног млаза у зони поља детонације при малим вредностима угла α_j ствара обртни момент око тачке иницијације у равни дефинисаној осама симетрије млаза и активiranог оклопа, што има за последицу савијање, кидање и пертурбације млаза.

На рендгенском снимку (Слика 35) могу се уочити негативни ефекти дејства експлозивног реактивног оклопа на кумулативни млаз при вредности нападног угла $\alpha_j = 45^\circ$. Оно што се може констатовати на основу овог снимка је следеће [2]:

- све аномалије на резидуалном делу кумулативног млаза који је прошао кроз експлозивно реактивни оклоп (дестабилизација, савијање, кидање) су последица гасодинамичког дејства продуката детонације и контакта са покретним облогама,
- део млаза изложен ерозивном дејству експлозивног оклопа (статичка и кинематска ерозија) утроши се током продирања млаза кроз покретне металне облоге, а последица искључиво овог вида дејства се манифестује кроз смањење дужине резидуалног дела млаза.
- чеони део млаза ("глава" млаза) због инерције процеса иницијације експлозива у оклопу неометано пролази кроз експлозивно реактивни оклоп, и ова дужина је пропорционална његовој брзини,
- иза "главе" млаза крећу се разбијени делови млаза изложени утицају покретних облога и гасодинамичком дејству које временом слаби и
- након одређеног времена, због експанзије гасовитих продуката детонације у околни простор, гасодинамички утицај постаје занемарив што се испољава кроз неометано кретање дела млаза између металних облога, који остаје непоремећен иако се налази у зони центра детонације експлозивног пуњења. [2]



Слика 35. Рендгенски снимак [2]

Математичко моделовање и нумеричка симулација процеса интеракције кумулативног млаза и експлозивног реактивног оклопа има велики значај у оцени утицаја сигнификантних параметра на његову функцију и избору оптималних вредности параметара конструкције у фази пројектовања. Процедуром математичког моделовања функције експлозивног реактивног оклопа обухваћени су гасодинамичко дејство продуката детонације и кинематска ерозија млаза на покретним облогама оклопа. Њихов комбиновани утицај изазива пад резидуалне пробојности P_r , која је знатно мања од номиналне пробојности кумулативног пуњења P_{nom} . Под појмом резидуалне пробојности P_r подразумева се дужина пробијања кумулативног пуњења на основном оклопу након проласка млаза кроз експлозивно реактивни оклоп. Због деструктивног дејства активiranог експлозивног реактивног оклопа резидуална пробојност је знатно мања од номиналне пробојности P_{nom} [2].

Интеракција експлозивног реактивног оклопа и кумулативног пројектила

Деструктивно дејство експлозивног реактивног оклопа на кумулативно пуњење, како је напред наглашено, последица је утицаја:

- Статичке ерозије кумулативног млаза (пад пробојности за ΔL_p^s),
- Кинематска ерозија кумулативног млаза (пад пробојности за ΔL_p^k и
- Гасодинамичко дејство продуката детонације у експлозивно реактивном оклопу на кумулативни млаз (пад пробојности за ΔL_p^g) [2].

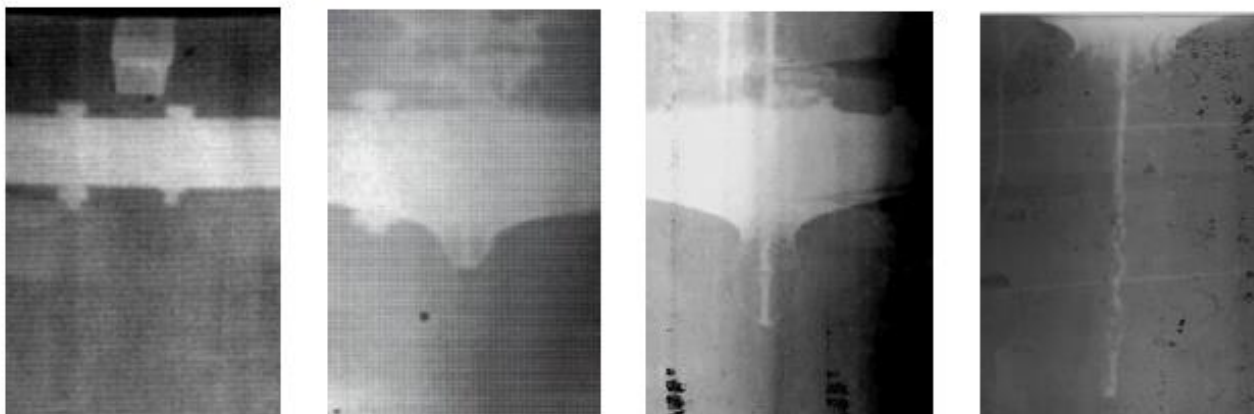
Одавде је укупни пад пробојности млаза једнак:

