

Универзитет у Бањој Луци  
Факултет безбједносних наука

Саша Мићин

Борислав Малиновић

# ИНЖЕЊЕРСТВО ЕКСПЛОЗИВА И ЕКСПЛОЗИВНИХ МАТЕРИЈА

Бања Лука, 2023. године

**Др Саша Мићин**  
**Факултет безбједносних наука**  
**Универзитет у Бањој Луци**

**Проф. др Борислав Малиновић**  
**Технолошки факултет**  
**Универзитет у Бањој Луци**

**Инжењерство експлозива и експлозивних материја**

*Рецензенти*

*Издавач*  
УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ  
Факултет безбједносних наука

*За издавача*  
Проф. др Предраг Ћеранић  
Главни и одговорни уредник

Лектор  
Адријана Митрић

ISBN

Одлуком Сената Универзитета у Бањој Луци бр.        од 2023. године и Наставно-научног вијећа Факултета безбједносних наука бр.    од 2023. године, прихваћене су позитивне рецензије и одобрено је да се рукопис књиге „Инжењерство експлозива и експлозивних материја“ објави као универзитетска наставна литература.

## ПРЕДГОВОР

Имајући у виду да је област изучавања високоенергетских материја, односно експлозива и експлозивних материја веома широка и мултидисциплинарна, као и подручја примјене ових материја, појавила се потреба за адекватном стручном литературом за потребе извођења наставно-научног процеса на Факултету безбједносних наука Универзитета у Бањој Луци.

Књига под насловом Инжењерство експлозива и експлозивних материја обухвата градиво које се изучава у оквиру предмета Инжењерство експлозива и експлозивних материја. Материјал је представљен кроз седам главних поглавља: Историјски развој, Енергетске материје (експлозиви), Карактеристике енергетских материја, Експлозивни процеси, Важни аспекти енергетских материја, Методе детекције и идентификације експлозивних материја и Тероризам и експлозивне материје. Приказан је развој и употреба енергетских материја кроз историју као и различита подручја примјене те класификација експлозивних материја на основу различитих критерија. Обрађене су основне физичко-хемијске карактеристике, као и поједини специфични аспекти ових материја. Кроз методе и технике детекције и идентификације су приказане инструменталне методе кориштене за квалитативно и квантитативно одређивање експлозивних материја. Кроз поглавље Тероризам и експлозивне материје представљена је употреба експлозивних материја за извођење терористичких напада.

Кориштена је литература из различитих временских периода и различитих аутора са нагласком на најновија достигнућа из ове области. Поједини стручни називи и термини су наведени и на енглеском језику ради лакшег термилошког разумијевања у односу на литературу која није доступна на српском језику.

Књига је првенствено намијењена студентима Факултета безбједносних наука Универзитета у Бањој Луци, али може у знатној мјери бити корисна и другим читаоцима различитих стручних и научних области интересовања.

Аутори

# САДРЖАЈ

## 1. ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ЕНЕРГЕТСКИХ МАТЕРИЈА

## 2. ЕНЕРГЕТСКЕ МАТЕРИЈЕ (МАТЕРИЈЕ СА ВИСОКОМ ЕНЕРГИЈОМ, ЕКСПЛОЗИВИ)

### 2.1. Појам енергетских материја

### 2.2. Дефиниција енергетских материја

### 2.3. Подјела (класификација) енергетских материја

#### 2.3.1. Класификација енергетских материја на основу области примјене

#### 2.3.2. Класификација енергетских материја на основу агрегатног стања, конзистенције

#### 2.3.3. Класификација енергетских материја на основу природе експлозивног процеса

#### 2.3.4. Класификација енергетских материја на основу хемијског састава (експлозофора)

#### 2.3.5. Класификација енергетских материја на основу молекулске структуре

## 3. КАРАКТЕРИСТИКЕ ЕНЕРГЕТСКИХ МАТЕРИЈА

### 3.1. Основне карактеристике

#### 3.1.1. Компатибилност и стабилност

#### 3.1.2. Равнотежа кисеоника (биланс кисеоника)

#### 3.1.3. Осјетљивост

#### 3.1.4. Топлота формирања

#### 3.1.5. Топлота експлозије и количина гасовитих продуката

### 3.2. Карактеристике примарних, секундарних и терцијарних експлозива

#### 3.2.1. Брзина детонације

#### 3.2.2. Детонацијски притисак

#### 3.2.3. Експлозивна моћ и снага

3.2.4. Бризантност

3.3. Карактеристике пропеланата

3.3.1. Специфичне карактеристике пропеланата за муницију

3.3.2. Специфичне карактеристике ракетних пропеланата

3.4. Карактеристике пиротехничких материја

3.4.1. Температура паљења

3.4.2. Механичке особине

3.4.3. Апсорпција влаге

3.4.4. Топлотна снага

3.4.5. Запремина гасова

3.4.6. Јачина освјетљења

3.4.7. Интензитет инфрацрвеног зрачења

3.4.8. Брзина сагоријевања

3.4.9. Осматрање учинка дима

4. ЕКСПЛОЗИВНИ ПРОЦЕСИ

4.1. Појам, дефиниција и подјела експлозије

4.1.1. Физичка експлозија

4.1.2. Нуклеарна експлозија

4.1.3. Хемијска експлозија

4.2. Сагоријевање

4.3. Дефлаграција

4.3.1. Дефлаграција примарних и секундарних експлозивних материја

4.3.2. Дефлаграција пропеланата

#### 4.4. Детонација

##### 4.4.1. Ударни (шок) талас

##### 4.4.2. Теорија детонације

##### 4.4.3. Транзиција дефлаграције у детонацију

##### 4.4.4. Утицај различитих параметара на процес детонације

#### 5. ВАЖНИ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТСКИХ МАТЕРИЈА

##### 5.1. Иницијација (иницирање експлозивних материја)

###### 5.1.1. Самопаљење система

###### 5.1.2. Принудно паљење (иницирање)

##### 5.2. Ефекти експлозивних процеса

###### 5.2.1. Ефекти дефлаграције

###### 5.2.2. Ефекти детонације

##### 5.3. Утицај експлозива и експлозија на околину

###### 5.3.1. Ефекти дејства експлозива и експлозивних процеса

#### 6. МЕТОДЕ ДЕТЕКЦИЈЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ ЕКСПЛОЗИВНИХ МАТЕРИЈА

##### 6.1. Инструменталне методе

###### 6.1.1. Спектроскопске методе

###### 6.1.2. Термичке методе

###### 6.1.3. Спектрометријске методе

###### 6.1.4. Хроматографске методе

###### 6.1.5. Електрохемијске методе

###### 6.1.6. Остале методе

#### 7. ТЕРОРИЗАМ И ЕКСПЛОЗИВНЕ МАТЕРИЈЕ

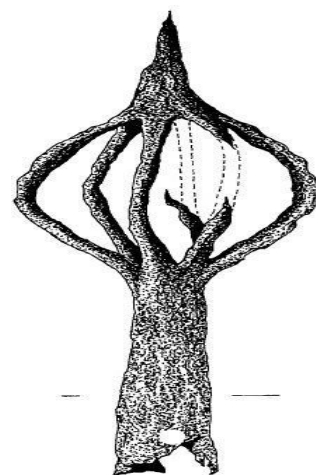
7.1. Врста набоја (главног пуњења)

7.2.2. Начин активирања и кориштења

ЛИТЕРАТУРА

# 1. ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ЕНЕРГЕТСКИХ МАТЕРИЈА

Различити материјални и писани трагови указују на чињеницу да кориштење материја са експлозивним карактеристикама има веома дугу историју. Посматрано у ширем контексту, запаљиве бакље највјероватније представљају најранији облик кориштења експлозивних материја. За антички и средњовјековни период карактеристична је употреба запаљивих стрела. Најраније изведбе су представљали платнени материјали натопљени уљем или смолом и причвршћени за врхове стрела<sup>1</sup>. За вријеме Римског царства се усавршава конструкција запаљивих стрела. На стрелице и копља се причвршћују жељезне кутије или цијеви које су испуњене запаљивим материјама као и самом конструкцијом врха стрела [1]. Различите запаљиве материје и смјесе, помоћу уређаја различитих конструкција, користе се претежно у војне сврхе<sup>2</sup>. Основни састојак запаљивих смјеса су сачињавале различите смоле природног поријекла<sup>3</sup>. Почетком III вијека долази до употребе запаљиве смјеше негашеног креча и асфалта која у додиру са водом доводи до запаљења смјеше а користи се у поморским биткама [3]. На основу претходно познатих и кориштених запаљивих смјеша које су се заснивале на мјешавини сумпора, нафте и битумена<sup>4</sup>, [4] Грк Калиникос<sup>5</sup> је 672. године н. е. [5] усавршио тзв. грчку ватру (енг. *greek fire*) и учинио је ефикаснијом и лакшом за употребу. Оригинални састав смјесе грчке ватре није до данас дефинисан. Претпоставља се да је запаљива смјеса мјешавина



Слика број 1. Врх римске запаљиве стреле прва половина I вијека [2]



Слика број 2. Црни барут, смјеша сумпор, дрвеног угља и калијум-нитрата

<sup>1</sup> Асирци и Јудејци користе запаљиве стреле приликом опсаде Лакиша 701. године п. н. е.

<sup>2</sup> Приликом опсаде града Тира (Феничанска лука на Средоземном мору) 332. године п. н. е. од стране Александра Великог. Такође су опкољени Картагињани у Мотији 398 године п. н. е. од стране Сиракужана које је предводио Дионизије I употребили запаљиве смјесе у сврху одбране града као и Беотијанци против дрвених утврда Атињана током битке код Делиума 424. године п. н. е.

<sup>3</sup> Под називом смоле се сврставају бројни вискозно еластични полимери (енг. *viscoelasticity polymers*) који показују и вискозне и еластичне карактеристике приликом деформације. У природне смоле се убрајају асфалт (битумен), биљне смоле (смоле четинарског дрвећа), калофонијум (чврста форма смоле дрвета бора). Смоле вјештачког поријекла представља катран добијен дестилацијом природне нафте или угља.

<sup>4</sup> Краљевина Понтус је користила сличну мјешавину против Римљана за вријеме Митхидратских ратова у I вијеку п. н. е. (Асирци IX вијек п. н. е.)

<sup>5</sup> Дошао у Константинопољ, данашњи Истанбул, из Сирије око 668. године н. е.

нафте, сумпора, смоле бора или кедра, живог креча<sup>6</sup>, битумена, калцијевог фосфида<sup>7</sup> или нитра<sup>8</sup> [6]. Грчка ватра се први пут користи приликом одбране Константинопоља 673–678. године н. е. [5]. Откриће и примјена црног барута (енг. *black powder, gunpowder*), историјски посматрано, представља веома значајну етапу развоја експлозивних материја при чему неки аутори сматрају да са открићем црног барута започиње историја експлозива. На основу записа о несрећи која се догодила, откриће црног барута се може приписати кинеским алхемичарима 220. године п. н. е.<sup>9</sup> [7]. Други аутори сматрају да је проналазак црног барута случајни резултат провођења експеримената кинеских алхемичара приликом покушаја стварања еликсира живота. Прва примјена црног барута у војне сврхе датира око 1000. године н. е. [8] а најстарија позната писана формула из 1044. године н. е.<sup>10</sup> [9]. Након открића и почетка примјене црног барута, нарочито у Кини, долази до наглог развоја и кориштења различитих оруђа и оружја на основу барута нарочито у војне намјене. Различите конструкције оружја и начини употребе су описани у спису *Huolongjing*<sup>11</sup>. Посредством развоја трговине долази до ширења употребе барута и у другим дијеловима свијета. У арапском свијету сазнања везана за барут почињу бити присутна у периоду између 1240–1280, када је на основу кинеских записа Сиријац Хасан ел Рамах написао на арапском језику рецепте за барут, упутства за пречишћавање шалитре те опис барутних запаљивих смјеса [10]. На индијски потконтинет барут и оружја која су користила барут стижу током инвазије Монгола на Индију у периоду од 1221. до 1327. године. [11]. У раном и средњем периоду XIV вијека посредством арапских трговаца, барут и оружја са барутом доспијевају у Јаванско Мајапахит (енг. *Majapahit*) царство које се простирало на највећем дијелу данашње Индонезије [12]. Према већини аутора, присуство барута у Европи започиње средином XIII вијека. Први записи везани за барут појављују се у текстовима Роџер Бекона<sup>12</sup> [13] као и експерименти на основу

---

<sup>6</sup> Калцијум-оксид,  $CaO$

<sup>7</sup> Анорганска супстанца хемијске формуле  $Ca_3P_2$

<sup>8</sup> Калијум-нитрат  $KNO_3$ , шалитра

<sup>9</sup> Приликом покушаја одвајања злата и сребра из златне руде, кинески алхемичари су додавали калијум-нитрат (шалитру  $KNO_3$ ) и сумпор у златну руду при чему су заборавили додати угаљ у првом кораку извођења реакције. Покушај накнадног додавања угља довео је до настанка црног праха а затим снажне експлозије.

<sup>10</sup> Писана формула црног барута се налази у тексту рукописа са војном тематиком (енг. *Wujing Zongyao*) писан од 1040–1044. (енг. *Complete Essentials from the Military Classics*)

<sup>11</sup> *Huolongjing*, такође познат као *Huoqitu*, јесте војна расправа из XIV в. н. е. који су саставили и уредили *Jiao Yu* и *Liu Bowen* из ране династије Минг (1368–1683). *Huolongjing* се првенствено заснива на тексту познатом као *Huolong Shenqi Tufa*, који више не постоји.

<sup>12</sup> Први експерименти и добијање барута датира из 1249. године. У текстовима је записан рецепт за добијање црног барута, 75% шалитре (калијев нитрат), 15% дрвени угаљ и 10% сумпор. Дрвени угаљ и сумпор имају улогу гориве смјеше у праху, док шалитра служи као оксиданс. Такође је наведено да се шифрована формулација за добијање

Беконових списа када је њемачки монах Бертолд Шварц<sup>13</sup> почео да прави и проучава црни барут [7]. Други аутори сматрају да је барут у Европу стигао помоћу Монгола<sup>14</sup>. Једно од првих описа примјене барута се сматрају одломци у Беконовим текстовима Опус Маиус (енг. *Opus Maius*) из 1267. године и Опус Терцијуму (енг. *Opus Tertium*). Књига под називом Књига ватри (лат. *Liber Ignium*) која се приписује Маркусу Грекусу представља збирку рецептура запаљивих смјеса међу којима се налазе и поједине рецептуре које укључују и рецептуре за производњу барута. Значајан технолошки напредак је постигао Корнинг 1425. године проналаском и примјеном побољшане технике добијања гранулисаног барута (тзв. корнинг барут), односно, барута у зрну. Даље усавршавање производње и употребе црног барута<sup>15</sup> довеле су до тога да је црни барут до 1800. године представљао најзначајнију експлозивну материју са становишта производње и употребе, односно, до појаве првих модерних експлозивних материја (нитроглицерина и динамита). Италијански хемичар Асканио Соберо је 1846. године синтетизирао нитроглицерин у форми течности да би након тога Имануел Нобел развио и комерцијализовао производњу нитроглицерина<sup>16</sup>. Због веома изражене нестабилности, производња, транспорт и употреба нитроглицерина је била веома отежана и доводила до честих неконтролисаних експлозија са људским жртвама и материјалним штетама. Ради повећања безбједности приликом рада са нитроглицерином, Алфред Нобел је 1864. године изумио детонатор који је садржавао

---

барута налази у појединим каснијим текстовима (лат. *Epistola de Secretis Operibus Artis et Naturae, et de Nullitate Magiae*).

<sup>13</sup> Оспоравано од појединих аутора

<sup>14</sup> Историјски извори спомињу употребу кинеског ватреног и барутног оружја које Монголи користе у бици код Мохија 1241. године која се одиграла на територији данашње Мађарске.

<sup>15</sup> Године 1073. приликом опсаде Београда кориштен је црни барут; 1331. год. кориштени су топови на барут у бици код Чивидале, Италија; 1339. год. топови на барут кориштени су у бици код Кресија, Француска, 1346. године, 1340. године, у Енглеској; 1346. године Њемачка; 1363. године Дубровник, 1373. год. кнез Лазар посједује топове на барут; 1378. год. Котор; 1382. год. кориштени топови на барут приликом одбране Москве од Татара; 1389. и 1413. год. кориштени топови на барут калибра 1200 мм и масе гранате 300 кг приликом опсаде Цариграда; 1426. год. деспот Стефан Лазаревић; 1480. год. Шведска; 1627. год. Мађар Каспар Вендл користи црни барут за откопавање руде; тзв. патроне црног барута (енг. *Corned blackpowder*) постепено се појављују за употребу у малим ручним пиштољима и ручним бомбама током XV вијека и за велика оружја у XVI вијеку. Млинови за производњу барута (користећи Корнигов процес) почели су се користити у *Rotherhithe and Waltham Abbey* у Енглеској између 1554. и 1603. године. Први запис о употреби барута у грађевинарству је био током 1548–1572. год. када је кориштен за изградњу канала ријеке Њемен у Сјеверној Европи док се 1627. године у Мађарској употребљава као средство за мињање у рударству. Ускоро се барут користи за мињање у Њемачкој, Шведској и другим земљама. У Енглеској је прво примијењен у корноволским рудницима бакра 1670. године. У Шведској је 1646. године основана компанија Бофорс која је ускоро постала главни произвођач барута у Европи.

<sup>16</sup> Имануел Нобел и његов син Алфред Нобел 1863. године подижу мањи погон за производњу нитроглицерина у мјесту Хеленборг близу Штокхолма (Шведска).

живин фулминат умјесто црног барута за иницирање нитроглицерина<sup>17</sup>. Ради повећања безбједности приликом транспорта, Нобел је провео истраживања везана за смањење осјетљивости и 1867. године патентирао динамит<sup>18</sup>. У том временском периоду, такође су вршена међусобно независна истраживања више научних група везана за процес нитрирања целулозе<sup>19</sup>. Коначан извјештај резултата истраживања производње нитроцелулозе су представили независно Шонбејн у Базелу и Ботгер у Франкфурту између 1845. и 1847. године<sup>20</sup>. Откриће и почетак примјене у различите сврхе динамита, нитроглицерина и нитроцелулозе су иницирали даља интензивна истраживања са циљем побољшања карактеристика ових експлозивних материја, синтезу нових супстанци као замјена за постојеће, као и истраживања везана за нове супстанце са побољшаним карактеристикама у односу на подручје примјене. Као резултат ових истраживања долази до открића и употребе већег броја експлозивних материја различитих карактеристика и намјене. Имајући у виду да барут карактерише високи ниво хигроскопности, низак ниво енергије која се ослобађа приликом експлозије, стварање великих количина дима након експлозије и изражено корозивно дјеловање продуката експлозије, Нобел је уочио, 1875. године, да, мијешањем нитроглицерина и нитроцелулозе, настала смјеса посједује желатинозну форму<sup>21</sup>. Даљим поступком рафинације<sup>22</sup> добијен је желатинозни динамит а затим 1888. године

---

<sup>17</sup> Случајна експлозија у фабрици у Хеленборгу 1864. године је уништила цијели погон и изазвала смрт Алфредовог брата Емила. Живин фулминат је откривен крајем 17. вијека од стране (енг. *Johann Kunkel von Löwenstern*) и није имао практичну примјену. Поновно откриће, испитивање карактеристика и приједлог за употребу као иницијални експлозив 1799–1800. је урадио Енглез Едвард Ховард а 1807. године шкотски свештеник Александер Форсајт је извршио патентирање. Прва употреба живиног фулмината као иницијалног експлозива је била 1814. године. Молекуларна структура живиног фулмината је тек 2007. године откривена од стране истраживачког тима Универзитета Лудвиг-Максимилијан, Минхен, Њемачка (енг. *Ludwig-Maximilians-Universität München*). Литературни подаци указују да приликом топлотне трансформације живиног фулмината настаје нова живина експлозивна супстанца која је стабилна на температурама до 120°C.

<sup>18</sup> Након експлозије у фабрици за производњу нитроглицерина 1866. године, ради смањења осјетљивости течност нитроглицерина приликом транспорта, Нобел је извршио апсорпцију нитроглицерина у инертно апсорпционо средство у односу 75/25% нитроглицерин/глина при чему је као апсорпциони материјал користио глину под називом киселгур (енг. „*Kieselgur*”) или диатомејска земља (природне силикатне стијене хемијског састава 80–90% силицијум-диоксид, 2–4% алуминијум-оксид и 0,5–2% жељезо-оксида). Ова смјеша је носила назив гур-динамит.

<sup>19</sup> Нитрирање – назив за хемијску реакцију увођења тзв. Нитро-групе (-NO<sub>2</sub>) у молекулу органског једињења, целулозе најраспрострањенијег угљиковог једињења на Земљи. Угљикохидрат који настаје у природи фотосинтезом.

<sup>20</sup> Године 1833. Браконт (енг. *Braconnot*) вршио је нитрирање шкроба, 1838. године Пелоз (енг. *Pelouze*) наставио је експерименте Браконта вршећи нитрирање папира, памука и других различитих материјала при чему није имао спознају да је настали продукт експеримента нитроцелулоза.

<sup>21</sup> Облик форме чврстих материја коју карактерише аморфност (неуређеност структуре, уређеност структуре конститутивних честица (молекула, атома) на мањим међусобним растојањима, на већим растојањима између конститутивних молекула неуређеност, односно, неуређеност у цијелој запремини чврсте супстанце.