$$\Delta L_p = \Delta L_p^s + \Delta L_p^k + \Delta L_p^g \quad (5.32)$$

У коначном, укупни пад пробојности млаза изазван дејством експлозивног реактивног оклопа није прост збир сва три наведена утицаја. Тачан прорачун пада пробојности, односно резидуалне пробојности, није могућ без примене рачунара и одговарајућег програмског решења добијеног на основу извршеног математичког моделовања.

Статичка ерозија се одвија на непокретним слојевима (чеона плоча, слој експлозива, задња плоча) и одређује се применом хидродинамичке теорије продирања млаза, док се остали негативни утицаји морају детаљније анализирати [2].

За разлику од класичних оклопа код којих се, захваљујући високој механичкој отпорности оклопа и његовој нехомогеној структури, зауставља и дестабилише кумулативни млаз, код експлозивног реактивног оклопа се заштитни ефекат остварује на принципу гасодинамичке деструкције и кинематске ерозије млаза које настају при детонацији активiranог експлозивног пуњења у том оклопу. Захваљујући наведеним ефектима експлозивни реактивни оклоп, посматрано по јединици масе, има вишеструко већу ефикасност у поређењу са класичним оклопом [2].



Слика 36. Ефекат гасодинамичког утицаја експлозивног реактивног оклопа на кумулативни млаз при проласку млаза кроз експлозивни слој (рендгенски снимци) [2]

Како релативна промена резидуалне пробојности у односу на калибар не даје довољно поуздану оцену ефикасности експлозивног оклопа uveden је појам нивоа заштите експлозивног оклопа NZEO:

$$NZEO = \left(1 - \frac{P_r}{P_{nom}}\right) 100 [\%] \quad (5.33)$$

Ниво заштите експлозивног оклопа представља практичну и меродавну оцену ефикасности оклопа, јер омогућава тачнију квалитативну класификацију експлозивног реактивног оклопа различите ефикасности [2].

Дебљина чеоне облоге

Анализа утицаја дебљине чеоне облоге експлозивног оклопа δ_f на ефикасност експлозивног оклопа извршена је за случај централно погођеног експлозивног оклопа са експлозивним пуњењем дебљине 8 mm. Резултати нумеричке симулације утицаја дебљине чеоне облоге на резидуалну пробојност кумулативног млаза P_r за вредности нападаног угла млаза $\alpha_j = 25, 45, 70$ и 90 говоре да:

- оптимална дебљина чеоне облоге зависи од нападног угла кумулативног млаза и за углове 25° , 45° и 70° износи 10, 8 и 4 mm, респективно. Такође, може се уочити да се при истим условима интеракције оптималном дебљином чеоне облоге због веће брзине постиже већа ефикасност експлозивног реактивног оклопа него са облогама двоструко веће дебљине.
- ефикасност експлозивног реактивног оклопа расте са смањењем нападног угла кумулативног млаза α_j , што је природно с обзиром да се у том случају вишеструко интензивирају гасодинамички и ерозивни утицај експлозивног реактивног оклопа на кумулативни млаз [2].

Прорачун показује да ефикасност експлозивног реактивног оклопа не зависи битно од дебљине доње облоге оклопа што су потврдила и експериментална истраживања.

Дебљина експлозивног пуњења

Нумеричка симулација утицаја дебљине експлозивног пуњења δ_e извршена је за експлозивни оклоп са дебљинама чеоне и доње облоге, $\delta_f = 8 \text{ mm}$ и $\delta_l = 1 \text{ mm}$.

Очигледан закључак је да са повећањем дебљине експлозивног пуњења ефикасност експлозивног реактивног оклопа расте и да је његов пораст већи уколико је нападни угао кумулативног млаза мањи [2].

Материјал облоге и врста експлозива

Утицај материјала облоге на параметре разлета експлозивног реактивног оклопа, самим тим и на процес интеракције кумулативног млаза и експлозивног оклопа, огледа се кроз дебљину, густину и механичке карактеристике материјала.

Када је у питању густина материјала облоге, теоријска анализа је показала да ефикасност експлозивног реактивног оклопа не зависи од густине материјала облоге [2].

Експериментална провера, извршена са чеоним облогама од челика и бакра, потврдила је изведени закључак. Ефикасност експлозивног реактивног оклопа је већа уколико је употребљен експлозив са већом брзином детонације D и већим притиском детонације P_{CJ} . Нешто већа ефикасност експлозивног реактивног оклопа се може постићи коришћењем експлозива велике бризантности (нпр. FO-3S) [2].

Растојање експлозивног реактивног оклопа од основног оклопа

Заустављањем доње облоге експлозивног реактивног оклопа на основном оклопу након пређеног растојања δ_x , у потпуности анулира ефекат кинематске ерозије млаза на доњој облози. Са овог аспекта било би повољније да је растојање експлозивног реактивног оклопа од основног оклопа што веће, али како је иначе парцијални учинак доње облоге на укупну ефикасност експлозивног реактивног оклопа занемариво мали, то је и пораст ефикасности оклопа, који се остварује повећањем растојања δ_x занемарив у поређењу са порастом ефикасности која се постиже повећањем брзине чеоне облоге [2].