<sup>22</sup> Технолошки поступак пречишћавања.

балистит, прва бездимна експлозивна материја<sup>23</sup>. Експлозивну материју сличног састава, познату под називом кордит, открили су Дјуар и Абел 1889. године<sup>24</sup>. Шведски хемичари Олсон и Норбин су 1867. године побољшали експлозивне карактеристике динамита додатком амонијум-нитрата<sup>25</sup>. У периоду 1885–1888. године, као веома погодна замјена за црни барут се показала пикринска киселина те примјена њених соли за различите намјене<sup>26</sup>. Примјеном нових технолошких процеса производње смањена је осјетљивост нитроцелулозе<sup>27</sup> те је омогућена употреба у војне и цивилне сврхе<sup>28</sup>. Такође је дошло до открића тзв. Мунровог ефекта, односно, кумулативног дејства експлозива<sup>29</sup>. Тринитротолуен (ТНТ, енг. *TNT*)<sup>30</sup> сматра се једним од најчешће

---

<sup>23</sup> Хемијски састав: 49% нитроцелулоза, 49% нитроглицерин, 2% бензен – органска супстанца  $C_6H_6$  и камфор – природни смоласти терпеноид хемијске формуле  $C_{10}H_{16}O$ .

<sup>24</sup> Израђиван је у двије форме: желатинизирана нитроцелулоза и као мјешавина нитроцелулозе и нитроглицерина са додатком мале количине вазелина (смјеса текућих и чврстих угљиководоника парафинског реда, алкана, са 15 до 20 угљикових атома у молекули) који је имао улогу стабилизатора. Бездимни прах је убрзо постао примарно средство за употребу у пиштољској муницији.

<sup>25</sup> Синтезу амонијум-нитрата, први је извео Глаубер 1654. године. Разматрања везана за употребу амонијум-нитрата умјесто калијум-нитрата су вршили Гриндел и Робин те Реис и Милон 1849. године који су открили да мјешавина амонијум-нитрата и угља експлодира приликом загријавања. Амонијум-нитрат се није сматрао експлозивном материјом све до експлозије трговачких бродова *SS Grandchamp* и *SS Highflyer*, 16. и 17. априла 1947. године у луци Тексас Ситија као и трговачког брода *SS Ocean Liberty*, 28. јула 1947. године у луци Брест, Француска. Бродови су били натоварени тзв. амонијум-нитратом за гнојиво (енг. *Fertilizer Grade Ammonium Nitrate, FGAN*) који се састојао од смјесе зрнастог амонијум-нитрата са 0,75% воска и 3,5% глине.

<sup>26</sup> Пикринска киселина (тринитрофенол,  $C_6H_3N_3O_7$ ) спомиње се у списима Глаубера 1742. године. Кориштена је за бојење свиле и вуне. Могућност кориштења као експлозивне материје је истраживао Велтер 1830. године. Дезињол и Бругер су предложили употребу соли пикринске киселине као горива док је Абел 1871. године предложио кориштење амонијум-пикрата као експлозива. Могућност детонације пикринске киселине је показао Спренгел 1873. године те је Турпин на основу његових истраживања извршио замјену барута са пикринском киселином као експлозивно пуњење муниције. Такође је 1894. године у Русији, Панпушко произвео пикринску киселину. Оловни пикрат и амонијум-пикрат су главне пикратне соли. Смјеса ТНТ-а и амонијум-пикрата у односу 48/52 има назив „експлозив д” или пикратол.

<sup>27</sup> Фредерика Абела је ангажовала британска влада ради рјешавања проблема нестабилности нитроцелулозе. Резултати спроведених истраживања у Вулвичу и Валтхам Абеју су објављени 1865. године. Примјеном поступка пулпирања, кухања и прања стабилност нитроцелулозе је подигнута на виши ниво.

<sup>28</sup> Примјена нитроцелулозе као експлозива у војне и цивилне сврхе почиње 1868. године. Откриће Абеловог помоћника Брауна који је открио да суха, пресована и високонитрирана нитроцелулоза, може експлодирати кориштењем живиног фулмината као детонатора. Такође је утврдио да већа количина влажне нитроцелулозе може бити активирана малом количином суше нитроцелулозе.

<sup>29</sup> Кумулативни ефекат представља прерасподјелу и усмјеравање енергије експлозије у одређеном правцу и њено фокусирање на малој површини што се постиже геометријским обликовањем оне стране експлозивног пуњења која је супротна од стране са које се врши иницирање. Утицај облика експлозивног пуњења на ефекат дејства експлозивне направе се први пут спомиње 1792. године приликом кориштења у Норвешкој и у рудницима планине Харц у Њемачкој. Макс вон Ферстер који се налазио на мјесту управника фабрике нитроцелулозе *Wolff & Co.* у Валсродеу у Њемачкој, 1883. године је успио постићи кумулативни ефекат. Густав Блем (енг. *Gustav Bloem*) из Диселдорфа, Њемачка, 1886. је патентирао геометријски облик експлозивног пуњења које производи кумулативни ефекат. Чарлс Мунро (енг. *Charles E. Munroe*) према коме је кумулативно дејство названо Мунроов ефекат је 1888. године уочио дејство кумулативног ефекта посматрајући детонацију блокова нитроцелулозе са угравираним називима произвођача и 1894. конструисао прву експлозивну направу са кумулативним дејством.

<sup>30</sup> Прву синтезу тринитротолуена ( $C_7H_5N_3O_6$ ) је извео Вилбранд 1863. године. Прва детаљна студија синтезе 2,4,6-тринитротолуена је представљена 1870. године када су Белштејн и Кулберх открили изомер 2,4,5 тринитротолуен (у хемији изомери представљају јоне или молекуле које имају идентичну хемијску формулу и различиту структуру).

кориштених експлозива током двадесетог вијека. Он замјењује у потпуности пикринску киселину и постаје стандардни војни експлозив у Првом свјетском рату<sup>31</sup>. Ограничена доступност толуена везаног за процес производње и, са друге стране, велика употреба за пуњење муниције доводи до производње експлозивне смјесе TNT-а и амонијум-нитрата под називом аматол. Додатком алуминијума у експлозивну смјесу сличног састава произведен је подводни експлозив под називом аминал. Развијен је већи број различитих експлозивних смјеса у којима се налази TNT. Такође се у употреби појављују и друге експлозивне материје као што су тетрил, пентаеритритол тетранитрат (ПЕТН, енг. *PETN*)<sup>32</sup> и нитрогванидин<sup>33</sup>. У периоду између два свјетска рата, настављена су истраживања у правцу изналажења и примјене нових експлозивних материја побољшаних карактеристика у односу на, до тада кориштене, експлозиве. До тада најшире употребљавани иницијални експлозив живин фулминат се замјењује са новим иницијалним експлозивима као што су оловни азид<sup>34</sup>, оловни стифнат<sup>35</sup>, диазодинитрофенол (енг. *DDNP, Dynol*)<sup>36</sup> и тетразен<sup>37</sup>. Међу најзначајније

---

Чисти TNT је 1880. године произвео Хеп а дефинисање структурне формуле је урађена 1883. године од стране Клауса и Бекера. Индустијска производња TNT-а је започела у Њемачкој 1891. године. Производња експлозивне смјесе TNT-а и алуминијума је отпочела од 1899. године.

<sup>31</sup> TNT се претежно користи у индустрији боја до 1902. године када га њемачка војска, 1907. године британска војска и 1912. године америчка војска усвајају за употребу као замјену за пикринску киселину. Такође је кориштен за вријеме руско-јапанског рата (1904–1905).

<sup>32</sup> PETN-пентаеритритол тетранитрат (*2,2-Bis[(nitrooxy)methyl]propane-1,3-diol dinitrate, C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>N<sub>4</sub>O<sub>12</sub>*) први пут је синтетизиран 1894. године у фабрици експлозива *Rheinisch-Westfälische Sprengstoff A.G* у Њемачкој. Шира производња и примјена је била условљена доступношћу формалдехида и ацеталдехида супстанци потребних за синтезу PETN-а а која је започела 1912. године. Присутан је као састојак многих експлозивних смјеса.

<sup>33</sup> Нитрогванидин (енг. *nitroguanidine, 1-Nitroguanidine, Picrite, CH<sub>4</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>*) открио је Јуселин 1877. године. Испитивање карактеристика нитрогванидина је извршио Виеле 1901. године. Кориштен је током Првог свјетског рата као пропелант (погонске експлозивне материје које сагоријевањем обезбјеђују енергију за погон различитих објеката) артиљеријске муниције у смјеси са нитроцелулозом. Приликом складиштења ове експлозивне смјесе нитрогванидин је узроковао разградњу нитроцелулозе. Рјешење овог проблема је нађено у компанији Динамит АГ која је 1937. године развила пропелант који садржи нитрогванидин под називом Гудол Пулвер. У Другом свјетском рату је употребљаван као тробазни пропелант.

<sup>34</sup> Оловни азид је синтетизирао Теодор Куртијус 1891. године. Ради побољшања стабилности, између 1920. и 1930. године развијена је декстринирана форма (стабилизација извршена помоћу декстрина (мјешавина полимера Д-глукозе при чему су полимерне јединице везане ковалентним везама)), форма настала кориштењем карбокси метил целулозе је развијена током Другог свјетског рата, док је за вријеме Вијетнамског рата (1955–1975) развијена желатинирана молибден дисулфид форма.

<sup>35</sup> Оловни стифнат (енг. *Lead(II) 2,4,6-trinitrobenzene-1,3-bis(olate), C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>N<sub>3</sub>O<sub>8</sub>Pb*) откривен је 1874. године. Едмонд Херц је 1919. године објавио начин производње анхидрованог (безводног) оловног стифната.

<sup>36</sup> Диазодинитрофенол (енг. *6-Diazo-2,4-dinitrocyclohexa-2,4-dien-1-one, DDNP, Dynol, C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>N<sub>4</sub>O<sub>5</sub>*) први је припремио Петер Греис 1858. године при чему је кориштен као полазна сировина за производњу боја. Истраживања експлозивних карактеристика су вршена тајно 1892. године у Канцеларији за војна истраживања (њем. *Militär-Versuchsammt*) те су након несреће истраживања прекинута. Као иницијални експлозив DDNP је развијен 1928. године.

<sup>37</sup> Прву синтезу тетразена (енг. *(2E)-2-Tetraazene, H<sub>4</sub>N<sub>4</sub>*) извели су Хофман и Рот 1910. године.

секундарне експлозиве развијене у овом периоду се сврстава хексоген (енг. RDX)<sup>38</sup> као и различите експлозивне смјесе *RDX*, *TNT*, *PETN* и тетрила. Интензивна истраживања са циљем изналажења експлозивних материја које карактеришу што већа разорна дејства су вођена током и након Другог свјетског рата. Резултат ових истраживања представља високотопљива експлозивна материја под називом октоген (енг. *HMX*)<sup>39</sup> који је један од највише кориштених разорних експлозива у војној употреби до данашњих дана. У периоду након Другог свјетског рата до данас развијен је веома велики број експлозивних материја и смјеса различитих особина у зависности од захтијеваних карактеристика за дату намјену. Истраживања су проведена у више различитих праваца са циљем побољшања појединих физичко-хемијских карактеристика. Развијен је већи број експлозивних материја које посједују повишену отпорност на дјеловање топлоте, односно, побољшану термичку стабилност (енг. *Heat-Resistant, Thermally Stable Explosives*) који се у већој или мањој мјери налазе у употреби или појединим фазама испитивања. Као значајнији представници су хексанитростилбен (енг. *HNS*, синтетизован 1964 године), 3-пикрил-1,2,4-триазол (енг. *PATO*, 1968. године) [14], 2,6-бис(пикриламино)-3,5-динитропиридин (енг. *PYX*, 1972 год.) [15] и 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензен (енг. *TATB*, 1977 године). Развој експлозива високих карактеристика (енг. *High Performance Explosives*) врши се у правцу развоја експлозивних материја високе густине (енг. *High Density*) и високе брзине детонације (енг. *High Velocity of detonation, VOD*) са циљем повећања разорне моћи експлозивних материја међу којима 2,4,6,8,10,12-хексанитро-2,4,6,8,10,12-хексазаизовурцинат (енг. *HNIW*), откривен 1990. године од стране Нилсена и сарадника [16], популарно назван енгл. *CL-20*, заузима веома значајно мјесто. *CL-20* у односу на *RDX* и *HMX* посједује значајно већу брзину детонације, односно, разорну моћ (~ 10%, односно, ~ 3,5%). Такође су вршена истраживања и других експлозивних

---

<sup>38</sup> Осим назива *RDX*, користе се и други називи као што су хексоген, циклонит, Т4. Према међународној номенклатури хемијски назив *RDX*-а је 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазинан. Прва синтеза је извршена 1899. године у Њемачкој од стране Хенинга при чему је кориштен у медицинске сврхе. Као потенцијални експлозив предложен је 1920. године од стране Херца који је радио на развоју поступка производње с обзиром на то да је принос продуката хемијске реакције био веома низак. Помак је урађен 1925. године од стране Хала у Енглеској (компанија *Picatinny Arsenal*) гдје је постигнути ниво приноса износио 68%. Даљи развој у производњи је постигнут 1940. године када су Рос и Чизлер развили нову методу синтезе док је Бачмен постигао максимални степен приноса продуката реакције. *RDX* добијен Бачменовим поступком је назван *RDX* типа Б и садржавао је 8–12% нечистоћа. Из ових нечистоћа је касније развијен експлозив под називом октоген. *RDX* су веома интензивно користиле све стране за вријеме Другог свјетског рата (мјесечна производња у САД је износила око 15 000 тона а у Њемачкој 7000 тона).

<sup>39</sup> За откриће октогена (енг. *1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazoktan, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>N<sub>8</sub>O<sub>8</sub>*) 1941. године је заслужан Бачмен који је модификацијом методе синтезе *RDX* произвео октоген. Намјена октогена и смјеса са октогеном је претежно у војне сврхе.

материја сличних карактеристика<sup>40</sup> међу којима се налазе експлозивне материје са високим садржајем нитрата (енг. *High nitrogen content – high energy materials, HNC-HEMs*)<sup>41</sup>. Потребне произашле из различитих начина производње, употребе и кориштења довеле су до развоја такозваних енгл. „*melt casting*” експлозивних материја, односно експлозива које карактерише нижа температура топљења те могућност употребе поступка ливења приликом кориштења експлозивних материја<sup>42</sup>. Развојем војне технике и борбених система услед високе осјетљивости погонских енергетских (експлозивних) материја на бази нитроглицерина и нитроцелулозе појавила се потреба за новим експлозивним материјама које карактерише смањење ризика од неконтролисаних намјерне или ненамјерне активације а, самим тим, и смањење од ризика евентуалних акцидентних ситуација. У складу са тим се приступило развоју погонских експлозивних материја (пропеланти) познатим под називом муниција слабе угрожености (енгл. *low vulnerability ammunition, LOVA*). Такође, осјетљивост главних експлозивних пуњења у различитим врстама муниције, односно, секундарних експлозива кориштених у ту намјену довеле су до истраживања везаних за развој нове класе експлозивних материја, које карактерише висока термостабилност и низак ниво осјетљивости на механички удар, под називом неосјетљиве високоексплозивне материје (енгл. *insensitive high explosives, IHEs*)<sup>43</sup>. Као једно од првих рјешења

---

<sup>40</sup> Групи експлозивних материја побољшаних карактеристика густине и брзине детонације припадају N,N'-бис(2,4-динитробензофуросан)-1,3,5-тринитро-2,6-диаминобезен произведен 1993. године); 5,7-диамино-4,6-динитробензофуросан (енг. *DADNBF*, 1990 год.); N,N',N"-трис(2-нитробензодифуросанил)меламин 1994. год.); *SF<sub>5</sub>CH<sub>2</sub>COOCH<sub>2</sub>C(NO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>*, *SF<sub>5</sub>CF<sub>2</sub>CF<sub>2</sub>CF<sub>2</sub>SF<sub>5</sub>*, *(SF<sub>5</sub>)<sub>2</sub>NCF<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>SF<sub>5</sub>* 1990. године); 1,3,4,6-тетранитроглуколурил (енг. *TNGU, Sorguyl*, 1975. године); тетранитропропанедиуреа 2,4,6,8-тетранитро-2,4,6,8-тетразабицикло[3.3.1]нонан-3,7-дион (енг. *TNPDU*, 1991. године); 2,5,7,9-тетранитро-2,5,7,9-тетразабицикло[4.3.0.]нонан-8-он (енг. *K-56, TNABN*, 2001. године); 1,3,5,5'-тетранитрохексахидропиримидин (енг. *DNNC*), октанитрокубан (енг. *ONC, octanitrocubane*, 1964 год.); дихидроксиламонијум 5,5-бис-тетразол-1,1-диолат (енг. *TKX – 50*, 2012. године); 4,10-динитро-2,6,8,12-тетраокса-4,10-диазавурцинат (енг. *TEX*, 1990. године); биснитраминотриазон (енг. *DNAM*, 1951. године); 1-оксид-3,5-динитро-2,6-пиразинединамин-1-оксид (енг. *LLM-105*); 3,3 диаминоазокси фуразан (енг. *DAAF*); триацетон пероксид (енг. *TATP*);

<sup>41</sup> Групи експлозивних материја са високим садржајем нитрата припадају диаминоазобистетразин (енг. *DAATz*, 2002. године); 1,4-дихидразин тетразин (енг. *DHTz*, 1998. године); амонијум-азотетразолате (енг. *AAT*);

<sup>42</sup> Топливо ливени (енг. *melt castable*) експлозивни су експлозивне смјесе које карактерише нижа температура топљења при чему материје прелазе у течно стање одређеног вискозитета без термичке разградње (горења или детонације). Као такве могу се лијевати и са снижењем температуре прелазе у чврсто стање. Првобитно је пикринска киселина употребљавана за лијевање у артиљеријску муницију да би је замијенио *TNT*. Вршена су испитивања различитих врста експлозивних материја са циљем побољшања тражених карактеристика У ову групу спадају 2,4,6-трис(2-нитроксиетилнитроамин-1,3,5-триазин (енг. *Trix-X*, 1993 год.) и метил трикс-икс (енг. *Methyl Trix-X*, 1993. године), 1,3,3-тринитроазетидин (енг. *TNAZ*, 1983. године), 4,4-динитро-3,3бифуразан (енг. *DNBF*, 1968. године), аналог нитрофуразанала 1996. године).

<sup>43</sup> У новоразвијене експлозивне материје ових карактеристика се сврставају осим *TATB*-а и *TACOT*-а, 7-амино-4,6-динитробензофуросан (енг. *ADNBF*, 1984. године), 3-нитро-1,2,4-триазол-5-он, оксинитротриазол (енг. *NTO, ONTA*, 1989. године), 1,4-динитроглуколурил (енг. *DINGU*, 1985 год.), 5-нитро-4,6-бис(5-амино-3-нитро-1Н-1,2,4-триазол-1-ил) пиримидин (енг. *DANTNP*, 1987 год.), транс-1,4,5,8-тетранитро-1,4,5,8-тетразадекалин (енг. *TNAD*, 1983 год.), 5-амино-3-нитро-1Н-1,2,4-триазол (енг. *ANTA*).

представљала је нова класа експлозива позната под називом пластични експлозив (енг. *plastic bonded explosives, PBX*)<sup>44</sup>. Међу најпознатије пластичне експлозиве се убраја семтекс који је произведен 1950. године у Чехословачкој под називом семтин а након тога добио назив семтекс (енг. *semtex*). Индустијска производња семтекса је отпочела 1964. године. Индустијска производња широко примјењиваног пластичног експлозива под називом енг. *C-4* је почела 1958. године<sup>45</sup>. Имајући у виду да кориштење инертних везива и пластификатора смањује експлозивне карактеристике пластичних експлозива, развој ове класе експлозива се огледао у изналажењу тзв. енергетских везивних материја и пластификатора<sup>46</sup>. Такође су развијене многобројне експлозивне смјесе пластичних експлозива при чему новонастали експлозив посједује различите карактеристике у односу на материје од којих је сачињен. Посебно се истичу смјесе различитог састава на основу *TATB*-а, *CL-20*-а, *NTO*-а<sup>47</sup> као и нове класе пластичних експлозива развијених у Енглеској (*ROWANEX PBX*, 1995. године) и Француској (*SNPE's PBX*, фра. *Societe Nationale des Poudres et Explosifs, France*, 1995. године)<sup>48</sup>. Пластични експлозиви који показују значајан потенцијал као „муниција слабе угрожености” развијени су у Шведској под називом *FOI* класа експлозива<sup>49</sup> док су експлозивне материје сличних карактеристика произведене у САД и имају назив *PAX*

---

<sup>44</sup> Под називом пластични експлозив сматра се смјеса прашкасте експлозивне материје и полимерног везивног средства са додатком и без додатка пластификатора. Први пластични експлозив под називом желинит (енг. *gelignite*), 1875. године је произвео Алфред Нобел.

<sup>45</sup> *C-4* или композиција *C-4* представља варијанту различитих пластичних експлозива познатих под називом композиција *C*. Пластични експлозив сличних карактеристика британске производње носи назив *PE-4* (енг. *plastic explosive No. 4*). Оригиналну композицију су развили Британци за вријеме Другог свјетског рата да би увођењем у употребу у Америчку војску добио назив композиција *C*. Године 1943. замијењена је са композицијом *C-2* а 1944. године са композицијом *C-3*. У Лос Аламос националној лабораторији, 1952. године је развијена композиција *C-4*.

<sup>46</sup> Развијен је велики број инертних везива и пластификатора као што су полиестри, епоксиди, полисулфиди и полуретани. Међу најзначајније се истиче хидрокси терминирани полибутadiен (енг. *hydroxy - terminated polybutadiene, HTPB*). Групи новоразвијених енергетских везива припадају поли 3,3-бис(азидометил оксетан) (енг. *[poly(BAMO)]*), поли (3-азидометил-3-метил оксетан) (енг. *[poly(AMMO)]*), полинитрофенилен (енг. *PNP*), глицил азид полимер, диол, триол (енг. *GAP*, 1972 год.) нитрирани хидрокси терминирани полибутadiен (енг. *nitrated HTPB, (NHTPB)*), поли (3-нитрометил-3-метилоксетан) (енг. *poly(NiMMO)*), поли (глицил нитрат) (енг. *poly(GlyN)*), нитрирани циклодекстрин полимер (енг. *CDN*, 1992 год.). Групи пластификатора припадају деривати алкилнитратоетилнитрамина (енг. *NENA*), етиленгликолдинитрат (енг. *EGDN*), метриолтринитрат (енг. *MTN*), бутан-1,2,4-триолтринитрат (енг. *BTTN*).

<sup>47</sup> *NTO* (енг. *ONTA*) – нитротриазолон, 3-нитро-1,2,4-триазол-5-он откривен је 1905. године а испитивања експлозивних карактеристика су вршена 1980. године.

<sup>48</sup> Рованекс пластични експлозиви су развијени у сагласности са НАТО стандардом *STANAG 4170*. У *SNPE's* класу пластичних експлозива се сврставају експлозиви (експлозивне смјесе) са ознаком *B*, (*B2211, B2214, B2237, B2245, B2248, B3021*).

<sup>49</sup> Шведска агенција за одбрамбена истраживања (енг. *SDRA*) и компанија Бофорс (енг. *Bofors*) су развили нову класу пластичних експлозива од којих се истичу 1,1-диамино-2,2-динитроетилен (енг. *FOX-7, DADE/DADNE*, 1998 год.) и Н-гуанилуреа динитрамид (енг. *FOX-12, GUDN*, 2002 год.).

серија експлозивних смјеса<sup>50</sup>. Развој иницијалних експлозива је резултирао развојем више врста примарних (иницијалних) експлозивних супстанци побољшаних карактеристика<sup>51</sup>. Напредак у области технологије производње експлозива је постигнут увођењем поступка нитрирања помоћу диазот-пентоксида који је замијенио до тада конвенционална средства за нитрирање а на основу истраживања проведених у Великој Британији 1992. године. Развој нових борбених техничких система и уређаја као што су тзв. волуметријска оружја<sup>52</sup> чије поткласе представљају термобарични експлозиви (енг. *TBX, thermobaric explosives*)<sup>53</sup>, експлозиви појачане експлозије (енг. *EBX, enhanced blast explosives*)<sup>54</sup> и аеросолних експлозива (енг. *FAE, Fuel-Air Explosive*)<sup>55</sup> узроковало је развој експлозивних материја које задовољавају специфичне захтјеве наоружања и муниције у зависности од њихове намјене. Осим примјене у војне сврхе, током развоја, експлозивне материје су истовремено кориштене и у цивилне намјене. Међу значајнијим експлозивима ове врсте се убрајају АНФО експлозиви<sup>56</sup> и термитне

---

<sup>50</sup> *PAX* формулације представљају смјесу *DNAN*-а, *NTQ*-а, *NQ*-а, *RDX*-а, *HMX*-а и посједују ознаке *IMX*, *PAX*, *OSX*. Први записи везани за примјену *DNAN*-а (енг. *2,4-Dinitroanisole*) везани су за кориштење као експлозивног пуњења бојевих глава њемачких „летећих бомби” (ракете, фау – 1, V-1) у Другом свјетском рату.

<sup>51</sup> У ову групу експлозива сврставају се основни оловни азид (енг. *BLA, [3Pb(N<sub>3</sub>)<sub>2</sub>PbO*); хексакис(азидометил) бензен (енг. *HAB*); 1-(5-цијанотетразолат) пентамин кобалт (III) перхлорат (енг. *CP*); тетраамин-цис-бис(5-нитро-2Х-тетразолато-Н<sub>2</sub> кобалт (III) перхлорат (енг. *BNCP*, 1986 год.); никл хидразин нитрат (енг. *(NHN, [[Ni(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>](NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]*, 1975. године); 1,4-динитрофуразано [3,46] пиперазин (1985 год.); 4,4,2-динитро-3,3,2-диазенофуросан (енг. *DNAF/DDF*, 1998. године); гванидиниум азотетразолате (енг. *GAT*); триаминогванидијум азотетразолате (енг. *TAGAT*); 3,6-бис(нитрогванил)-1,2,4,5-тетразин (1998. године); бис(триаминогванидиниум) со, угљик дихидразид бис[3-(5-нитроимино-1,2,4-триазолате)] (енг. *CBNT*, 2010. године); живин-5-нитротетразол (енг. *MNT*, 1976. године), жељезни и бакарни комплекс (енг. *[cat]2 + [MII(NT)4(H<sub>2</sub>O)2 ] ([cat]<sup>+</sup> = NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>; M = Fe, Cu; NT = 5-nitrotetrazolate*, 2006. године); бис(1-метил-5-нитриминотетразолат (2007. године), бакар(I) 5-нитротетразолате (енг. *DBX-1*); калијум-7-хидрокси-6-динитробензофуросан (енг. *KDNP*); калијум 1,1-динитроамино-5,5-бистетразолате (енг. *K<sub>2</sub>DNABT*, 2014. године); бакар(II) 5-хлоротетразолат (енг. *Cu CIT*); диазидоглиоксим (енг. *DAGL*); триазин триазид (енг. *TTA*).

<sup>52</sup> Оружја која користе експлозивне материје просторног дејства чије су карактеристике способност стварање тзв. детонационог облака (велике ватрене лопте, енгл. *fire ball*) и високе вриједности експлозивних карактеристика.

<sup>53</sup> Термобарични експлозиви представљају експлозивне смјеше израженијег термичког и разорно рушећег ефекта (енг. *blast effect*) у односу на конвенционалне експлозиве. Њемачка војска, за вријеме Другог свјетског рата је прва примјењивала експлозивне смјеше која су посједовала карактеристике термобаричних експлозива (оружје Тајфун на бази угљене прашине и концентрованог кисеоника).

<sup>54</sup> Експлозивни састави повећаног фугасног дејства (способност експлозива да експлозијом изврши рад у затвореном и зачепљеном простору, испољава се разбијањем и одбацивањем средине која окружује експлозив у моменту експлозије).

<sup>55</sup> Течне аеросолне (распршене чврсте честице или капљице текућине чији је пречник мањи од 1 микрометра у гасовитој фази) смјеше. Развој и употреба ових класа експлозивних материја интензивно почиње 1960-их година у САД и СССР-у. Кориштење почиње за вријеме Вијетнамског рата (1955–1975) као и у току сукоба у Чеченији (1994–1996).

<sup>56</sup> Развијен 1950. године, водоотпоран и садржавао је само амонијум-нитрат. Убраја се у терцијарне експлозиве (имају назив и разарајући агенси, посједују велику неосјетљивост на иницирање, односно не могу се поуздано иницирати стандардним примарним експлозивима). Од 1970. године додатком алуминијума у праху и монометиламина нитрата се производе експлозиви који се лакше детонирају.

материје<sup>57</sup>. Развој технологије, односно технолошких поступака и процеса кориштених приликом обраде експлозивних материја, као и специфичности захтјева употребе у војне и цивилне намјене проузроковале су развој различитих поступака производње и употребе високоенергетских материја. Осим процеса производње ливених и пресаних експлозива развијени су поступци за производњу желатинизираних тзв. слури (енг. *water gel/slurry explosive*) експлозива<sup>58</sup> и емулзионих експлозива<sup>59</sup>. Откриће и истраживање наночестица<sup>60</sup> су послужила као основ за истраживање и примјену експлозивних наночестица као и кокристалних експлозива<sup>61</sup>. Савремени развој рачунарске технике је значајно убрзао процес изналажења нових експлозивних материја путем могућности моделовања и теоретских испитивања нових експлозивних супстанци на основу савремених софтверских програма (програми се заснивају на познатим резултатима експерименталних истраживања)<sup>62</sup> при чему поједина испитивана једињења још увијек нису синтетизирана у лабораторијама. У данашње вријеме истраживања везана за компјутерско моделовање наночестичних експлозивних материја како неорганских тако и органских материја имају експоненцијалан тренд раста [17]. Истраживања и развој нових експлозивних материја различитих карактеристика и намјене су и даље веома актуелни и интензивно се проводе широм свијета.

---

<sup>57</sup> Термитне материје представљају пиротехничке смјеше металног праха и оксида метала. Карактерише га развијање велике количине топлоте и високе температуре у кратком времену на ограниченом простору. Термитна реакција је откривена 1893. године а патентирана 1895. године од стране Голдшмита. Први пут је кориштена 1899. године за заваривање жељезничких шина у Њемачкој. Војна примјена почиње за вријеме Другог свјетског рата. Сврстава се у тзв. термичка оружја као што су напалм, магнезијумов прах, хлорин трифлуорид и бијели фосфор. Састави обogaћени оксидансима на бази анорганских соли (баријев нитрат или пероксид) називају се термати које карактерише развој пламена и гасова приликом горења.

<sup>58</sup> Желатинозни (мекана, еластична физичка форма) водени раствор који садржи оксиданс и гориво.

<sup>59</sup> Први емулзиони експлозив је израђен 1964. године од стране Игла и Некера. Стабилни емулзиони експлозив под називом акварам (енг. *aquaram*) је развио Блум 1969. године. Клеј је 1978. године, додатком ANFO-а у емулзиони експлозив, произвео први разарајући емулзиони експлозив.

<sup>60</sup> Термин нанотехнологија први је увео Танигучи 1974. године имајући у виду визионарска размишљања Фејман из 1959. године. Наночестице се сматрају честице чија величина износи 1–100 нанометара (0,000000001- 0,00000001 метара)

<sup>61</sup> Појам „кокристал” (енг. *cocrystal*) уведен је деведесетих година ради описивања молекулских кристала који су садржавали више од једне врсте молекула у смислу хемијског састава. Кокристали представљају вишеккомпонентне чврсте материје које настају из двије или више различитих хемијских врста од којих свака посједује стабилну чврсту форму при стандардном притиску и собној температури.

<sup>62</sup> Примјеном теорије линеарне комбинације атомских орбитала (LCAO), теорије функционалне густине (DF theory) и густине стања (DOS-density of state) те молекулске динамичке симулције (енг. *molecular dynamics simulation, MD*) развијени су различити софтверски програми помоћу којих су симулиране експлозивне супстанце и одређиване експлозивне карактеристике.

## 2. ЕНЕРГЕТСКЕ МАТЕРИЈЕ (МАТЕРИЈЕ СА ВИСОКОМ ЕНЕРГИЈОМ, ЕКСПЛОЗИВИ)

### 2.1. Појам енергетских материја

Кроз дугу историју употребе и развоја, настао је веома широк спектар експлозива (експлозивних материјала) у смислу намјене и кориштења са различитим физичко-хемијским и експлозивним карактеристикама при чему су групе експлозивних материјала сличних карактеристика и намјене добијали своје називе. Све врсте експлозивних материјала су се називале заједничким именом експлозиви (енг. *explosives*). Ријеч експлозив потиче од латинске ријечи *explosivus* и представља општи назив за све материје које имају својство да се распрскавају уз пуцањ [18] Упоредо са историјским развојем материја са експлозивним карактеристикама се мијењао и појам који се користио у јавности, стручној и научној литератури.

Појам енергетски материјали (енг. *energetic materials, Ems*) или материјали са високом енергијом, односно, високоенергетске материје (енг. *high energy materials, HEMs*) новијег је датума и представља заједнички назив у ширем смислу који обухвата експлозиве, пропеланте и пиротехничке материје. Поједини аутори сматрају да појам енергетски материјали не представља одговарајући назив, односно поставља се питање да ли се на експлозиве и пропеланте може односити термин високоенергетски материјали. Појашњење се може приказати поређењем одређених карактеристика стандардне материје која се користи за добијање топлотне енергије као што је угаљ са експлозивном супстанцом под називом октоген (енг. *HMX*). У табели 1 су приказане вриједности ослобођене количине топлоте сагоријевањем угља, односно, експлозије *HMX*-а, вријеме сагоријевања, односно, експлозије и снага ослобођене енергије у процесу горења, односно, експлозије.

Табела број 1. Карактеристике за 1 грам угља и *HMX*-а [19]

Карактеристика	Угаљ (1 грам)	<i>HMX</i> (1 грам)
Развијена количина топлоте	7000 калорија	1355 калорија
Вријеме (горења/експлозије)	60 секунди	10 <sup>-6</sup> секунди

---

Снага	488 вати	5.6 x 10 <sup>9</sup> вати
-------	----------	----------------------------

---

Видљиво је да 1 грам угља развија далеко већу количину топлоте (топлотне енергије) у односу на 1 грам експлозива. На основу овог податка, може се поставити питање кориштења термина високоенергетски материјали када се говори о експлозивима. Са друге стране, вријеме за које се одиграва процес експлозије је неупоредиво краће у односу на вријеме сагоријевања угља. На основу дефиниције појма снага<sup>63</sup> долази се до чињенице да експлозив посједује неупоредиво већу снагу у односу на угљ, односно, енергију<sup>64</sup>. На наведеном примјеру може се уочити разлика између класичних горива (енергената) као што су дрво, угљ, нафта и сл. и експлозивних (високоенергетских) материја. Критеријуми и методе одређивања који дефинишу припадност експлозивним материјама су приказани у дијелу Карактеристике енергетских материја (поглавље 3).

## 2. 2. Дефиниција енергетских материја

Не постоји јединствена општеприхваћена дефиниција појмова енергетски материјали, односно експлозиви. Различити аутори презентују већи број различитих дефиниција. Поједине, чешће кориштене дефиниције појма енергетски материјали су:

- Материјали који посједују висок ниво хемијске енергије унутар молекулских структура, која се процесима горења или експлозије ослобађа у виду велике количине гасова са веома високим температурама и притисцима представљају класу једињења под називом енергетски материјали (експлозиви, горива, пиротехничке материје) [19].
- Енергетске супстанце се дефинишу као једињења или смјеше супстанци које садрже гориво и оксидансе те лако реагују уз ослобађање енергије и гаса (према ASTM-у (eng. *American Society for Testing and Materials*) [20].

---

<sup>63</sup> Снага (ознака  $P$ ) јесте физикална величина која описује брзину обављања механичког рада, односно, представља однос количине рада и времена утрошеног за тај рад.

<sup>64</sup> Кад би се комад угља самљео у прашину, контактна површина угља с зраком (кисеоником) би се значајно повећала а вријеме сагоријевања значајно смањило. У случају довољно уситњених честица угља (угљена прашина) диспергованих у зраку, у контакту са кисеоником, инициране, понашају се као експлозив (несреће приликом подземне експлоатације угља у рудницима).

Када је ријеч о појму експлозивни, различити аутори су приказали више различитих дефиниција појма експлозивни (експлозивне материје):

- Експлозив је хемикалија или смјеса хемикалија које, када су на одговарајући начин иницирани, могу реаговати тако брзо и са таквим ослобађањем енергије да могу постојати оштећења околине [19].
- Експлозивне материје се могу дефинисати као хемијски системи (једињења и смјеше), релативно стабилни, који су способни да под дејством спољних утицаја (удар, трење, топлота) врло брзо пређу у стабилније стање, при чему се ослобађа велика количина топлоте и гасова сабијених под великим притиском, а који су у стању да у процесу експлозије, у врло кратком времену, остваре велике разорне ефекте над околином [3].
- Под појмом експлозив се сматра хемијско једињење или хомогена мјешавина хемијских једињења који су у стању да за веома кратко вријеме развију велику количину гасова загријаних на високу температуру [21].
- Експлозивни су хемијски спојеви или смјесе који детонирају под дјеловањем вањског импулса, који може бити механички, топлотни или експлозивни [22].
- Експлозив је материја која, када се прикладно активира, ослобађа велику количину топлоте и притиска помоћу врло брзе самоодрживе егзотермне реакције распадања. Генерисана температура је у опсегу 3000–5000°C и произведени гасови шире се 12 000–15 000 пута у односу на почетну запремину. Цијели феномен се одвија у неколико микросекунди, праћен ударом и јаком буком [13].
- Експлозив је хемијска супстанца или смјеша хемијских материја које се излагањем топлоти, механичком удару, детонацији или катализи веома брзо распада што је праћено настанком велике количине енергије. Ослобађа се велика запремина гасова, знатно већа од почетне запремине експлозива [13].
- Експлозив је материја или уређај који продукује, након ослобађања потенцијалне енергије, нагло избијање гаса притом стварајући притисак на околину [13].

Видљиво је да се заједничка карактеристика наведених дефиниција односи на ослобађање велике количине енергије у виду високе температуре и велике количине (запремине) гасова у кратком временском периоду.

### **2. 3. Подјела (класификација) енергетских материја**

Имајући у виду да енергетске материје посједују више различитих физичко-хемијских карактеристика те подручја и начина примјене, класификација се може вршити на основу различитих критерија. Најчешће кориштени критеријуми за класификацију енергетских материја су [13]:

- област примјене
- агрегатно стање, конзистенција
- природа експлозивног процеса
- хемијски састав (експлозофора)
- молекулска структура

#### **2. 3. 1. Класификација енергетских материја на основу области примјене**

На основу области примјене, подјела енергетских материјала се врши на:

- енергетске (експлозивне) материје које се користе за цивилну употребу (цивилни експлозиви),
- енергетске (експлозивне) материје које се користе за војну употребу (војни експлозиви).

Појам цивилне експлозивне материје, односно, цивилни експлозиви представља енергетске материјале који посједују специфичне карактеристике, у зависности од намјене, који се користе у различитим областима људског дјеловања. Подјела цивилних експлозива се може вршити на:

- привредне експлозиве
- експлозиве који се користе у свемирским технологијама

- експлозиве који се користе у медицини
- војне експлозиве који се користе у цивилне сврхе.

Привредни експлозивни су експлозивне материје које су нашле примјену у различитим привредним областима као што су рударство, грађевинарство, пољопривреда, индустрија нафте и гаса, метална индустрија и индустрија обраде метала<sup>65</sup>, индустрија хране и аутомобилска индустрија. Рударски експлозивни представљају групу енергетских материја који се употребљавају приликом подземне (рударске јаме) и надземне експлоатације угља (отворени копови), као и различитих минералних сировина<sup>66</sup>. Најчешће кориштене експлозивне материје су црни барут, динамити, АНФО-сухе експлозивне смјесе и „slurry” експлозивни.

---

<sup>65</sup> У металној индустрији и индустрији обраде метала се употребљавају претежно војни експлозивни одговарајућих карактеристика.

<sup>66</sup> Минарање у рударству подразумијева контролисано кориштење експлозивних материја у циљу ископавања (одвајања), разбијања или уклањања чврстих материјала који се налазе у компактном слоју земљишта. Приликом употребе на отвореним коповима угља најчешће кориштени метод употребе носи назив „систем дугих зидова” (енг. „long wall system”). Приликом подземне експлоатације угља користе се термостабилни и емулзиони експлозивни. Употреба експлозива се спроводи под посебним мјерама сигурности и контроле ради могућег присуства метана који са ваздухом ствара експлозивну смјесу.



Слика број 3. Подјела цивилних експлозива према намјени

Осим примјене у рударству, ове експлозивне материје имају своју примјену у грађевинарству приликом изградње саобраћајница, тунела, хидротехничких објеката те рушења и уклањања различитих земљишних и других објеката<sup>67</sup>.

<sup>67</sup> Пробијање усјека, тунела, уклањање већих земљаних и стијенских објеката, израду канала, рушење објеката предвиђених за уклањање и сл. За рушење се такође користи тзв. тихи експлозив под називом аконекс (енг. *Acconex*) који представља посебну врсту експандирајућег цемента. Мијешањем цемента са водом те налијевање настале каше у припремљене отворе након 24–72 сата усљед ширења масе долази до нарушавања конструкције објекта који се руши.

Кориштење експлозива у пољопривреди обухвата „чишћење” пољопривредног земљишта уклањањем већих стијена, пањева, дрвећа те у сврху мелиорације земљишта<sup>68</sup>. Употреба се такође огледа у кориштењу противградних ракета као и за задимљавање у циљу повећања температуре на одређеној микролокацији (спречавање мржњења).

У индустрији нафте и гаса експлозивне материје се користе приликом различитих фаза експлоатације сирове нафте и гаса као што су сеизмичка истраживања, поступак перфорације и напуштања бушотине<sup>69</sup>. За ове намјене користе се експлозиви на бази октогена (енг. *НМХ*) и 2,6-бис(пикриламино)-3,5-динитропиридина (енг. *РУХ-а*) као експлозивно пуњење.

Међу савременије технолошке поступке који се примјењују у металној индустрији и обради метала сврставају се и методе и технике при којима се употребљавају експлозивне материје. Спајање металних облога са основним материјалом (енг. *cladding*) и заваривање (енг. *welding*)<sup>70</sup> заснива се на високој енергији удара коју прати висока температура и притисак усљед чега долази до формирања веза међу молекулама материјала који се спајају. Ова метода се користи за израду различитих металних конструкција и опреме.