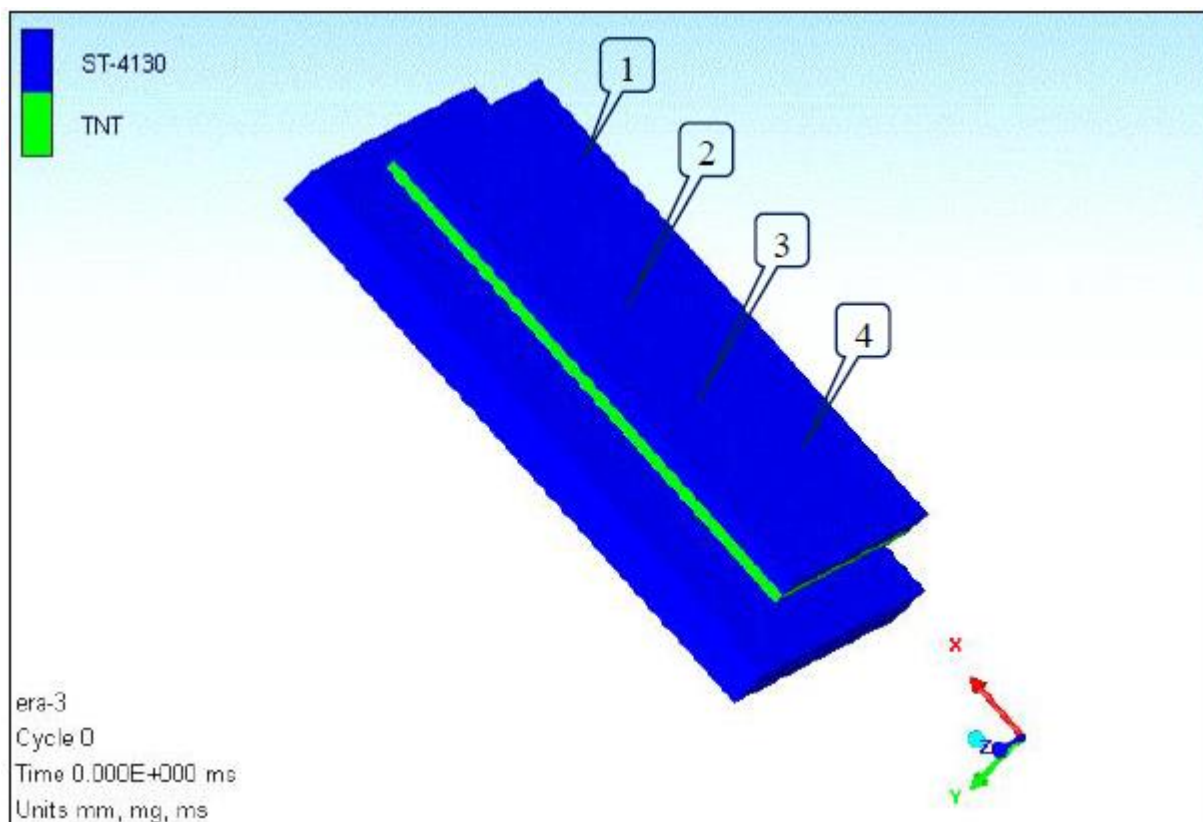
Нападни угао кумулативног млаза

Нападни угао кумулативног млаза α_j представља најутицајнији параметар ефикасности експлозивног реактивног оклопа. Може се закључити да при малим вредностима нападног угла кумулативног млаза ($\alpha_j < 30^\circ$) ниво заштите експлозивног реактивног оклопа је веома висок $NZEO > 80\%$.

Може се закључити следеће:

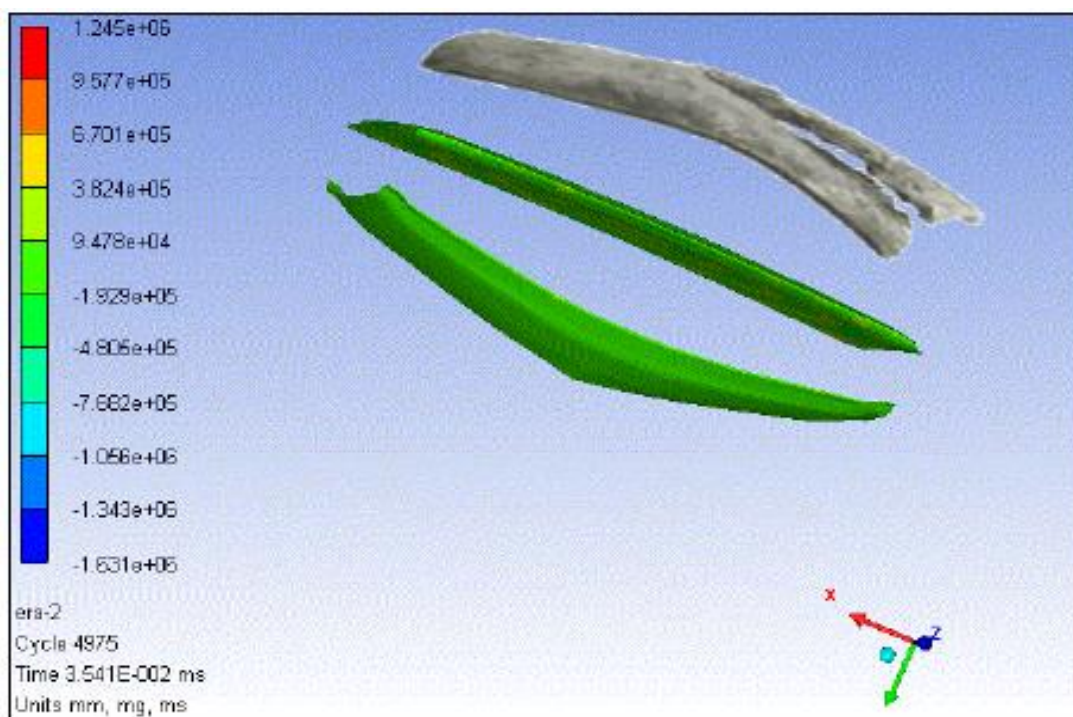
- најутицајнији параметри на ток процеса су дебљина чеоне облоге, дебљина експлозивног пуњења, нападни угао кумулативног млаза и координате поготка,
- оптималне вредности дебљине чеоне облоге од челика и дебљине експлозивног пуњења крећу се у границама од 5 до 10 mm,
- експлозивни оклоп најбоље заштитне ефекте показује при вредностима нападног угла кумулативног млаза мањим од 45° ,
- координате поготка представљају фактор случајног карактера.

На следећим сликама је приказ нумеричке симулације и изглед основног оклопа након активирања експлозивног реактивног оклопа [2].