Табела број 2. Примјена експлозивног заваривања [13]

Примјена	Врсте материјала које се спајају
Реторте за хемијску индустрију, на високим температурама	Бакар-нехрђајући челик
Контејнери за воду и нуклеарни отпад	Нехрђајући челик-никл/нискоугљенични челик

<sup>68</sup> Мелиорација (лат. *Meliorare*, поправити, побољшати) представља скуп мјера у циљу подизања физичких, хемијских и биолошких карактеристика земљишта и стварање и одржавање оптималног водно-ваздушног режима земљишта ради стварања услова за раст и развој узгајаних биљака у пољопривредној производњи.

<sup>69</sup> Сеизмологија (грч. *σεισμος*-потрес, *λογος*-наука) јесте грана геофизике која се бави проучавањем потреса и њихових попутних појава. Резултати сеизмичких истраживања се користе у истраживањима нафте и природног гаса (примијењена геофизика). Перфорација бушотине се врши постављањем експлозива на површини тла, тзв. обликованих набоја (енг. *shaped charges*) на мјестима за које се претпоставља да се у дубини испод налазе слојеви нафте или плина. Напуштање бушотине подразумијева активности које се проводе након затварања експлоатације (уклањање великих челичних конструкциј и слично).

<sup>70</sup> Спајање металне облоге са основним материјалом се примјењује приликом спајања различитих металних материјала чији је поступак спајања конвенционалним техникама отежан или веома захтијеван. Експлозивно заваривање се користи приликом спајања челика, титанијума, цирконијума и тантала.

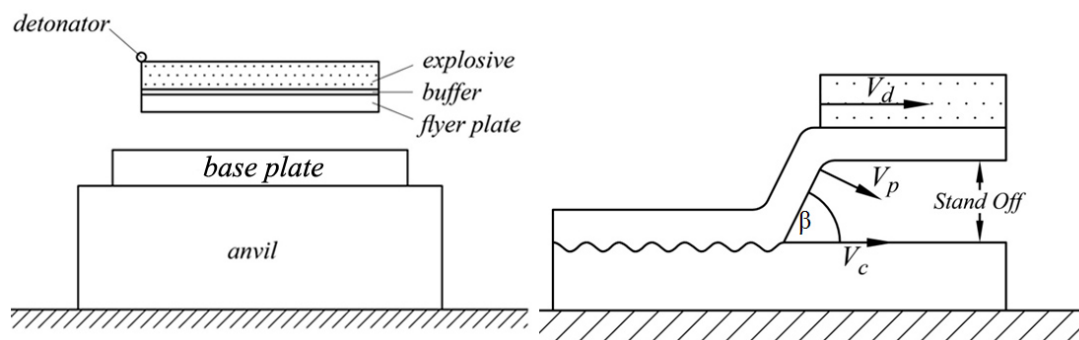
Посуде за обраду комуналних отпадних вода које садрже хлоридне јоне	Титанијум-нискоугљенични челик
Посуде за кухање с добрим термичким карактеристикама	Бакар-нискоугљенични челик Бакар-нехрђајући челик
Оклопне плоче двоструке тврдоће *	Оклоп-нискоугљенични челик Оклоп-алуминијум
Радне површине алата, фабричке опреме и возила које су у контакту са земљиштем и отпорне на корозију	Хастелој Б ** -нискоугљенични челик
Биметалне траке за термостате	$\alpha$ -месинг-инвар ***
Прикључак за уземљење уређаја за напајање електричном енергијом	Алуминијум-алуминијум Алуминијум-бакар
Транспортне шине	Бакарно-челични носачи електричних водова
Прикључци (електроопрема)	Сабирница-челик Челик-алуминијум
Формирање саћасте форме	Алуминијум-алуминијум
Измјењивачи топлоте	Титанијум-нискоугљенични челик Нискоугљенични челик-нискоугљенични челик

\* оклопне плоче на борбеним оклопним возилима (тенк, транспортер и слично)

\*\* трговачки назив (енг. *Hastelloy B*) за групу легура челика, никла и молибдена које су нарочито корозионо отпорне на хидрохлорне киселине (*HCl*)

\*\*\* легура никла и жељеза

Поступак заваривања металних дијелова помоћу експлозива шематски је приказан на слици 4.



Слика број 4. Типичан поступак експлозивног спајања/заваривања [23]

Најчешће кориштени експлозиви у поступку спајања/заваривања су нитрогванидин, аматол<sup>71</sup> и динамит који не садржи нитроглицерин (замијењен је са нитрошкробом (енг. *nitrostarch*)<sup>72</sup>). Експлозивно закивање се интензивно користи у авионској и ракетној индустрији. Посебно интересантна примјена експлозива се огледа кориштењем тзв. методе експлозивног стврдњавања при чему долази до побољшања физичких карактеристика метала (затезна чврстоћа, елонгација и слично). Експлозивно формирање<sup>73</sup> и експлозивно резање<sup>74</sup> су такође технолошки поступци приликом којих се користе експлозивне материје.

У индустрији хране примјену су нашле пиротехничке смјесе које се користе за производњу самозагријавајућих конзерви<sup>75</sup>.

Као примјер употребе експлозивних материја у аутомобилској индустрији може се навести кориштење натријум-азида, експлозивне материје која се користи за добијање довољне количине гаса у веома кратком времену за активирање заштитних ваздушних јастука у аутомобилима у случају саобраћајних удеса (судара).

Експлозивне материје су такође нашле примјену у области заштите и спасавања као што су уређаји и системи који се користе за спасавање подводних пловних објеката (подморница и слично) те средстава која се користе приликом гашења пожара већих размјера (енг. *Solid Propellant Fire-Extinguishing Technology, SPFE*).

Подјела привредних експлозива се може извршити и на основу експлозивних особина употребљаваних енергетских материјала.

---

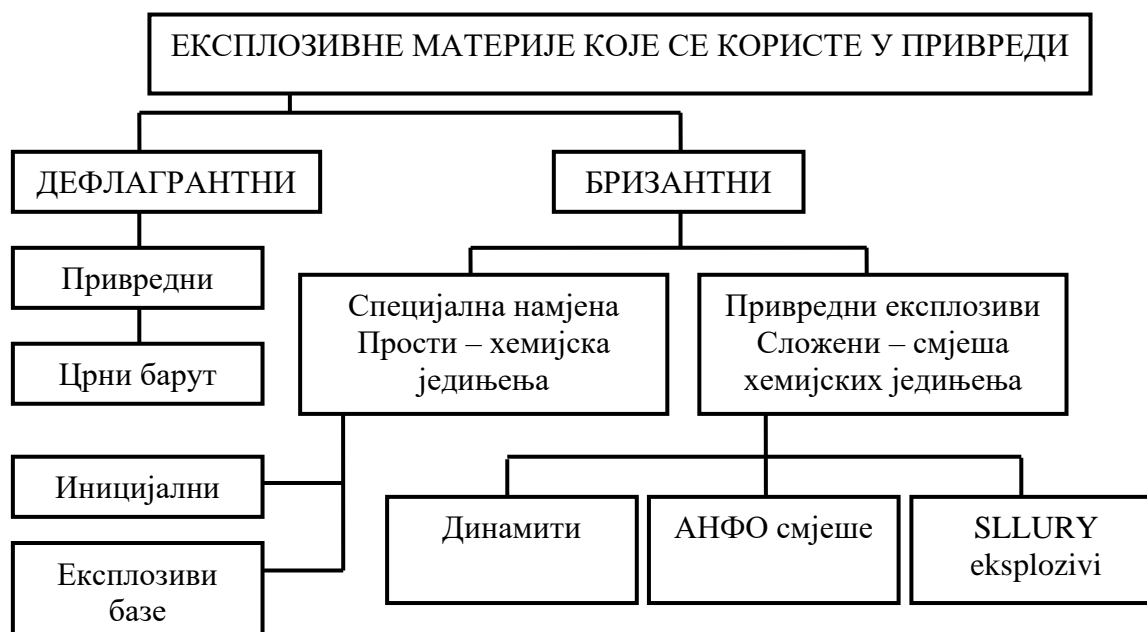
<sup>71</sup> Секундарна експлозивна смјеса тринитротолуена (*TNT*) и амонијум-нитрата.

<sup>72</sup> Секундарни експлозив сличан нитроцелулози произведен поступком нитрирања шкроба са смјесом сумпорне ( $H_2SO_4$ ) и азотне киселине ( $HNO_3$ ).

<sup>73</sup> Експлозивно формирање се користи за израду веома великих металних позиција или позиција специфичног геометријског облика.

<sup>74</sup> Експлозивно резање се користи за раздвајање материјала када се не захтијева прецизност. Најчешће се користи тзв. флексибилна линеарна пуњења (енг. *Flexible linear shaped charges, FLSCs*).

<sup>75</sup> Пиротехничка смјеса састава 50% калцијум-силиката ( $CaSi_2$ ) и 50% жељезног оксида ( $Fe_3O_4$ ).



Слика број 5. Подјела привредних експлозива према експлозивним карактеристикама [24]

Развој истраживања свемира је условио потребу за изналажењем и кориштењем одговарајућих високоенергетских материја које би задовољиле тражене карактеристике. Високоенергетске материје које се користе у свемирским технологијама су нарочито присутне у области погонских материја (пропеланата). Погонска ракетна горива представљају чврсти и течни композитни пропеленти<sup>76</sup>. Литературни извори такође наводе употребу хексанитростилбена (енг. *HNS*) [25] и 3,3/-диамино-2,2/,4,4/,6,6/-хексанитродифенила (енг. *DIPAM*) [26]. Различите високоенергетске материје новијег датума, показују значајан потенцијал као могући састојци композитних пропелената за будућа свемирска истраживања<sup>77</sup> [27].

Примјер употребе експлозивних материја у медицинске сврхе представља кориштење нитроглицерина који се већ дуже вријеме користи као лијек за срчане болеснике. У

<sup>76</sup> У састав чврстих пропелената улазе амонијум-перхлорат (оксидационо средство), пулверизовани алуминијумски прах, специјални адитиви и везива са горивом као што су поли(бутадие-акрилна киселина-акрилонитрил) (енг. *PBAN*), полибутадие са карбокси завршетком (енг. *CTPB*), полибутадие са ацетонским завршетком (енг. *LTPB*), полибутадие са хидрокси завршетком (енг. *HTPB*). Кориштени течни пропеленти су смјеше монометил хидразин (енг. *MMH*) – азотен тетраоксид ( $N_2O_4$ ), и несиметрични диметил хидразин (енг. *UDMH*) – азотен тетраоксид ( $N_2O_4$ ).

<sup>77</sup> Материје са високим експлозивним карактеристикама (енг. *CL-20*), термички стабилни експлозиви (енг. *TATB*, *PYX*, *BTDAONAB*), топљиво ливени експлозиви (енг. *TNAZ*, *Tris-X*), неосјетљиви експлозиви (енг. *NTO*, *DINGU*, *TNAD*, *ADNBF*), енергетска везива (енг. *GAP*, *Poly[NiMMO]*, *Poly[GlyN]*, *NHTPB*, *PNP*), енергетски пластификатори (енг. *BDNPA/F*, *Bu-NENA*) и еколошки оксиданси високих карактеристика (енг. *ADN*, *HNF*).

новије вријеме, правци истраживања се односе на употребу и других естара азотне киселине који показују одређене предности у односу на нитроглицерин.<sup>78</sup> Најновија испитивања могуће употребе високоенергетских материја се спроводе у области хирургије<sup>79</sup> и антиканцерогених супстанци<sup>80</sup>.

Различити војни експлозивни се користе и у цивилне сврхе. Примарни (иницирајући) експлозивни који су развијени за војне потребе у сврху израде детонатора се примјењују у цивилне сврхе као компонента детонирајућих каписли. У великој мјери се користио тзв. сервисни оловни азид (енг. *Service lead azide, SLA*) који је због ограничења замијењен са тзв. базичним оловним азидом (енг. *basic lead azide, BLA*)<sup>81</sup>. За потребе војног ваздухопловства<sup>82</sup> су развијена тзв. линеарна флексибилна пуњења (енг. *Flexible linear shaped charge, FLSCs*) која су нашла примјену и у цивилном сектору. На великом надморским висинама (преко 3000 м) кориштење класичних горива не задовољава из разлога отежаног паљења, слабијег сагоријевања (мања концентрација кисеоника), односно, смањења топлотне моћи и веома ниских температура околине. У циљу добијања горива одговарајућих карактеристика, развијено је чврсто тзв. гориво за велике висине (енг. *High Altitude Fuel*) које је по свом саставу композитна смјеша дрвене прашине и ацетоном обрађеног двобазног пропеланта<sup>83</sup>. Хемијска смјеса која садржи калијев супероксид<sup>84</sup> унутар затвореног простора ослобађа кисеоник и истовремено апсорбује угљен-диоксид одржавајући на тај начин задовољавајућу концентрацију кисеоника потребну за дисање у затвореном простору без дотока

---

<sup>78</sup> Дејство нитроглицерина се огледа у ширењу крвних жила а с тим и смањењем крвног притиска. Проводе се испитивања могуће употребе еритритол тетранитрата, манитол хексанитрат, енг. *PETN*-а и других деривата нитроглицерина сличних карактеристика. Карактерише их спорија асимилација у организам што доводи до успоренијег и дуготрајнијег дејства.

<sup>79</sup> Употреба микроексплозивних пуњења за разбијање камена у бубрезима, формирање костију, у терапији рака за побољшање хемотерапијских ефеката, циљана испорука лијекова.

<sup>80</sup> Октанитрокубан је показао значајне антиканцерогене карактеристике.

<sup>81</sup> Старењем хидразонска киселина у контакту са бакарним цјевчицама које се налазе у конструкцији детонатора формира осјетљиви бакарни азид.

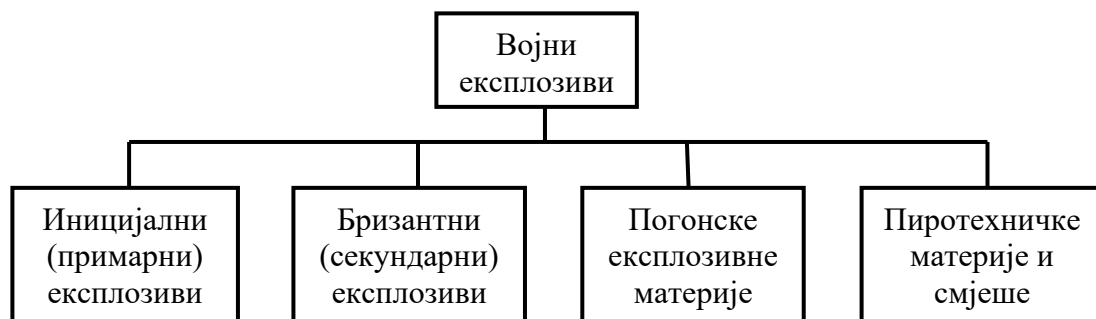
<sup>82</sup> Савремене борбене авионе карактерише велика брзина кретања а што условљава техничке особине система за принудно напуштање (одвајање пилотских кабина, катапултирање сједишта и слично). За одвајање пилотских кабина користи се смјеша на бази хексогена (енг. *RDX-a*).

<sup>83</sup> ДБ пропелант (енг. *Double-base, DB propellants*) се састоји од двије монопропелантне компоненте горива гдје једна дјелује као високоенергетски монопропелант, а друга дјелује као нискоенергетски монопропелант који врши стабилизацију. Типични састав је нитроглицерин отопљен у нитроцелулозном гелу и помоћу додатака преведен у чврсту форму.

<sup>84</sup> Калијев супероксид, хемијска формула  $KO_2$ , у контакту са водом, киселинама, органским материјама доводи до експлозије.

вањског ваздуха. Примјењује се за потребе људских посада у свемирским летовима и подморницама.

Војни експлозиви (експлозивне материје) представљају групу високоенергетских материја које се употребљавају у војне сврхе. Захтијеване физичко-хемијске и експлозивне карактеристике експлозивних материја за примјену у војне сврхе се значајно разликују од карактеристика експлозивних материја намијењених за цивилну употребу. Тражене особине се односе на способност развијања максималне снаге по јединици запремине, велику брзину детонације, високу термичку стабилност у неповољним условима складиштења те неосјетљивост на удар и трење. Имајући у виду развој различитог војног наоружања различите намјене, високоенергетске материје у војне сврхе имају веома широку употребу у зависности од намјене борбених система у којима се користе експлозивне материје. У ширем смислу, класификација експлозива који се користе за војне сврхе се може извршити на иницијалне (примарне) експлозивне материје, бризантне (секундарне) експлозивне материје, погонске (барути и ракетна горива) експлозивне материје и пиротехничке смјеше (слика 6).



Слика број 6. Подјела енергетских материја (експлозива) у војне сврхе

Иницијалне експлозивне материје се користе као иницијатори, односно, иницијалне материје за покретање (побуђивање) експлозивних процеса у бризантним (секундарним) експлозивним материјама и процеса сагоријевања погонских високоенергетских материја.

Бризантне експлозивне материје се користе као пуњење за различита експлозивна средства (пјешадијска, артиљеријска, ракетна муниција, противпјешадијске, противоклопне и минобацачке мине, ваздухопловна и морнаричка муниција, за потребе

војно-инжењеријских радова). Ове материје су дизајниране за стварање фрагмената (шрапнела) и разарање и рушење различитих објеката, борбених и неборбених возила, оружја и оруђа као и постизање других ефеката на циљу. Осим претходно наведеног, ове врста експлозивних материја су нашле своју примјену и у конструкцији нуклеарног оружја. Употребљавају се за израду експлозивног сочива<sup>85</sup> као и материје за израду нуклеарног оружја имплозионог типа<sup>86</sup>.

*Табела број 3. Експлозивне материје и везивна средства која се примјењују у нуклеарном оружју [13]*

Назив	Примјена
Баријум-нитрат, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	Оксидационо средство за тешке метале који се користе у спорој експлозивној композицији (баратол)
Борна киселина, $\text{H}_3\text{BO}_3$	Инертни материјал који се користи у спорој експлозивној композицији (борацитол)
Оловни нитрат, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	Оксидационо средство за тешке метале који се користе у спорој експлозивној композицији (плумбатол)
1,3,5 тринитротолуен, TNT	Користи се као главни експлозив и такође дјелује као топиво везиво
Пентаеритритол-тетранитрат, PETN	Користи се као осјетљиво и снажно експлозивно средство у детонаторима
Хексоген, RDX	Снажан експлозив који се користи као главна високоексплозивна материја
Октоген, HMX	Веома снажан експлозив који се користи као главна високоексплозивна материја
Хексанитростилбен, HNS	Топлотно стабилан и релативно неосјетљив

<sup>85</sup> Експлозивно сочиво је уређај састављен од неколико експлозивних пуњења која су обликована тако да мијењају облик детонационог таласа који пролази кроз пуњења. Користи се за промјену неколико приближно сферних дивергентних ударних или детонационих таласа у један сферни конвергентни који на крају компримира језгро (јаму) физионог материјала до наткритичног стања.

<sup>86</sup> Користе се у нуклеарном оружју за стварање имплозије. Имплозија се постиже уз помоћ секундарних експлозива који окружују нуклеарни експлозив и брзо компримују масу до наткритичне вриједности масе нуклеарног експлозива.

	експлозив који се користи у детонаторима
1,3 диамино- 2,4,6 тринитробензен, DATB	Термички стабилна и неосјетљива главна високоексплозивна материја
1,3,5 триамино – 2,4,6 тринитробензен, TATB	Термички стабилна и веома неосјетљива главна високоексплозивна материја. Специјални незрнасти TATB се користи као појачивач.
Нитроцелулоза, NC	Чврсти експлозив који се користи као везиво
Кополимер хлорофлуоротриетилен и винилидин флуорид 3:1, Kel-F	Инертно везиво за главну експлозивну композицију
2,2 динитропропил акрилат, DNPA	Чврсти експлозив који се користи као везиво
Кополимер хексафлуоропропилен и винилидин флуорид 3:1, Viton-A	Чврста гума која се користи као везиво
Бис(2-флуоро-2,2-динитроетил) формал, FEFO	Течни експлозив који се користи као енергетски пластификатор
Бис(2,2 – динитропропил)ацетал/формал, BDNP A/F	Мјешавина течног пластификатора (50% BDNPA и 50% BDNPF) који се користи у пластичним експлозивима
Трис(хлороетил)фосфат, CEF	Пластификатор који се користи у пластичним експлозивима

Ради већег степена безбједности при манипулисања експлозивним материјама, провођењу технолошког процеса производње и испуњавању специфичних захтјева, за потребе израде нуклеарног оружја су развијене различите композиције тзв. пластичних експлозива (енг. *polymer bonded explosives, PBX*).