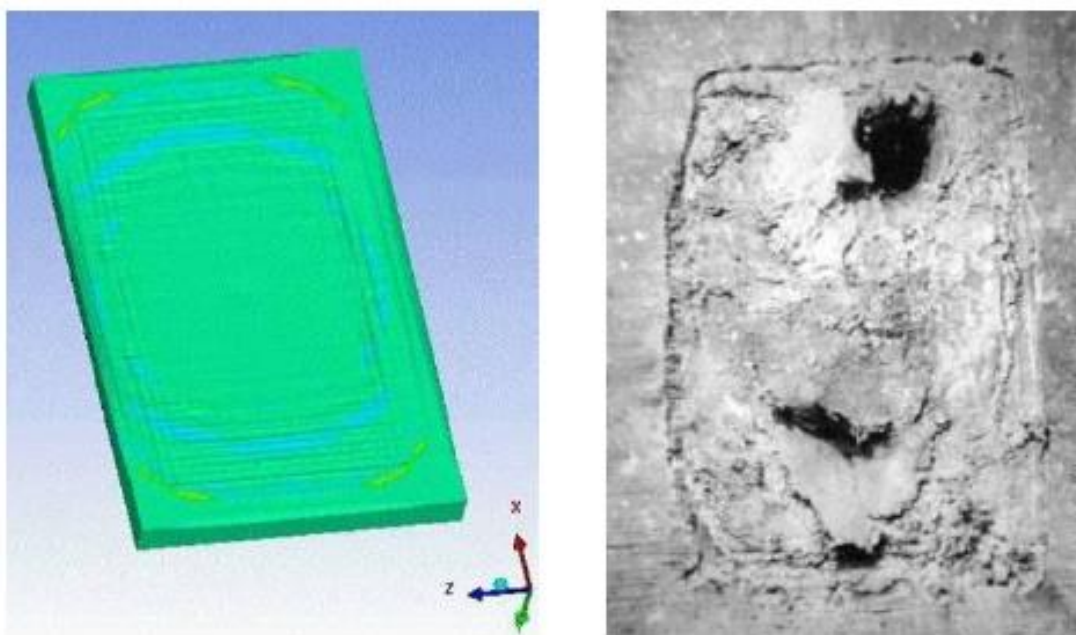


Слика 37. Нумеричка симулација функције експлозивног реактивног оклопа применом методе коначних елемената [2]

1 – Чеона облога; 2 – Експлозивно пуњење; 3 – Доња облога; 4 – Основни оклоп



Слика 38. Нумеричка симулација разлетања металних облога експлозивног реактивног оклопа са упоредним приказом чеоне облоге расечене дејством млаза [2]



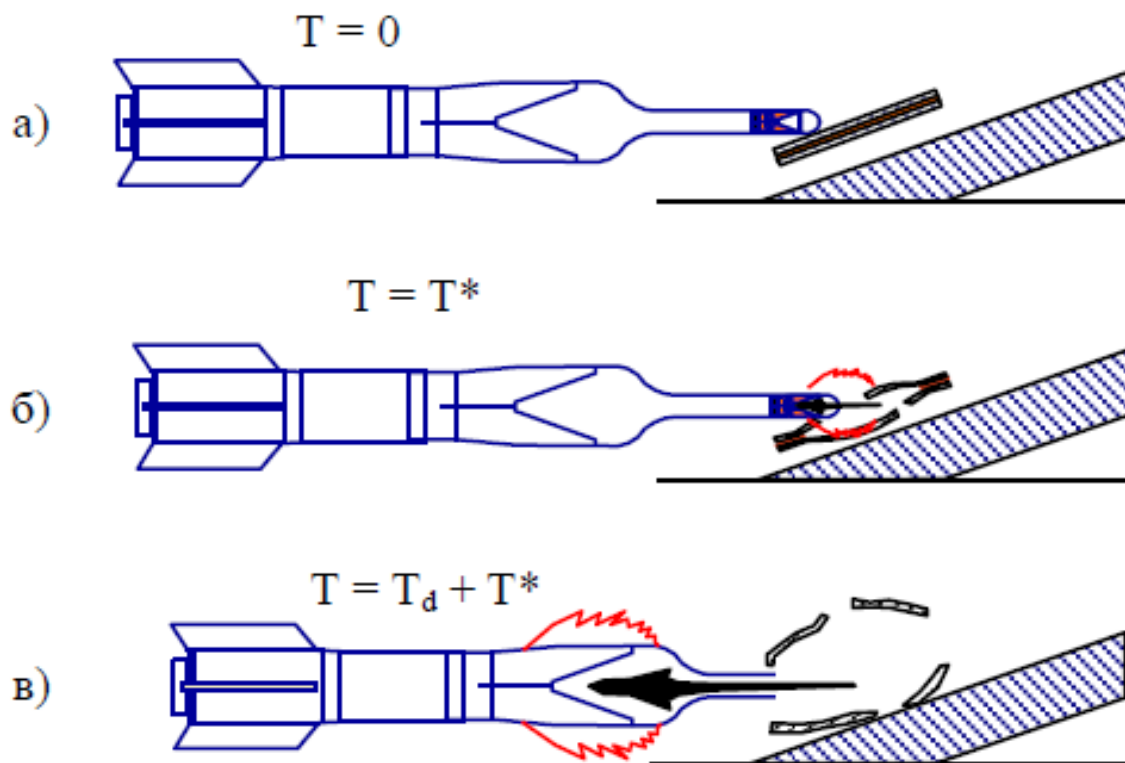
Слика 39. Нумеричка симулација кретања доње облоге експлозивног реактивног оклопа и судара са основним оклопом [2]