Табела број 4. Експлозивне композиције пластичних експлозива која се примјењују у нуклеарном оружју [13]

Назив	Састав	Истакнута својства и примјене
Баратол	76% $Ba(NO_3)_2$ + 24% TNT	Експлозив са малом брзином детонације

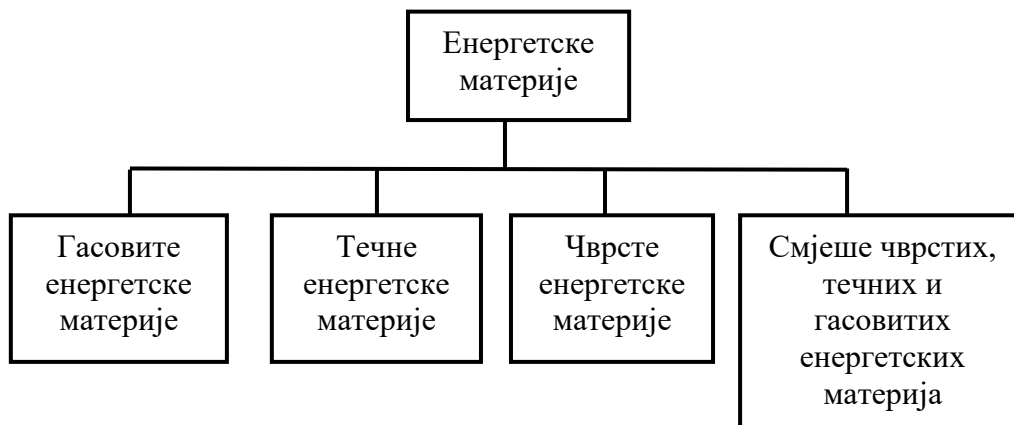
		који се користи у експлозивним сочивима (почетна фаза)
Борацитол	60% $H_3BO_3$ + 40% <i>TNT</i>	Експлозив са малом брзином детонације који се користи у експлозивним сочивима (накнадна фаза)
Плумбатол	70% $Pb(NO_3)_2$ + 30% <i>TNT</i>	Експлозив са малом брзином детонације који се користи у експлозивним сочивима
Композиција-Б	63% <i>RDX</i> + 36% <i>TNT</i> + 1% воска	Ливени главни експлозив високе брзине детонације
Циклотол	75% <i>RDX</i> + 25% <i>TNT</i>	У основи модификована композиција Б са вишим садржајем <i>RDX</i> ради бољих перформанси. Користи се као ливени главни експлозив високе брзине детонације и такође се сматра као замјена за <i>PBX</i> – 9404
<i>LX-04</i>	85% <i>HMX</i> + 15% <i>Viton - A</i>	
<i>LX-07</i>	90% <i>HMX</i> + 10% <i>Viton - A</i>	
<i>LX-09</i>	93% <i>HMX</i> + 4,6% <i>DNPA</i> + 2.4% <i>FEFO</i>	PBX високе брзине детонације који се користи као главни експлозив
<i>LX-10</i>	95% <i>HMX</i> + 5% <i>Viton - A</i>	
<i>LX-10-1</i>	94,5% <i>HMX</i> + 5,5% <i>Viton - A</i>	
<i>LX-11</i>	80% <i>HMX</i> + 20% <i>Viton - A</i>	
<i>LX-17</i>	92,5% <i>TATB</i> + 7,5% <i>Kel - F 800</i>	
<i>PBX-9010</i>	90% <i>HMX</i> + 10% <i>Kel - F 800</i>	
<i>PBX-9011</i>	90% <i>HMX</i> + 10% <i>Estane</i>	PBX високе брзине детонације који се користи као главни експлозив
<i>PBX-9404</i>	94% <i>HMX</i> + 3% <i>NC</i> + 3% <i>CEF</i>	
<i>PBX-9501</i>	95% <i>HMX</i> + 2,5% <i>Estane</i> + 2,5% <i>BDNP F/A</i>	
<i>PBX-9502</i>	95% <i>TATB</i> + 5% <i>Kel - F 800</i>	Неосјетљиви <i>PBX</i> високе брзине

Погонске експлозивне материје (пропеленти) путем процеса сагоријевања обезбјеђују енергију потребну за погон и кретање различитих експлозивних средстава. Погонске експлозивне материје које служе за избацавање (потискивање) пројектила из цијеви називају се барути а експлозивне материје које служе за погон ракетних мотора носе назив ракетна горива.

Материје и смјеше које приликом процеса горења дају жељене свјетлосне, топлотне, димне, успоравајуће или звучне ефекте, чији се интензитет може регулисати називају се пиротехничке материје или пиротехничке смјеше. У зависности од ефекта који испољавају, користе се у различитим системима наоружања и опреме.

### 2. 3. 2. Класификација енергетских материја на основу агрегатног стања и конзистенције

На основу агрегатног стања, високоенергетске материје могу бити у чврстом, течном или гасовитом стању, смјеша чврстих, течних и гасовитих компоненти (слика 7).



Слика број 7. Подјела енергетских материја према агрегатном стању

Високоенергетске материје у гасовитом стању посједују тзв. малу концентрацију енергије, односно, малу количину енергије у јединици запремине. Развојем аеросолних експлозива почиње шира примјена гасовитих експлозивних материја нарочито у војне сврхе. Аеросоли представљају распршене чврсте или течне честице малог пречника (до

неколико микрона) у ваздуху. Експлозивни аеросоли се формирају распршивањем одговарајућих органских материја у ваздуху које под дејством одговарајућег спољашњег импулса детонирају кад њихова концентрација достигне доњу критичну границу. Ову класу енергетских материја карактерише брзи пораст и спорији пад натпритиска на границама аеросолног облака у односу на класичне експлозивне материје. За формирање аеросолних експлозива у прво вријеме кориштен је метил-ацетат, пропан, бутан и њихове смјеше. Усљед развоја аеросолних експлозива почиње употреба течних органских једињења као што су етилен-оксид, пропилен-оксид, нитрометан и изопропил-нитрат. Додатком различитих металних прахова (алуминијум, магнезијум, бор и цирконијум) развијена је нова класа аеросолних експлозивних материја под називом термобарични експлозиви.

Течне високоенергетске материје карактерише велика моћ разарања те превелика осјетљивост и нестабилност што је уједно и основни разлог њиховог кориштења у мањем обиму. Овој групи енергетских материја припадају нитроглицерин, нитрогликол, тетранитрометан, нитрометан, етилнитрат и метилнитрат.

Групи високоенергетских материја у чврстом стању припада највећи број ових материја. Оне могу да буду хемијска једињења и тада се називају једноставни експлозиви или механичке смјеше<sup>87</sup> хемијских једињења када се називају сложени експлозиви. Такође се у чврсте енергетске материје сврставају материје са специфичним физичким карактеристикама као што су наноенергетске материје (енг. *nano energetics materials, NEMs*)<sup>88</sup>, кокристали<sup>89</sup> и јонске течности<sup>90</sup>.

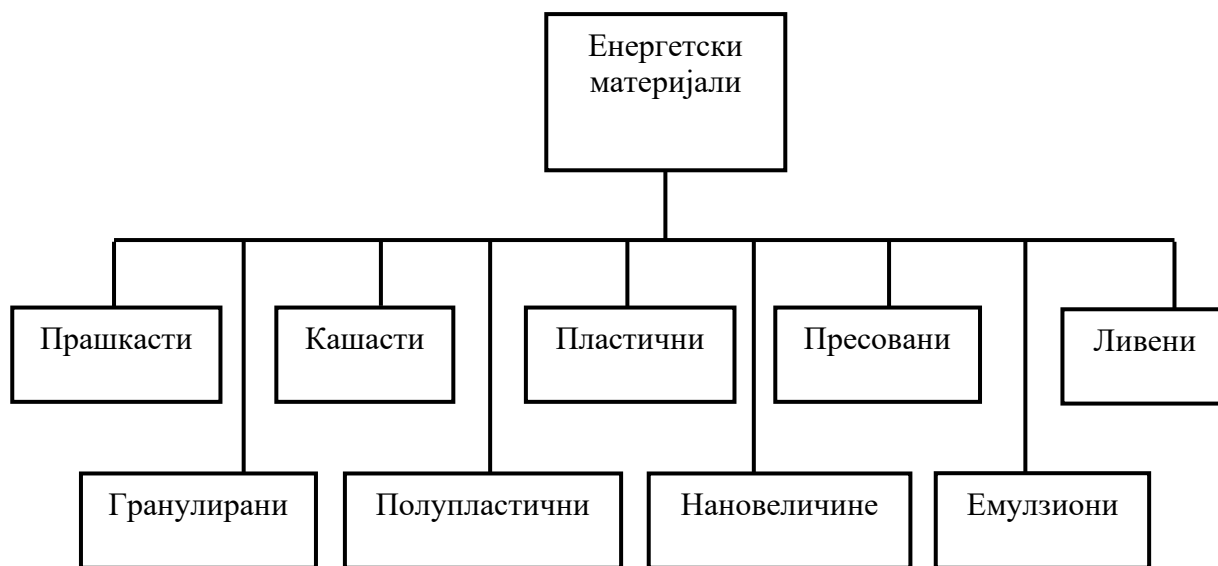
---

<sup>87</sup> Механичка смјеша представља физичку мјешавину различитих компоненти енергетских материја (експлозива) који су хемијска једињења и између којих не постоји хемијска веза.

<sup>88</sup> Материјал чије су честице „нано” величине (< од 100 nm)

<sup>89</sup> Појам „кокристал” (енг. *cocrystal*) уведен је деведесетих година ради описивања молекулских кристала који су садржавали више од једне врсте молекула у смислу хемијског састава. Једна од дефиниција је да су кокристали вишеконтентне чврсте твари које настају из двије или више различитих хемијских врста од којих свака посједује стабилну чврсту форму при стандардном притиску и собној температури. Кокристалне системе карактеришу међумолекулске интеракције као што су водикова веза, јонска интеракција, Ван дер Валсова интеракција и  $\pi$  интеракција као и одсуство трансфера протона. Усљед присуства више међумолекулских интеракција између кристалних супстанци које учествују у стварању кристалних комплекса њихове карактеристике се разликују од карактеристика појединачних интеракција. Успостављањем међумолекуларних интеракција долази до промјене поларизације густине електрона у молекулу (дипол-дипол интеракција) а самим тим и до формирања кристалних система који посједују различите физичко-хемијске карактеристике у односу на карактеристике кристалних система појединачних компоненти. Међумолекулске интеракције и формиране кристалне структуре генеришу различите физичко-хемијске особине насталих супстанци у односу на физичко-хемијске особине појединачних компоненти.

Енергетске материје могу посједовати различиту конзистенцију<sup>91</sup> као што су прашкаста, гранулирана, кашаста, полупластична, пластична, ливена и пресована. У зависности од конзистенције зависи густина и количина енергије по јединици запремине експлозива. Најмању запреминску енергију имају прашкасте експлозивне материје а највећу пресоване и ливене.



Слика број 8. Подјела енергетских (експлозивних) материја према конзистенцији

### 2. 3. 3. Класификација енергетских материја на основу природе експлозивног процеса

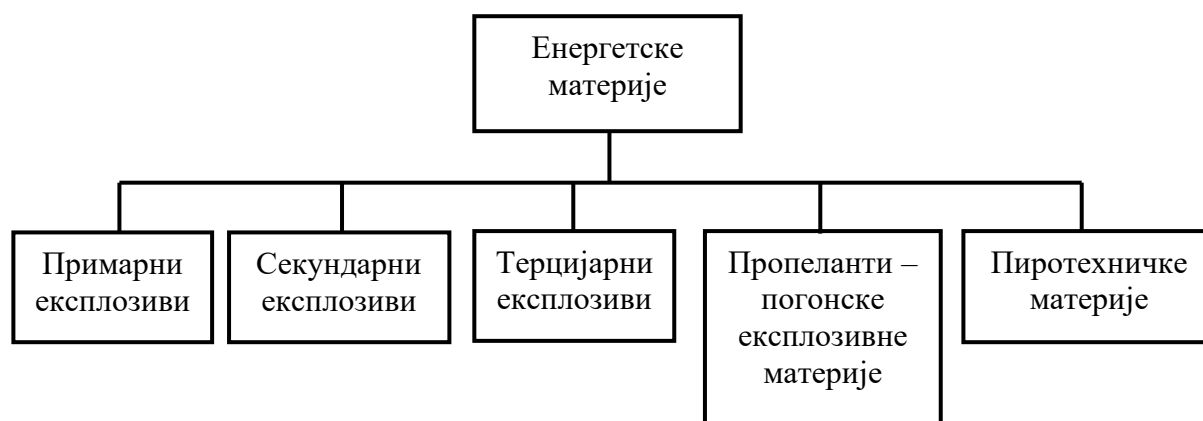
Подјела на основу природе експлозивног процеса представља једну од најчешћих начина класификације енергетских материја с обзиром на то да физичко-хемијске карактеристике високоенергетских материја утичу на врсту експлозивног процеса а чији ефекти условљавају могућу примјену енергетских материја. У даљем дијелу текста приказана класификација према природи експлозивног процеса се односи на подјелу која је заснована на основу хемијске експлозије. Више детаља везаних за појам, дефиницију, подјелу и механизам експлозивних процеса је изложено у дијелу текста под називом Експлозивни процеси. Такође је битно напоменути и то да се

<sup>90</sup> Јонске течности (енг. *Ionic Liquids*) дефинишу се као соли које су течне на ниским температурама ( $T < 373,15 \text{ K}$ ). Јонске течности које су у течном агрегатном стању на собној температури ( $T = 298,15 \text{ K}$ ) називају се јонске течности на собној температури (енг. *Room Temperature Ionic Liquids, RTILs*).

<sup>91</sup> Физичка природа материје.

поједине енергетске материје могу истовремено класификовати у различите класе енергетских материјала имајући у виду чињеницу да приликом одигравања експлозије показују поједине ефекте специфичне за дати експлозивни процес док истовремено други ефекти одговарају другој врсти експлозивног процеса.

Класификација енергетских материја на основу природе експлозивног процеса обухвата примарне, секундарне, терцијарне експлозивне материје, пропеланте и пиротехничке материје (слика 9).



Слика број 9. Подјела енергетских материја на основу хемијског експлозивног процеса

Примарни (иницијални) експлозиви представљају класу енергетских материја чија је најважнија карактеристика висока осјетљивост на спољни утицај. Усљед вањског утицаја, малог интензитета, који може бити механички удар, трење, топлота (пламен, ватра) и електростатичка енергија (искра, варница), ослобађају велику количину енергије, путем процеса детонације (експлозије)<sup>92</sup>. Приликом одвијања процеса детонације настаје већа количина топлоте и ударни талас усљед чега долази до иницирања експлозивног процеса у секундарним мање осјетљивим експлозивима. Експлозивне карактеристике примарних експлозива у поређењу са истим карактеристикама секундарних експлозива показују да примарни експлозиви посједују мању брзину детонације и температуру експлозије, сличан детонациони притисак и значајно већу осјетљивост. Као примјер поређења наведених карактеристика приказане су експлозивне карактеристике и осјетљивост стандардног примарног експлозива, оловног азида и секундарног експлозива хексогена (енг. *RDX*-а) (табела 5).

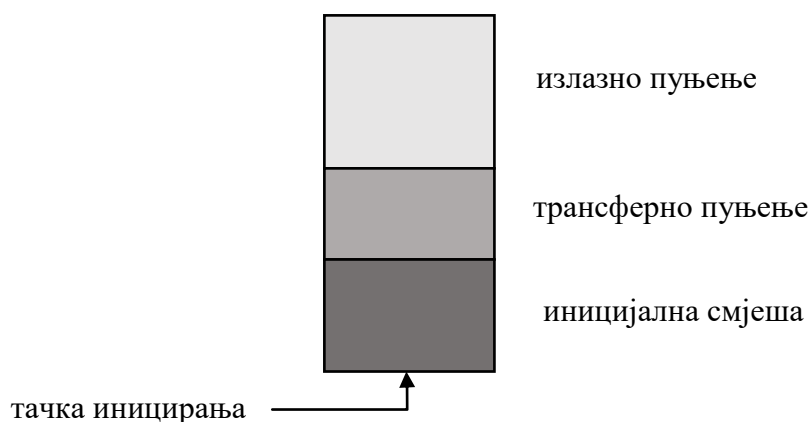
<sup>92</sup> Детаљнија појашњења се налазе у поглављу Експлозивни процеси

Табела број 5. Осјетљивост и експлозивне карактеристике примарних и секундарних експлозива

	Типични примарни експлозив	Оловни азид <i>Pb(N<sub>3</sub>)<sub>2</sub></i>	Типични секундарни експлозив	Хексоген <i>RDX</i>
Осјетљивост				
На удар [ <i>J</i> ]	≤ 4	2,5-4	≥ 4	7,4
На трење [ <i>N</i> ]	≤ 10	≤ 1	≥ 50	120
Електростатичка [ <i>J</i> ]	0,002–0,02	0,005	≥ 0,1	0,2
Експлозивне карактеристике				
Брзина детонационог таласа [ <i>ms<sup>-1</sup></i> ]	3500–5500	4600–5100	6500–9000	8750
Притисак детонационог таласа [ <i>kbar</i> ]		343	210–390	347
Топлота експлозије [ <i>kJkg<sup>-1</sup></i> ]	1000–2000	1639	5000–6000	5277

Усљед нестабилности и високе осјетљивости опасни су за руковање те се приликом употребе користе мале количине материје. Примарне високоенергетске (експлозивне) материје се користе за израду иницијалних средстава (детонатора (енг. *detonators*) и запаљивача (енг. *primers, igniters*)) различитих облика и димензија у зависности од примјене енергетске материје коју иницирају. Такође се користе као једноставни (монокомпонентни) и сложени (вишекомпонентни, смјеше) експлозивни састави са циљем побољшања физичко-хемијских и експлозивних карактеристика (осјетљивост, термостабилност). На слици 10 је шематски приказан распореда експлозивног пуњења стандардног детонатора комерцијалне ознаке *NOL – 130*. Конструктивно је изведен из три дијела: иницијалне мјешавине, односно, пуњења, преносног (трансферног) пуњења (бустера) и излазног пуњења. Иницијална мјешавина се састоји од 20% оловног азидна, 20% оловног стифната, 5% тетразена, 20% баријум-нитрата и 15% антимон-сулфида. За

трансферно пуњење се користи оловни азид док је излазно пуњење секундарна експлозивна материја хексоген (*RDX*).



Слика број 10. Шематски приказ детонатора комерцијалног назива *NOL – 130*

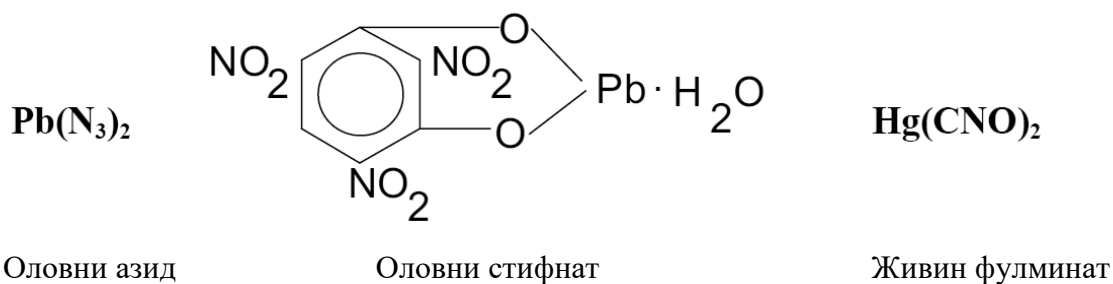
Захтијеване карактеристике за војну и цивилну употребу се односе на осјетљивост, техничко-технолошке карактеристике производње, лакоћу израде, висину трошкова, компатибилности, дугорочности сталног складиштења те утицаја на животну средину.

Примарне експлозивне материје се могу класификовати на стандардне (конвенционалне) примарне експлозиве и примарне експлозиве побољшаних карактеристика.

Стандардни примарни експлозиви представљају примарне експлозивне материје који се најчешће употребљавају у војне и цивилне намјене. У ову групу материја се сврставају оловни азиди<sup>93</sup>, оловни стифнати (тринитрорезорцинати)<sup>94</sup> и живин фулминат.

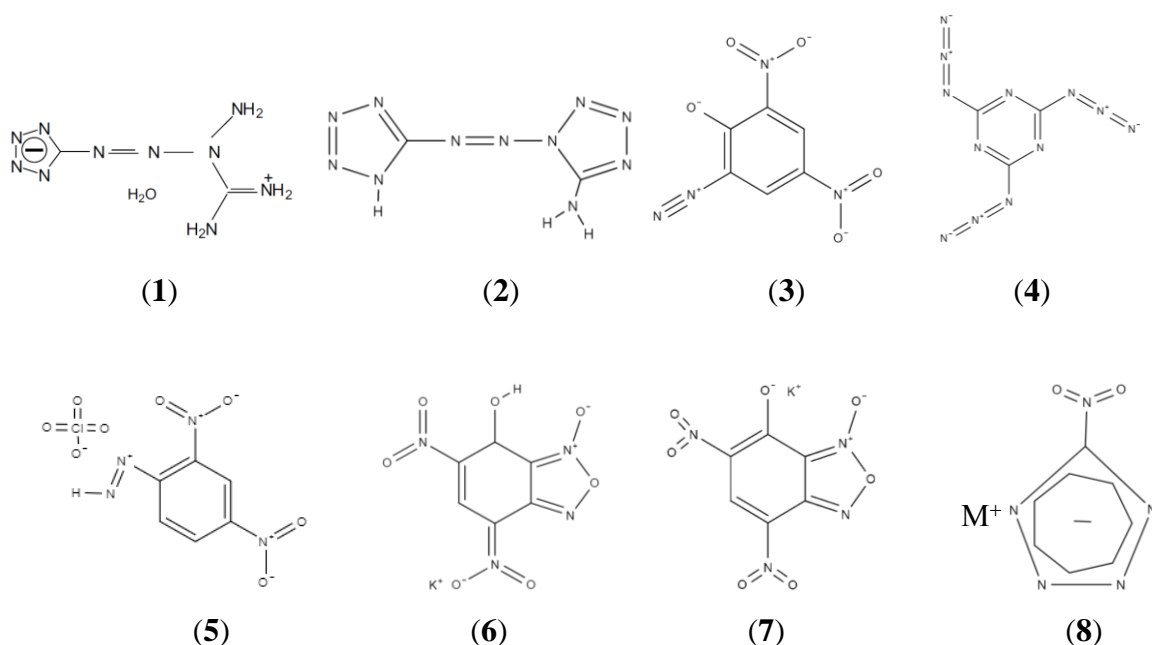
<sup>93</sup> С обзиром на различите методе и технике производње оловног азида разликују се различите форме које посједују различите карактеристике. Форме оловног азида су: базични оловни азид (енг. *Basic lead azide, BLA*), услужни оловни азид (енг. *Service lead azide, SLA*), декстринирани оловни азид (енг. *Dextrinated lead azide, DLA*), побољшани оловни азид (енг. *Improved lead azide (Co - precipitated Na - CMC)*), желатин-азид-молибден-дисулфид форма оловног азид (енг. *Gelatin, azide, molybdenum disulfide ( GAM ) form of lead azide*).

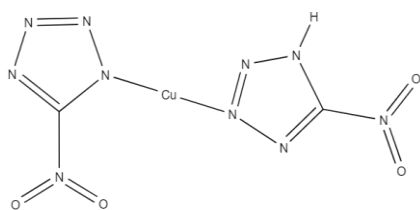
<sup>94</sup> У ову групу се сврставају мононитрорезорцинат и динитрорезорцинат



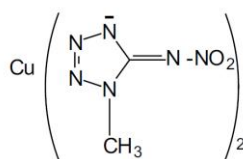
Слика број 11. Хемијска структура стандардних примарних експлозива

У новије вријеме постављају се захтјеви за изналажење примарних експлозива са побољшаним карактеристикама као што су неосјетљивост на влагу и свјетлост; осјетљивост на иницирање, и истовремено смањење осјетљивости приликом руковања и транспорта; термичка стабилност до најмање 200°C; хемијска стабилност током дужег временског периода; без садржаја токсичних метала као што су олово и жива; без садржаја перхлората који могу дјеловати као загађивачи земљишта и показују штетне ефекте на функција штитне жлезде [28]. Синтетизовано је више различитих материја које у већој или мањој мјери испуњавају постављене захтјеве (слика 12) [29, 30].

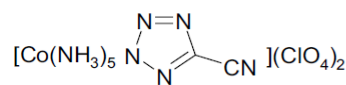




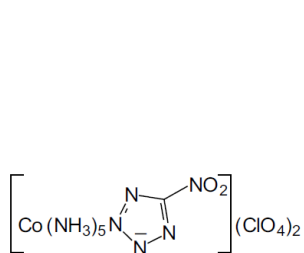
(9)



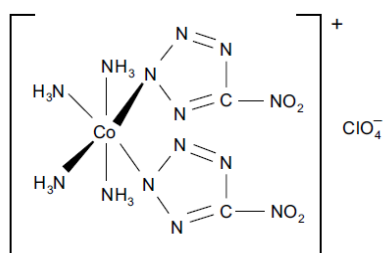
(10)



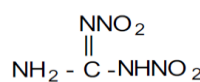
(11)



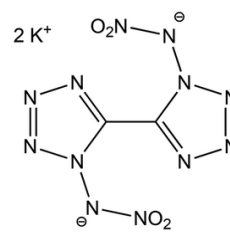
(12)



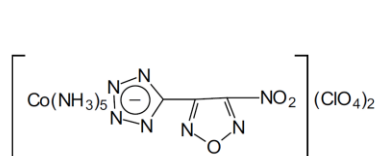
(13)



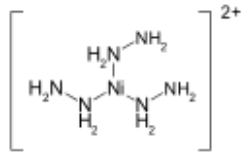
(14)



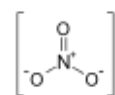
(15)



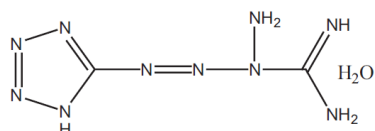
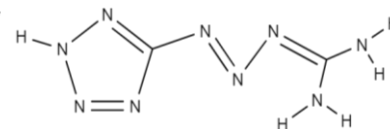
(16)



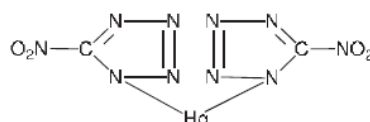
(17)



(18)



(19)



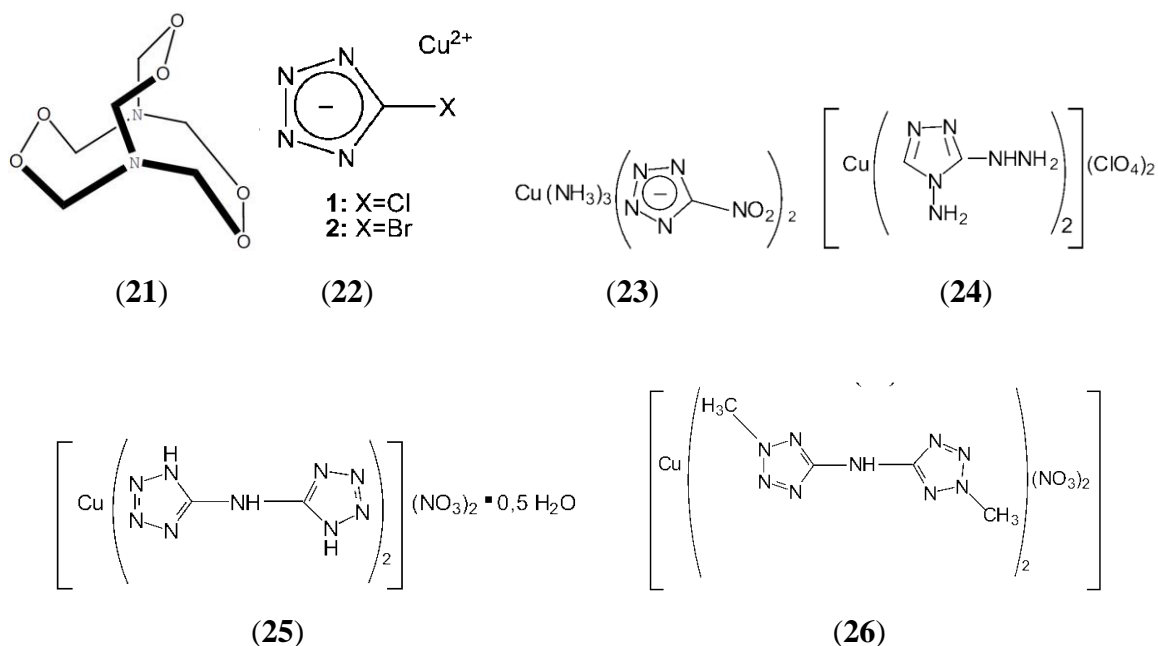
(20)

(1) Tetracene (1-(5-tetrazolyl)-3-guanyltetracene hydrate); (2) 5-tetrazoloazo-1'-tetrazole-5'-amine, iso-DTET; (3) 2-diazonio-4,6-dinitro-1-phenolate, DDNP; (4) 1,3,5-Triazido-2,4,6-triazine, TAT; (5) 2,4-Dinitrophenyldiazonium perchlorate, DPDP; (6) Potassium 4,6-dinitro-7-hydroxy-7-hydroxybenzofuroxanide, KDBNF; (7) potassium 4,6-dinitro-7-hydroxybenzofuroxan, KDNP; (8) M= K, Potassium 5-nitrotetrazolate, K(NT)<sub>2</sub>; M= Rb, Rubidium 5-nitrotetrazolate, Rb(NT)<sub>2</sub>; M= Cs, Caesium 5-nitrotetrazolate, Cs(NT)<sub>2</sub>; M= Cu, copper (II) of 5-nitrotetrazole, Cu(NT)<sub>2</sub>; (9) Copper (I) salt of 5-nitrotetrazole, DBX-1; (10) Bis(1-methyl-5-nitraminetetrazolate)copper(II); (11) pentaammine (5-nitrotetrazolato-N2) cobalt (III) perchlorate, CP; (12) pentaammine (5-nitrotetrazolato-N2)cobalt (III) perchlorate, NCP; (13) tetraammine-bis-(5-nitrotetrazolato-N2)cobalt (III) perchlorate, BNCP; (14) 1,2-Dinitroguanidine, DNG; (15) Potassium 1,1'-dinitramino-5,5'-Bis(tetrazolate), K<sub>2</sub>DNABT; (16) pentaammine [3-nitrofuran-4-(5'-tetrazolato-

$N_2$ )]cobalt (III) perchlorate; (17) tris-hydrazinenickel (II) nitrate, NHN; (18) 1-[(2E)-3-(1H-tetrazol-5-yl)triaz-2-en-1-ylidene]methanediimine, MTX-1; (19) Tetrazen (1-amino-1(1H-tetrazol-5-yl)-azo-guanidine hydrate); (20) Mercuric - 5 – nitrotetrazole, MNT;

Слика број 12. Хемијска структура примарних експлозива побољшаних карактеристика

Опште прихваћено средство за иницирање главног експлозивног пуњења, детонаторска каписла, подложна је случајном активирању путем спољних стимуланса као што су електростатичко пражњење, електромагнетне сметње и зрачење радио-таласима. Истраживања везана за техничка рјешења новог типа детонатора (ласерски детонатор)<sup>95</sup>, односно, новог начина иницирања (пулсно ласерско иницирање) са циљем елиминисања спољних утицаја довела су до развоја одговарајућих примарних експлозивних материја (тзв. свјетлосно осјетљиве експлозивне материје) за примјену у ласерским детонаторима (слика 13) [77].



(21) hexamethyltriperoxidodiamine, HMTD; (22)  $X=Cl$ , copper (II) 5-chlorotetrazolate;  $X=Br$  copper (II) 5-bromotetrazolate; (23) tris-aminecopper (II) 5-nitrotetrazolate; (24) perchlorate

<sup>95</sup> Детонатор је уређај који се користи за иницирање процеса детонације (експлозије) путем вањског импулса. За иницирање ласерског детонатора користи се ласерско зрачење (енг. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, појачање свјетлости помоћу стимулисане емисије зрачења). Ласерско зрачење представљају електромагнетни таласи исте (једне) таласне дужине (монохроматски електромагнетни талас) усмјерен у уском снопу који се крећу у истој фази и у истом правцу (кохерентни сноп). За примјену у ласерским детонаторима користе се ласерско зрачење таласаних дужина од 200 nm до 10  $\mu$ m.

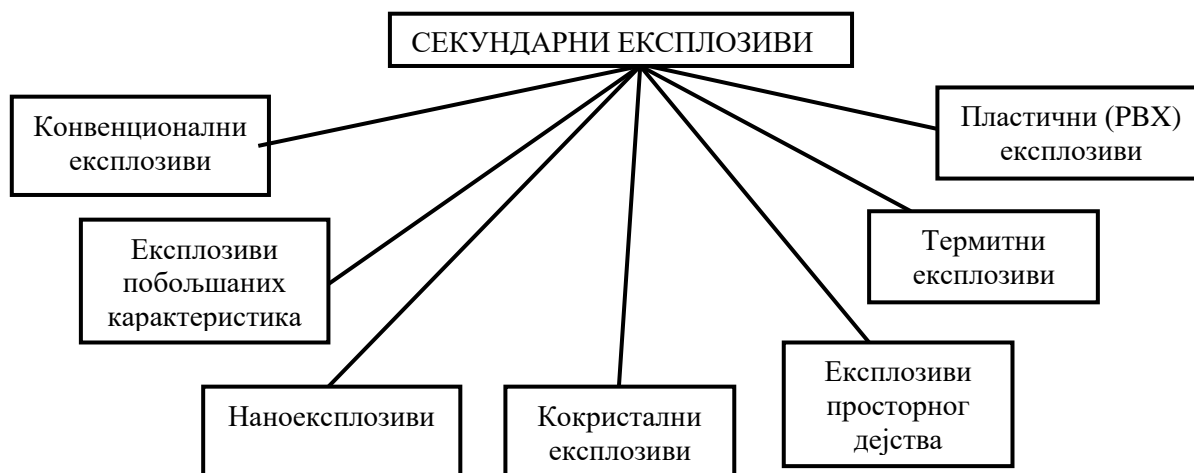
*copper complex of bis-3(5)-hydrazino-4-amino-1,2,4-triazole; (25) copper nitrates with 5,5'-bis-(1Htetrazolyl)amine; (26) 5,5'-bis-(2-methyl-tetrazolyl)amine;*

*Слика број 13. Хемијска структура „свјетлосно” осјетљивих примарних експлозива*

Секундарни експлозиви представљају експлозивне материје које посједују нижи ниво осјетљивости на спољни утицај и истовремено веће вриједности експлозивних карактеристика у односу на примарне експлозиве. Карактеристично за ову класу енергетских материја је особина да се процес разлагања одвија механизмом детонације. Иницирање секундарних експлозива врши се помоћу детонационог таласа насталог детонацијом примарних експлозива. Процес детонације се брже одиграва а последица је већа брзина детонационог таласа и већи детонациони притисак, односно, он показује много већу силу у односу на примарне експлозиве. Имајући у виду основну намјену секундарних експлозива како у цивилне сврхе тако и у војне, значајне карактеристике секундарних експлозива су:

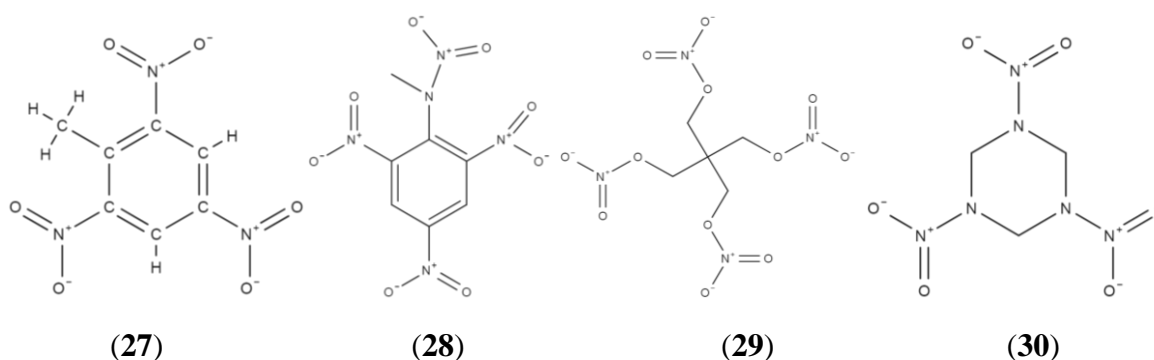
- топлота експлозије
- брзина детонације
- детонациони притисак
- температура експлозије
- запремина насталог гаса по јединици масе експлозива
- стабилност
- компатибилност
- неосјетљивост.

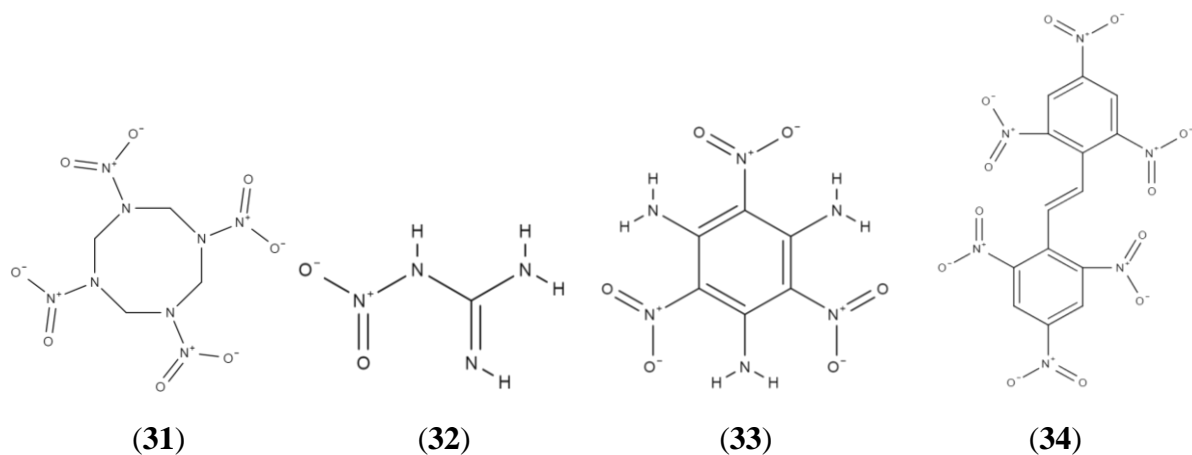
Класификација секундарних експлозива се може извршити на основу физичко-хемијских и експлозивних карактеристика (слика 14). Детаљна појашњења појединих експлозивних карактеристика су приказана у поглављу Физичко-хемијске карактеристике експлозивних материја.



Слика број 14. Класификација секундарних експлозива (високоенергетских материја) на основу физичко-хемијских и експлозивних карактеристика

Под називом конвенционални секундарни експлозиви сматрају се експлозивне материје које се најчешће употребљавају у различите војне и цивилне намјене. У ову групу секундарних експлозивних материја се сврставају тринитротолуен (енг. *TNT*), тетрил, пентаеритритол тетранитрат (енг. *PETN*), хексоген (енг. *RDX*), октоген (енг. *HMX*), нитрогванидин (енг. *NG*), триаминотринитробензен (енг. *TATB*) и хексанитростилбен (енг. *HNS*) као и већи број различитих смјеша у којима су ове материје присутне (слика 15).





(27) 2-methyl-1,3,5-trinitrobenzene, 2,4,6-trinitrotoluene, Trinitrotoluene, TNT; (28) 2,4,6 - Trinitrophenylmethylnitramine, Tetryl; (29) Pentaerythritol tetranitrate, PETN; (30) 1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazinane, hexogen, RDX ; (31) 1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetrazocane, octogen, HMX ; (32) 1-Nitroguanidine, NG; (33) 2,4,6-triamino-1,3,5-trinitrobenzene , TATB; (34) 1,1'-(E)-Ethane-1,2-diyl]bis(2,4,6-trinitrobenzene), Hexanitrostilbene, HNS, JD-X;

Слика број 15. Хемијска структура конвенционалних секундарних експлозива

Са једне стране, константни захтјеви за побољшање физичко-хемијских и експлозивних карактеристика секундарних експлозивних материја и, са друге, научно-технолошки развој, условили су развој експлозивних материја побољшаних особина при чему побољшање једне од карактеристика не утиче на друге карактеристике, односно, задржавање истог или сличног нивоа карактеристика које нису побољшане. Захтијеване карактеристике се односе на негативан утицај на животну средину, једноставну и економичну производњу, термичку стабилност (температура декомпозиције  $> 200^{\circ}\text{C}$ ), неосјетљивост на механичке импулсе (осјетљивост на удар  $> 7\text{J}$ , фрикциона осјетљивост  $> 120\text{ N}$ ), добре детонационе особине (брзина детонације  $> 8500\text{ m/s}$ ) и нерастворљивост у води [31]. Ова група секундарних експлозива представља експлозивне материје новијег датума од којих се поједине налазе у различитим фазама испитивања и производње. У зависности од особина које су побољшане, подјела се може извршити на секундарне експлозиве побољшаних карактеристика у односу на:

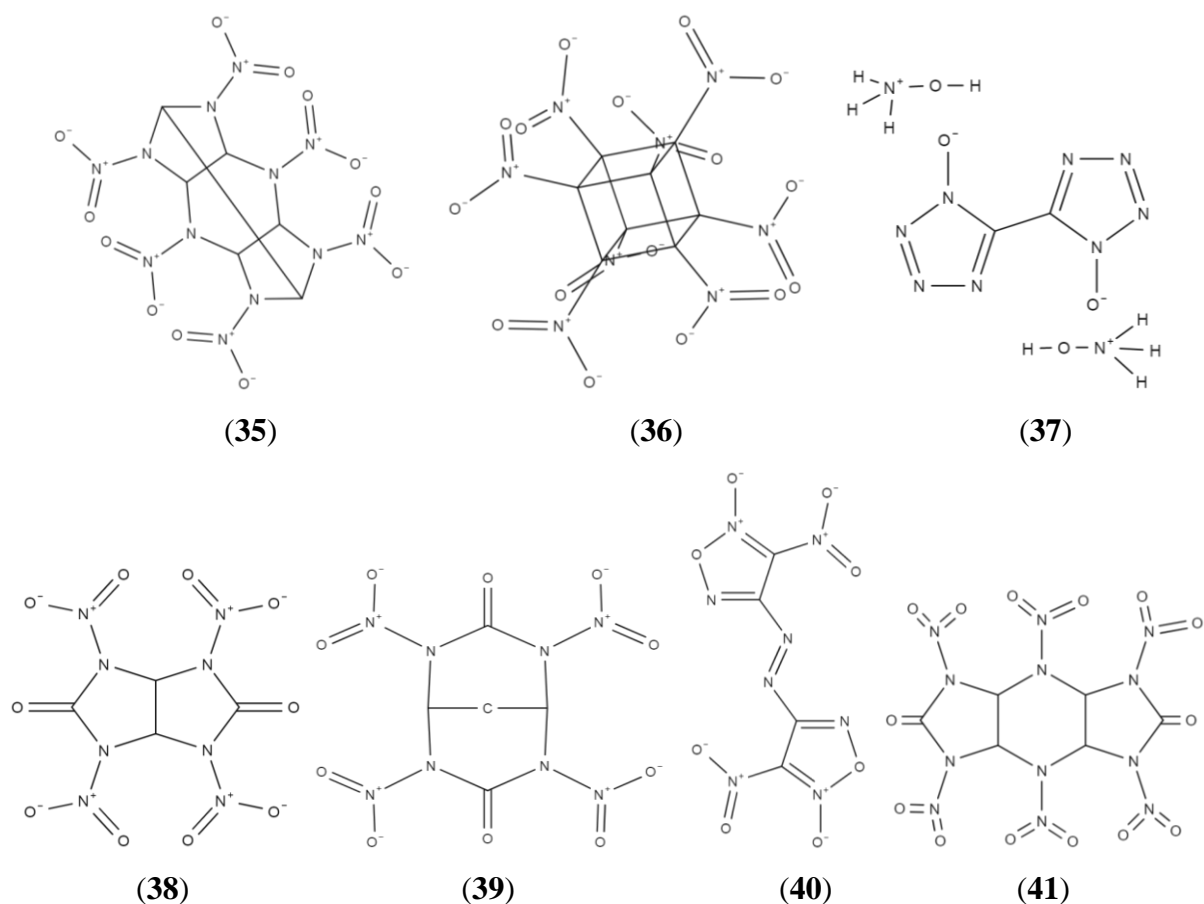
- експлозивност (брзина детонације, детонациони притисак),
- осјетљивост,

- термостабилности,
- топлљивост (у смислу могућности преласка у течну стање ради безбједног провођења технолошког поступка ливења приликом производње минско-експлозивних средстава).