Синхронизација дејства тандем-кумулятивне бојне главе

Правилна функција и ефикасно дејство основног пуњења у тандем-кумулятивној бојној глави биће обезбеђени ако се спрече гасодинамичко дејство и ефекат кинематске ерозије млаза, настали активирањем експлозивног реактивног оклопа. Ово се може обезбедити правилним синхронизованим дејством пуњења у тандем-кумулятивној бојној глави.

Синхронизација дејства пуњења у тандем-кумулятивној бојној глави подразумева одређивање минималног времена кашњења активирања основног кумулативног пуњења, у односу на нулти тренутак, потребног да:

- гасовити продукти детонације експлозивног пуњења у елементу експлозивног реактивног оклопа потпуно експандирају и
- да чеона облога елемента експлозивног реактивног оклопа просторно мимоиђе трајекторију кумулативног млаза основног пуњења пре наилаaska самог млаза у зону захвата (Слика 40) [2].



Слика 40. Синхронизовано дејство тандем-кумулятивне бојне главе у реалном времену [2]

На тај начин, каснијим активирањем основног кумулативног пуњења, излагање кумулативног млаза овог пуњења деструктивном дејству гасовитих продуката детонације и ефекту кинематске ерозије на чеоној облози елемента експлозивног реактивног оклопа може се у потпуности спречити.

6. ЗАКЉУЧАК

Тема овог рада била је анализа заштите оклопних средстава. На почетку је дат опис тенка и начини функционисања заштите тенкова. Затим наведени примери са тактичко техничким карактеристикама и дат је опис савремених реактивних оклопа, од којих су међу најпознатијим: Blazer, Контакт, новија верзија контакта, Контакт-5, Нож, М99 и др. Детаљније је дат опис и начин функционисања експлозивног реактивног оклопа и кумулативног пројектила са и без бојеве главе.

Касета експлозивног реактивног оклопа има експлозивно пуњење, смештено између две металне плоче мале дебљине. Експлозивно пуњење израђује се од бризантног експлозива мале осетљивости. Потребно је да основни оклоп борбеног возила поуздано штити од дејства касете експлозивног реактивног оклопа и преостале (резидуалне) пробојности пројектила након дејства експлозивног реактивног оклопа.

Пројектили кумулативног дејства намењени су за пробијање препрека различите структуре и састава и служе за уништавање и онеспособљавање оклопних борбених средстава и армирано бетонских конструкција. Функционални део кумулативног пројектила је кумулативно експлозивно пуњење (КЕП), чији основни елементи су: експлозивно пуњење са облогом кумулативне шупљине и кошуљицом. Генерално посматрано, кумулативно експлозивно пуњење представља затворени систем експлозивне пропулзије.

Ефикасност кумулативних пројектила најчешће се изражава преко пробојности одређеног материјала. Пробојност се може изражавати на следећи начин:

- у *mm* хомогеног панцирног челика (ХПЧ), и то под одређеним углом или
- помоћу способности успешног пробијања одређене мете-циља (нпр. једнострука, двострука или трострука НАТО мета и сл.).