Слика број 16. Подјела експлозива побољшаних карактеристика у односу на побољшане особине

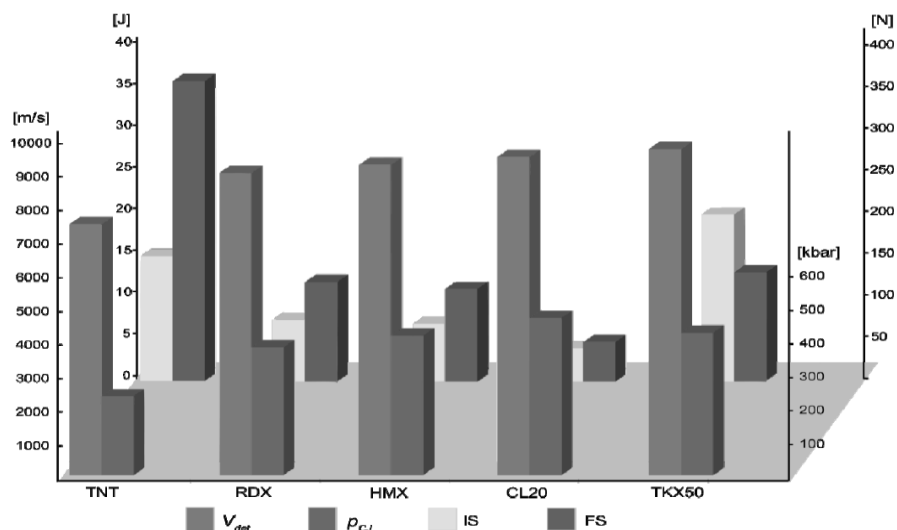
Групу експлозива побољшаних експлозивних карактеристика чине експлозивне материје које посједују већу брзину детонационог таласа у односу на конвенционалне експлозиве, чија је последица повећање детонационог притиска а самим тим и повећање разорног ефекта приликом експлозије. Међу најзначајнијим представницима ове групе експлозивних материја су *CL-20* и октанитрокубан (енг. *ONC*). *CL-20* и *ONC* показују 20–25% већу брзину детонације у односу *HMX* при чему се *ONC* са брзином детонационог таласа од  $10100 \text{ ms}^{-1}$  сматра најснажнијим разорним експлозивом. Сличне експлозивне карактеристике показују *DDF* ( $10000 \text{ ms}^{-1}$ ) и *HHTDD* ( $9700 \text{ ms}^{-1}$ ). Осим побољшане експлозивности, експлозивне смјеше на основу *TKX-50* показује и високи ниво термичке стабилности, неосјетљивости у односу на смјеше на бази *HMX*-а што га чини и експлозивном материјом са побољшаним карактеристикама топлљивости и могућности ливања (енг. *melt-casting*) [32].



(35) 2,4,6,8,10,12-Hexanitro-2,4,6,8,10,12-hexaazatetracyclo [5.5.0.03,11.05,9]dodecane, HNIW, CL-20; (36) Octanitrocubane, ONC; (37) Dihydroxylammonium- 5,5'- bistetrazolyl-1,1'-diolate, TKX-50 (38) 2,4,6,8-Tetranitro-2,4,6,8-tetraazabicyclo[3.3.0]octane-3,7-dione, Sorguyl, TNGU; (39) 2,4,6,8 - Tetranitro - 2,4,6,8 - tetraazabicyclo[3.3.1]nonane-3,7-dione), TNPDU; (40) ((E)-4-Nitro-N-[(E)-(4-nitro-2-oxo-1,2,5-oxadiazol-2-ium- 3-ylidene) amino]-2-oxido-1,2,5-oxadiazol-3-imine, DDF (41) 1,3,4,5,7,8-Hexanitrooctahydrodiimidazo[4,5-b:4',5'-e]pyrazine-2,6(1H,3H)-dione, DTNGU, Naza /Namsorguyl/uryl, HnHaza/amTcDglcDuryl, HHTDD

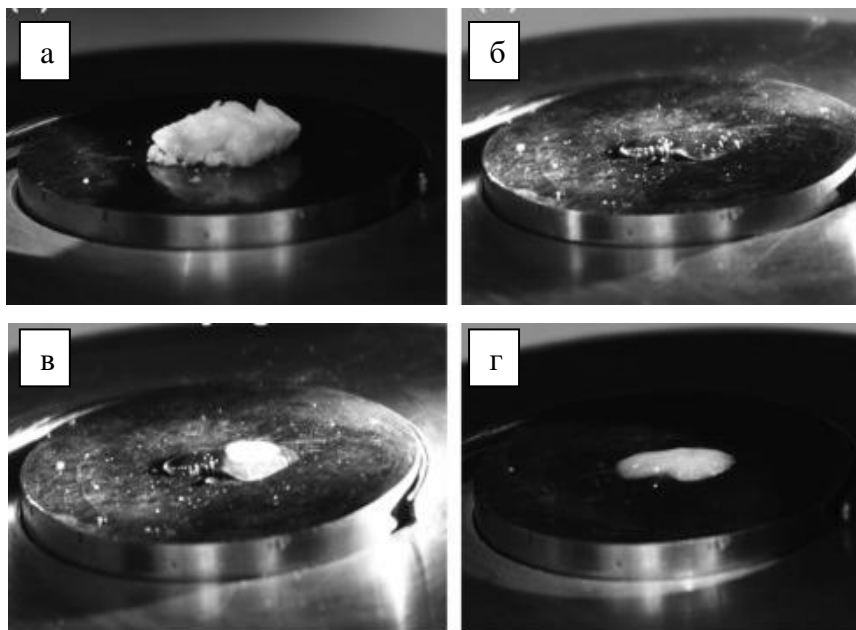
Слика број 17. Хемијска структура секундарних експлозива побољшаних експлозивних карактеристика

На слици 18 су компаративно приказане карактеристике појединих конвенционалних експлозивних материја и TKX-50 [33]. Осим побољшања експлозивних карактеристика, TNPDU и TNABN (2,5,7,9-тетранитро-2,5,7,9-тетраазабицикло[4.3.0] нонан-8-он) посједују и значајно мањи ниво осјетљивости у односу на конвенционалне експлозиве.



Слика број 18. Графички компаративни приказ карактеристика ТКХ-50 и конвенционалних експлозива ( $v_{det}$  -брзина детонације;  $p_{cj}$  -детонациони притисак, IS-осјетљивост на механички удар; FS-осјетљивост на трење) [33]

Експлозиве побољшаних карактеристика топљивости (енг. *melt-casting*) првенствено карактерише снижена температура топљења<sup>96</sup> при чему не долази до декомпозиције (распада) материје, као и процеса горења и детонације. Загријавањем на одређену температуру, оне прелазе у течно стање. Након смањења температуре, враћају се у чврсто стање (слика 19).



<sup>96</sup> Топљење је физички процес у коме материја мијења агрегатно стање, односно, прелази из чврстог у течно стање. Енергија потребна за топљење се назива латентна топлота а температура на којој се одиграва процес топљења се назива температура топљења.

Слика број 19. Топљење еритритол тетра-нитрата а) чврсто стање; б) растопљено стање, в) солидификација (очвршћавање), г) топљиво ливена материја [34]

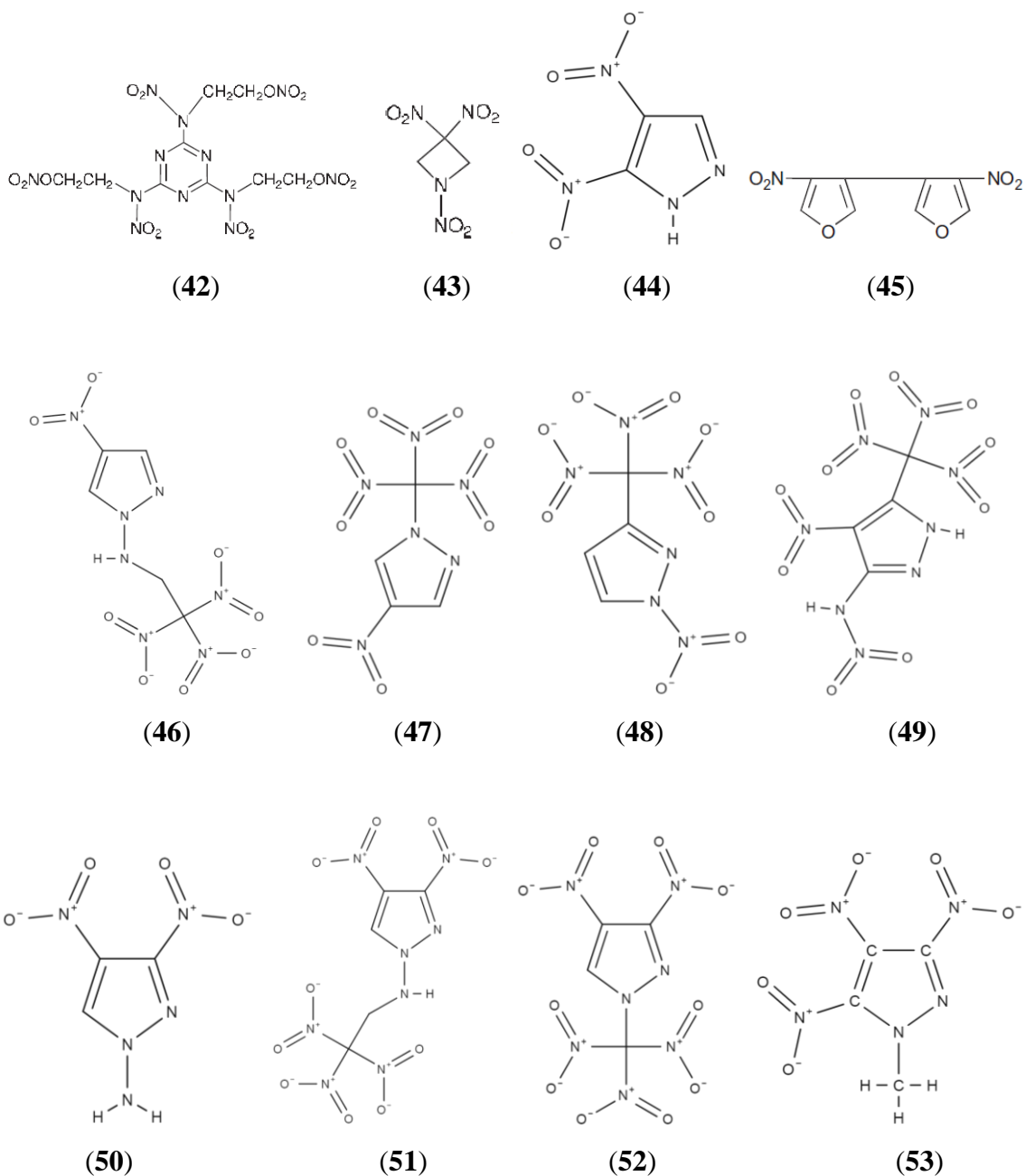
Ове експлозивне материје које су стабилне и неосјетљиве на одређеној температури због својих физичких особина (течно стање) могу се поступком ливења користити за пуњење убојних средстава а да, приликом кориштења, посједују потребан ниво безбједности. Кориштење експлозивних материја са оваквим карактеристикама се огледа нарочито приликом израде експлозивних смјеша. У отопљени експлозивни материјал (у течном стању) који има улогу везивног средства (енг. *binder*) додаје се други експлозивни материјал у чврстом стању (прах) а затим се врши мијешање и улијевање. Након хлађења долази до очвршћавања смјеше у којој су честице једног експлозива дисперговане у маси друге експлозивне материје. У претходном временском периоду, кориштени су полимерни материјали<sup>97</sup> као везиво и секундарни експлозив као што су хексоген и октоген. Употреба полимерних везива је доводила до смањења експлозивних карактеристика. Као замјена за полимерна везива веома успјешно се показао тринитротолуен са температуром топљења 80,4<sup>0</sup>С, температуром декомпозиције (распада)  $\approx 300^0\text{C}$ , релативном ниском осјетљивошћу и високом хемијском стабилности. У новије вријеме развијене су експлозивне материје побољшаних карактеристика за ову намјену, у које се убрајају *Tris* – *X* и његов хомолог<sup>98</sup> *Methyl Tris* – *X* (температура топљења т. т. 68–69<sup>0</sup>С), *TNAZ* (т. т. 101<sup>0</sup>С), *DNP* (т. т. 87<sup>0</sup>С), *DNBF* (т. т. 85<sup>0</sup>С), као и група органских једињења у чијој структури је присутан пиразолски прстен<sup>99</sup> [35].

---

<sup>97</sup> Полимери су природне или вјештачке материје које се састоје од великих молекула састављених од повезаних основних јединица мономера. Модификацијом полимера различитим методама настаје широк спектар материјала под називом пластичне масе. Полимери се дијеле на: пластомери (термопласти) – загријавањем прелазе у течну фазу а затим хлађењем се враћају у чврсто стање, еластомери – посједују савитљивост, истезљивост на собној температури, дуромери (дуропласти) – тврди материјали који се не могу преобликовати на температури, лако се ломе.

<sup>98</sup> Хомологни ред (низ) је скуп хемијских једињења чији се узастопни чланови разликују за по једну активну групу. Чланови хомологног реда (низа) називају се хомолози.

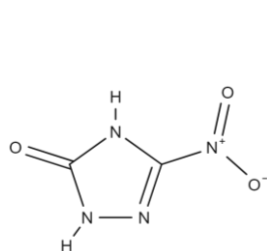
<sup>99</sup> Пиразол је назив класе органских једињења са ароматичним прстеном који се састоји од три атома угљика и два атома азота у сусједним позицијама.



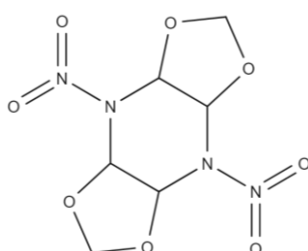
(42) 2,4,6 - Tris(2 - nitroxyethylnitramino) - 1,3,5 - triazine, Tris - X; (43) 1,3,3 - Trinitroazetidine, TNAZ; (44) 3,4-dinitropyrazole, DNP; (45) 4,4' - Dinitro - 3,3' - bifurazan, DNBF; (46) 4-nitro-N-(2,2,2-trinitroethyl)-1H-pyrazol-1-amine; (47) 4-nitro-1-(trinitromethyl)-pyrazoles; (48) 1-nitro-3-trinitromethylpyrazole; (49) 3-Trinitromethyl-4-nitro-5-nitramine-1H-pyrazole; (50) 3,4-Dinitro-1H-pyrazol-1-amine; (51) 3,4-Dinitro-N-(2,2,2-trinitroethyl)-1H-pyrazol-1-amine; (52) 3,4-dinitro-1-(trinitromethyl)-pyrazoles; (53) 3,5-dinitro-1-(trinitromethyl)-pyrazoles; (54) 1-methyl-3,4,5-trinitropyrazole, MTNP;

Слика број 20. Хемијска структура секундарних експлозива побољшаних карактеристика топливост

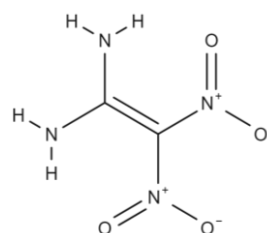
Неконтролисано активирање, приликом производње, употребе и складиштења различитих убојних средстава у којима су присутни секундарни експлозиви (*TNT*, *RDX*, *HMX*), као и различите формулације на бази нитроцелулозе-нитроглицерина (пропеланти различитих бојевих зрна) имало је, као посљедицу, велика материјална разарања и људске жртве. Из тих разлога се приступило развоју секундарних експлозива побољшаних карактеристика на осјетљивост. Карактеристике на осјетљивост се првенствено односе на осјетљивост на удар (енг. *impact sensitivity*, *IS*) и осјетљивост на трење (енг. *friction sensitivity*, *FS*). У почетку се приступило развоју различитих формулација пластичних експлозива као могуће одговарајуће замјене. С обзиром на то да пластични експлозиви нису могли у потпуности задовољити постављене захтјеве, приступило се развоју побољшаних секундарних експлозива у правцу смањења осјетљивости на механички удар и трење са задржавањем одговарајућих експлозивних карактеристика (брзина детонације). Као резултат ових истраживања, синтетизовано је више нових експлозивних материја са ниском осјетљивошћу под називом неосјетљиви високоенергетски експлозиви (енг. *insensitive high explosives*, *IHEs*). У ову групу експлозивних материја могу се сврстати нитротриазолон (енг. *NTO*), текс (енг. *TEX*), фокс 7 (енг. *DADNE*, *FOX-7*), фокс 12 (енг. *GUDN*, *FOX-12*), 2,4-динитроанизол (енг. *DNAN*), динитропиразин-1-оксид (енг. *LLM-105*), 4-амино-3,5-динитропиразол (енг. *ADNP*, *LLM-116*), 3,3'-диамино-4,4'-азоксифуразан (енг. *DAAF*), 1,4-динитроглюкорил (енг. *DINGU*) и 7-амино-4,6-динитробензофуразан-1-оксид (енг. *ADNBF*).