Ефикасност кумулативних пројектила зависи од многобројних параметара од којих су најважнији следећи:

- особине, спољашњи облик и димензије експлозивног пуњења, начин иницијације и др.
- експлозивног пуњења,
- димензије и облик кумулативне шупљине,
- материјал и дебљина облоге кумулативне шупљине,
- растојање између основице облоге и препреке,
- ротација пројектила,
- особине препреке итд.

Експлозив је један од одлучујућих фактора. Значај има и технологија израде кумулативног експлозивног пуњења. У савремене кумулативне пројектиле лаборишу се високобризантни експлозиви (нпр. мешавина тротила и хексогена, октогена и тротила или флегматизовани експлозиви: флегматизовани хексоген и флегматизовани октоген). Облик кумулативне шупљине је пресудан за ефикасност дејства кумулативног експлозивног пуњења. Обликом кумулативне шупљине може се усмерити кумулативно дејство у:

- тачку или
- праву (тзв. линијско кумулативно експлозивно пуњење или кумулативно сечиво).

Код саремених кумулативних убојних средстава највише се користи облик купе и полулопте, код којих се енергија експлозије усмерава у тачку, тзв. жижу или фокус. Примарни кумулативни млаз располаже највећом енергијом у тренутку одвајања од секундарног дела млаза, па је оптимално растојање основе облоге и препреке оно растојање које омогућава потпуно формирање кумулативног млаза.

Продирање кумулативног млаза кроз материјал препреке има скоро у потпуности механички карактер. Приликом пробијања долази до радијалног размицања материјала препреке под дејством чела примарног дела кумулативног млаза. Због тога је густина материјала препреке на ободу отвора већа него пре пробијања. Као што је већ речено, густина материјала препреке утиче на пробојност кумулативног експлозивног пуњења. Поред тога, и механичка тврдоћа материјала утиче на смањење пробојности. Најчешће се оклопи борбених возила израђују од метала (панцирни челик или дуралуминијум). Међутим, ако се оклоп изради вишеслојно, где се између металних плоча поставе слојеви материјала велике температуре топљења, густине и тврдоће, пробојност кумулативног експлозивног пуњења значајно опада. Савремена оклопна борбена возила имају вишеслојне оклопе, са унутрашњим слојевима од керамичких материјала, осиромашеног уранијума (амерички тенк M1A1 "Абрамс") и сл. Нарочиту ефикасност у циљу смањења пробојности кумулативног експлозивног пуњења остварује се употребом тзв. реактивног оклопа. Такав оклоп реагује током пробијања кумулативног млаза, чиме долази до дестабилизације млаза и смањења пробојности.

Реактивни оклоп може бити израђен од бризантне експлозивне материје, и тада се назива експлозивни реактивни оклоп. Наилазак кумулативног млаза изазива детонацију у експлозивном пуњењу експлозивног реактивног оклопа, због чега долази до одбацивања предње плоче експлозивног реактивног оклопа и ерозије млаза. Поред тога, и струјање продуката детонације врши скретање и кидање млаза.

Затим је дат приказ алгорита који показује да ће тенк бити уништен уколико се гађа са тандем кумулативном бојевом главом и ако је тенк заштићен са експлозивним реактивним оклопом, а да приликом постављања неексплозивног реактивног оклопа на тенк, тенк ће бити сачуван од тандем кумулативних бојевих глава.

Начин функционисања тандем кумулативних бојевих глава је такав да пројектил има два пуњења. Предпуњење и основно пуњење које се активира након малог кашњења и пробија основни оклоп.

Урађен је математички модел који показује која дебљина панцирног челика је потребна да би функционисање експлозивног реактивног оклопа било ефикасно приликом гађања са кумулативним пројектилом. На самом почетку прорачуна је извршен прорачун параметара детонације експлозивног пуњења Камлетовом методом.

Затим, прорачун урушавања облоге кумулативне шупљине Рихтеровом методом и на крају прорачун пробојности кумулативног млаза. Након извршеног прорачуна закључује се да је укупна маса облоге $105,16 \text{ m}^3/\text{kg}$ од чега 26,36% масе пређе у примарни кумулативни млаз и 73,57% масе пређе у секундарни кумулативни млаз или чеп. Затим, укупна кинетичка енергија кумулативног млаза за тротил је $1111,804 \text{ kJ}$, где је $\Delta E_m = 749,196 \text{ kJ}$ или 67,4%, док је укупна кинетичка енергија кумулативног млаза за октоген је $2009,011 \text{ kJ}$, где је $\Delta E_m = 1641,98 \text{ kJ}$ или 81,7%.

Иако је маса примарног кумулативног млаза знатно мања од масе чепа, његова кинетичка енергија је вишеструко већа од кинетичке енергије чепа. Што значи да је:

Маса примарног кумулативног млаза је 26,36% укупне масе облоге кумулативне шупљине, али је његова кинетичка енергија око 67,4% кинетичке енергије читаве облоге кумулативне шупљине.

Укупна прорачунска пробојност (дужина пробијања) кумулативног експлозивног пуњења калибра 64 mm једнака је $P_m = 286,36 \text{ mm}$, а време продирања кумулативног млаза $t = 71,44 \mu\text{s}$. За разматрано убојно средство (кумулативна ракета 64 mm M80), нормална пробојност је 300 mm хомогеног панцирног челика, што је око 4,5% више од прорачунске вредности (за тротил).

Маса примарног кумулативног млаза је 26,36% укупне масе облоге кумулативне шупљине, али је његова кинетичка енергија око 81,7% кинетичке енергије читаве облоге кумулативне шупљине.

Укупна прорачунска пробојност (дужина пробијања) кумулативног експлозивног пуњења калибра 64 mm једнака је $P_m = 292,84 \text{ mm}$, а време продирања кумулативног млаза $t = 68,15 \mu\text{s}$. За разматрано убојно средство (кумулативна ракета 64 mm M80), нормална пробојност је 300 mm хомогеног панцирног челика, што је око 2,4% више од прорачунске вредности (за октоген).

Усвојен је релативно мали број елемената ($i_{\max} = 7$). Овако груба подела је једним делом узрок грешака у прорачуну параметара урушавања облоге, као и еволуције и продирања кумулативног млаза, посебно на последњем сегменту кумулативне облоге, за $i = 7$. Ово се може приписати грешкама методе.

И на самом крају је дато објашњење ударног таласа и приказ основног оклопа након активирања експлозивно реактивне кутије. Утврђено је да на кумулативни млаз и на то да ли ће он пробити експлозивно реактивни оклоп утичу дебљина чеоне облоге, дебљина експлозивног пуњења, материјала облоге и врста експлозива. Експлозиви са већом брзином детонације су бољи. Затим, нападни угао, који нам говори да што је мањи нападни угао ефикасност експлозивног реактивног оклопа је боља.

Овакав модел је само прелиминарни прорачун онога што може да се уради. Да би овај модел заштите био ефикаснији, могу се променити неки основни параметри. На пример, могу се користити неке друге врсте експлозива, који имају мање или веће брзине детонације, па самим тим и другачију пробојност. Затим, могу се користити различите врсте пројектила, нпр.пројектили који изазивају Хопкинсонов ефекат, Misznay-Schardin-ov ефекат итд. Могу се примењивати различити типови заштите у комбинацији са активно-реактивном заштитом и тако побољшати ефикасност новоа заштите оклопних средстава.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] др Младен Пантић, дипл. инж. Опстанак тенка на бојишту, Војна академија, Београд, 2007.
- [2] Угрчић М., Благојевић М., Богданов Ј.: Методолошки приступи конструисању, изради и испитивању пројектила и бојних глава кумулативног дејства.
- [3] др Александар Стаматовић, Физика експлозије, Београд, 1996.
- [4] др Александар Стаматовић, Конструисање пројектила, Београд, 1995.
- [5] Барлов А., Преглед развоја убојних средстава за заштиту борбених возила, дипломски рад, Универзитет одбране у Београду, Војна академија, 2015.
- [6] др Јовица Богданов, дипл. инж. предавање из предмета „ Конструкција пројектила и упалача“, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.
- [7] https://www.militaryfactory.com/armor/detail.asp?armor_id=37, 23.07.2018.
- [8] Јеремић Р., Експлозивни процеси, ГШ ВЈ Управа за ШиО ВА, Београд 2002.
- [9] <https://sr.wikipedia.org/sr/%D0%A2%D0%B5%D0%BD%D0%BA>, 23.07.2018.
- [10] <http://www.srpskioklop.paluba.info/vihor/ERA.html>, 23.07.2018.
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Reactive_armour, 23.07.2018.