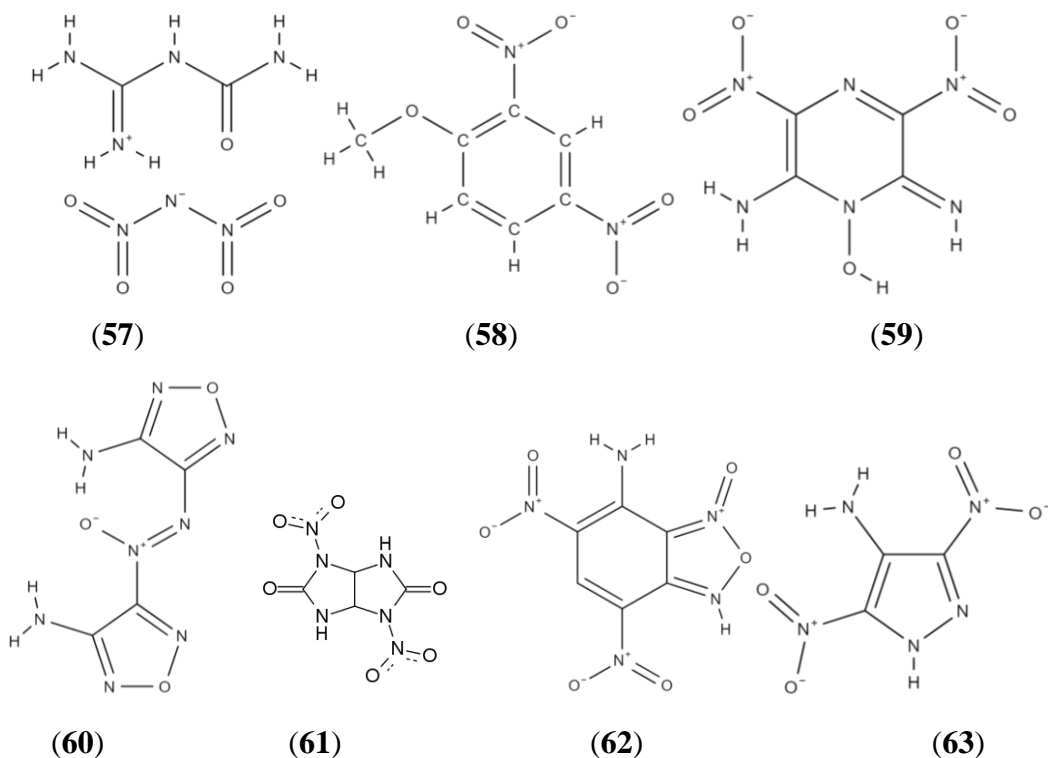
(54)



(55)



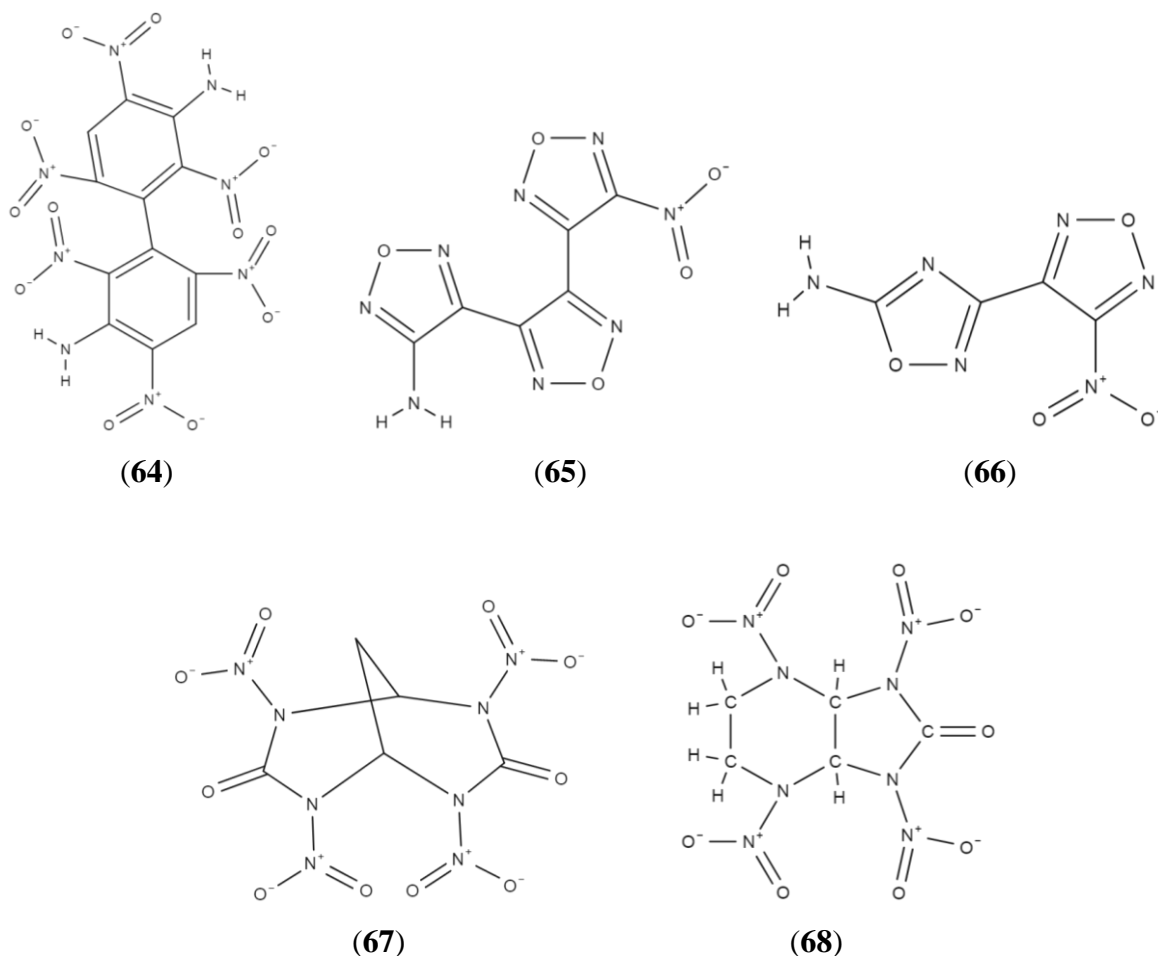
(56)



(54) Nitrotriazolone, NTO; (55) 4,10-dinitro-2,6,8,12-tetraoxa-4,10-diazatetracyclo[5.5.0.0.5,9.0.3,11] -dodecane, TEX; (56) 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene, DADNE, FOX-7; (57) Guanylurea dinitramide, GUDN, FOX-12; (58) 1-Methoxy-2,4-dinitrobenzene, DNAN; (59) 2,6-Diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide, (LLM-105; (60) 3,3'-diamino-4,4'-azoxyfurazan, DAAF; (61) 3,6-dinitro-1,3a,4,6a-tetrahydroimidazo[4,5-d]imidazole-2,5-dione, DINGU; (62) 7-amino-4,6-dinitrobenzofuroxan, ADNBF; (63) 4-Amino-3,5-Dinitro-1H-Pyrazole, ADNP, LLM-116;

Слика број 21. Хемијска структура секундарних експлозива побољшаних карактеристика осјетљивости на удар и трење

Поједине експлозивне материје, осим побољшане стабилности, карактерише и побољшање других важних специфичних карактеристика. Високоенергетску материју под називом *DIPAM* осим побољшане стабилности, карактерише и значајан ниво термостабилности. Повишен ниво неосјетљивости и ниску температуру топљења посједују материје под називом *LLM-175* и *LLM-201* при чему *LLM-201* показује и термичку стабилност у односу на хексоген [36]. Експлозивне карактеристике (брзина детонационог таласа) и карактеристике стабилности, *TNPDU*-а и његовог хомолога *TNABN*-а показују веће вриједности у односу на конвенционалне експлозиве [37].



(64) 3,3'-Diamino-2,2',4,4',6,6'-hexanitrodiphenyl, DIPAM; (65) 3-(4-nitro-1,2,5-oxadiazol-3-yl)-4-(4-amino-1,2,5-oxadiazol-3-yl)-1,2,5-oxadiazole, LLM-175; (66) 3-(4-nitro-1,2,5-oxadiazol-3-yl)-1,2,4-oxadiazol-5-amine, LLM-201; (67) 2,4,6,8-Tetranitro-2,4,6,8-Tetraazabicyclo[3.3.1]Nonane-3,7-Dione, Tetranitropropane diurea, TNPDU; (68) 2,5,7,9-Tetranitro-2,5,7,9-Tetraazabicyclo[4.3.0]Nonane-8-One, TNABN

Слика број 22. Хемијска структура секундарних експлозива побољшаних различитих карактеристика

Побољшање карактеристике термостабилности подразумева значајно повећање вриједности температуре декомпозиције (распада) експлозивних материја. Потребно је разликовати температуру декомпозиције експлозивних материја од температуре топљења и температуре експлозије при чему се процес декомпозиције може одиграти на више различитих начина<sup>100</sup>. Утврђено је да се код већине експлозивних материја

<sup>100</sup> Декомпозиција (распад) подразумева раздвајање атома који сачињавају молекуле, односно, прекид међуатомских веза. За процес распада потребна је додатна енергија тј. процес је ендотерман за разлику када

процес термичке декомпозиције одвија на нижој температури у односу на температуру на којој долази до спонтаног процеса експлозије (детонације). Сматра се да сви војни експлозивни имају високу стабилност у распону од  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  при чему већина експлозивних материја на температурама преко  $70^{\circ}\text{C}$  постаје термички нестабилна. Под материјама са побољшаном карактеристиком термостабилности подразумевају се материје чија је температура распада већа од  $320^{\circ}\text{C}$ . Промјена агрегатног стања (топљење – прелазак у течну фазу) може у знатној мјери негативно утицати на стабилност експлозивних материја приликом складиштења у смислу функционалности. Развој термички стабилних експлозивних материја се заснива на четири општа приступа хемијске синтезе ове групе једињења [38]:

- формирање соли<sup>101</sup>
- увођење једне или више амино-функционалне групе<sup>102</sup>
- провођење реакције коњугације<sup>103</sup>
- провођење реакције кондензација са једним или више триазолних прстенова.<sup>104</sup>

Формирањем соли појединих експлозивних једињења постиже се повишен ниво термостабилности што се може приказати кроз реакцију формирања калијумове соли 3,3'-диамино-2,2',4,4',6,6'-хексанитродифенила.

---

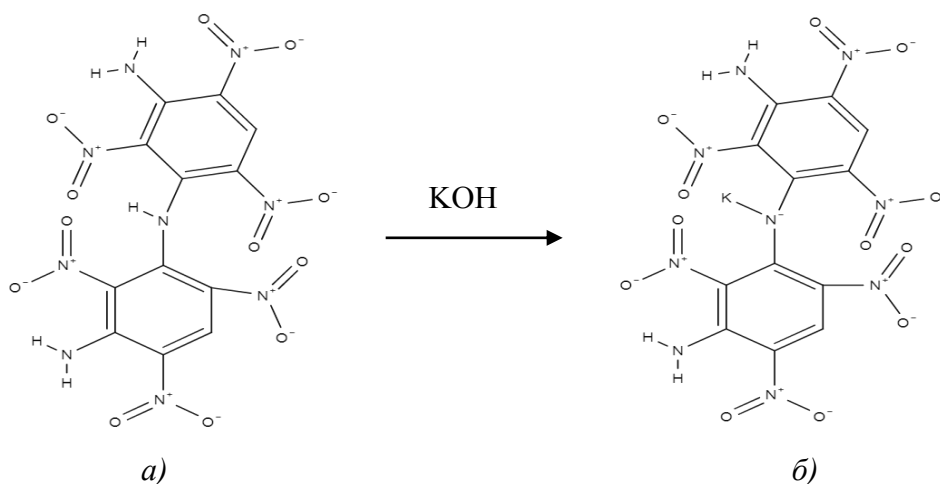
приликом формирања међуатомских и међумолекулских веза долази до ослобађања енергије, односно, процес је егзотерман.

<sup>101</sup> У хемији, со је општи термин који се користи за јонска једињења састављена од позитивно наелектрисаних катјона и негативно наелектрисаних ањона, тако да је производ неутралан и без наелектрисања. Ови јони могу бити неоргански ( $\text{Cl}^-$ ) као и органски ( $\text{CH}_3\text{-COO}^-$ ) и једноатомски ( $\text{F}^-$ ) као и вишеатомски јони ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

<sup>102</sup> Функционална група у хемији представља групе атома у органским једињењима које дају карактеристичне особине тим једињењима и њиховим реакцијама. Амини припадају групи органских једињења која садрже најмање једну или више базних азотових атома у молекулу.

<sup>103</sup> Коњугација је преклапање једне п-орбитале са другом у правцу сигма везе (код већих атома д-орбитале могу да учествују). Коњуговани системи садрже регионе преклапајућих п-орбитала, који премоштавају једноструке везе. Они омогућавају делокализацију пи-електрона дуж свих сусједних поравнатих п-орбитала. Пи-електрони не припадају појединачној вези или атому, већ групи атома.

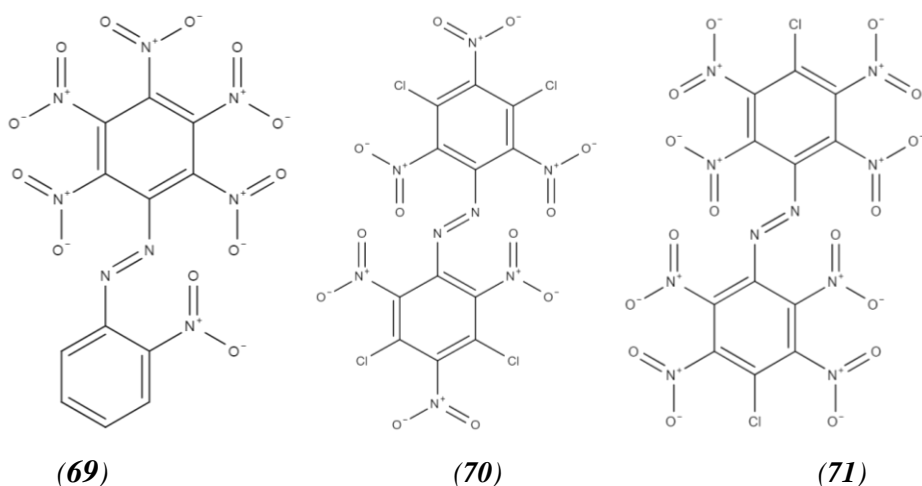
<sup>104</sup> Реакција кондензације је хемијска реакција у којој се два молекула или групе, обично функционалне групе, комбинују да формирају већи молекул, при чему се издваја мали молекул. Триазол је једно од изомерних хемијских једињења са молекулском формулом  $\text{C}_2\text{H}_3\text{N}_3$ , названих триазоли, који имају петочлани прстен од два атома угљеника и три атома азота.



a) 3,3'-Diamino-2,2',4,4',6,6'-hexanitrodiphenylamine (m.m. 232-237<sup>0</sup> C); б) калијумова со 3,3'-diamino -2,2',4,4',6,6' hexanitrodiphenylamine (m. m. 333-334<sup>0</sup> C) [39]

Слика број 23. Хемијска синтеза калијумове соли 3,3'-diamino -2,2',4,4',6,6' hexanitrodiphenylamine

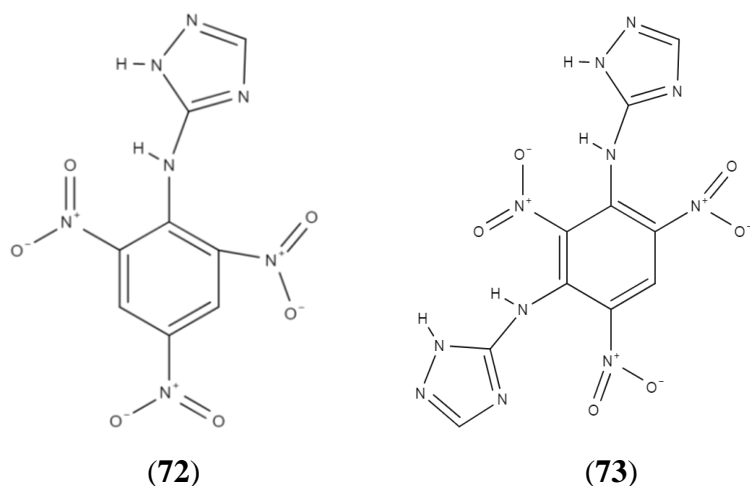
Повећање броја амино-група (-NH<sub>2</sub>) присутних у хемијској структури експлозивне материје доводи до повећања нивоа термостабилности. TATB и HNS представљају примјере конвенционалних секундарних експлозива са израженом термостабилности у чијој структури се налазе амино-групе [39]. Услјед одигравања реакције коњугације долази до настајања интермолекуларних и интрамолекуларних веза које карактерише високи ниво стабилности, односно, потреба за више енергије ради прекида насталих веза [40]. У експлозивне материје побољшане термичке стабилности настале провођењем процеса коњугације се сврставају хексанитроазобензен (енг. HNAB), тетрахлорохексанитроазобензен (енг. TCHNAB) и дихлорооктанитроазобензен (енг. DCONAB).



(69) *(2-nitrophenyl)-(2,3,4,5,6-pentanitrophenyl)diazene*, HNAB, m.m. 341<sup>0</sup>C; (70) *3,3',5,5'-Tetrachloro-2,2',4,4',6,6'-hexanitro-azobenzene*, TCHNAB, m.m. 309-314<sup>0</sup>C; (71) *4,4'-Dichloro-2,2',3,3',5,5',6,6'-octanitro-azobenzene*, DCONAB, m.m. 340<sup>0</sup>C

Слика број 24. Експлозивне материје побољшане термичке стабилности настале реакцијом коњугације

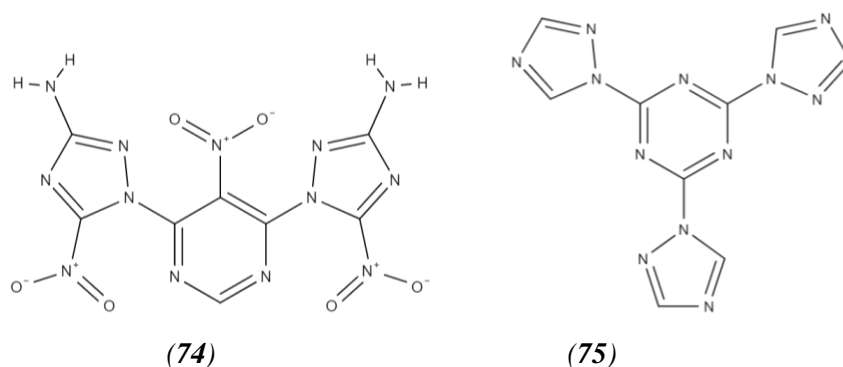
Од експлозивних хемијских једињења насталих кондензацијом једног или више триазолних прстенова која показују високи ниво термичке стабилности издвајају се пикриламинотриазол (енг. *PATO*) и триазоламинотринитробензен (енг. *BTATNB*).



(72) *3-(Picrylamino)-1,2,4-triazole*, PATO, m.m. 310-316<sup>0</sup>C; (73) *1,3-Bis(1',2',4'-triazol-3'-ylamino)-2,4,6-trinitrobenzene*, BTATNB, m.m. 325<sup>0</sup>C;

Слика број 25. Експлозивне материје побољшане термичке стабилности настале реакцијом кондензације једног или више триазолних прстенова

Осим хемијских једињења насталих кондензацијом триазолних прстенова у ову групу експлозивних материја могу се сврстати и једињења настала кондензацијом хлорних деривата тетразина, нитропиримидина и триазина тако што се кондензација врши са триазолом или супституисаним триазолима [38].

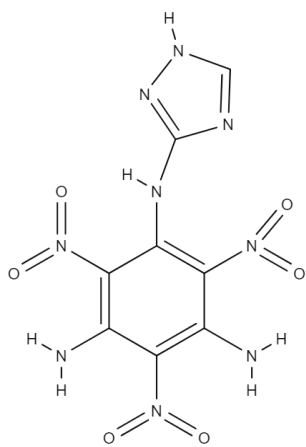


(74) 4,6-Bis(3-amino-5-nitro-1 H -1,2,4-triazol-1-yl)-5-nitropyrimidine, DAN-TNP, *m.m.* 330-350<sup>0</sup>C;

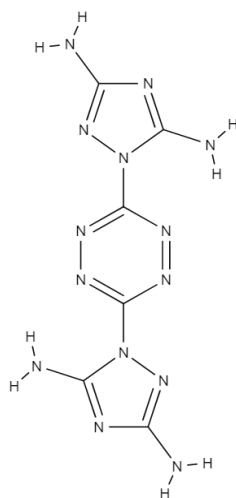
(75) 2,4,6-Tris(1,2,4-triazol-1-yl)-1,3,5-triazine, TTT, *m.m.* >375<sup>0</sup>C

Слика број 26. Експлозивне материје побољшане термичке стабилности настале реакцијом кондензације хлорних деривата тетразина, нитропиримидина и триазина тако што их кондензује са триазолом или супституисаним триазолима

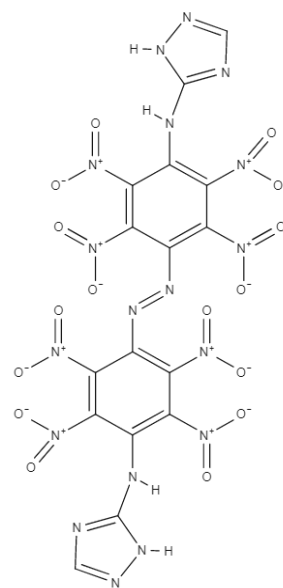
Комбиновањем различитих приступа синтези експлозивних материја, уочено је значајно повећање термостабилности новонасталих супстанци. Вршена су испитивања комбинованог приступа (и) увођење амино-групе и вођења реакције кондензације са триазолним прстеном, (ии) увођење амино-групе и реакције коњугације и (иии) вођење реакције кондензација триазолног прстена и реакције коњугације [38].



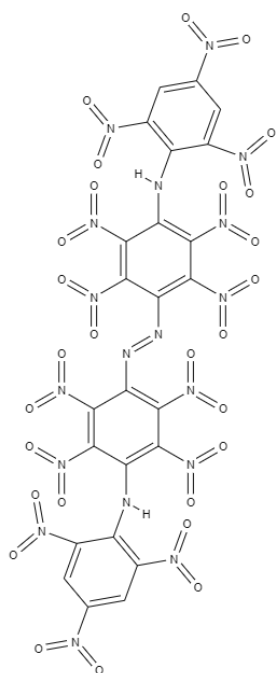
(76)



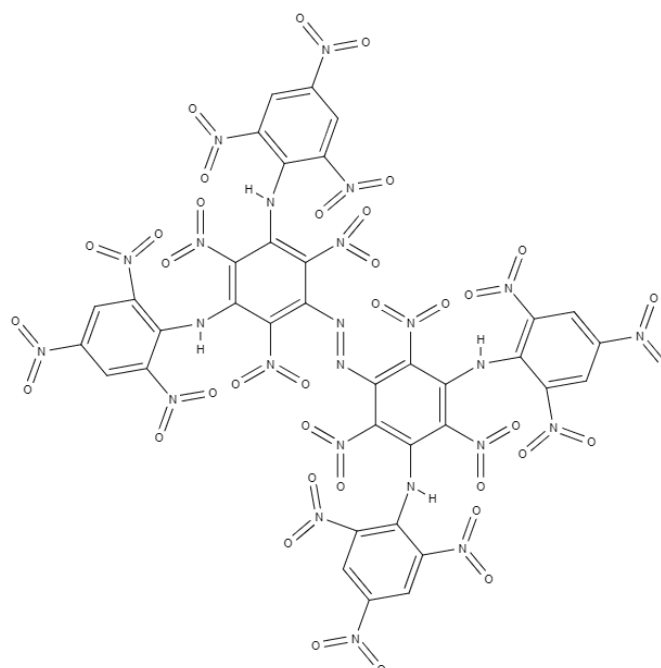
(77)



(78)



(79)

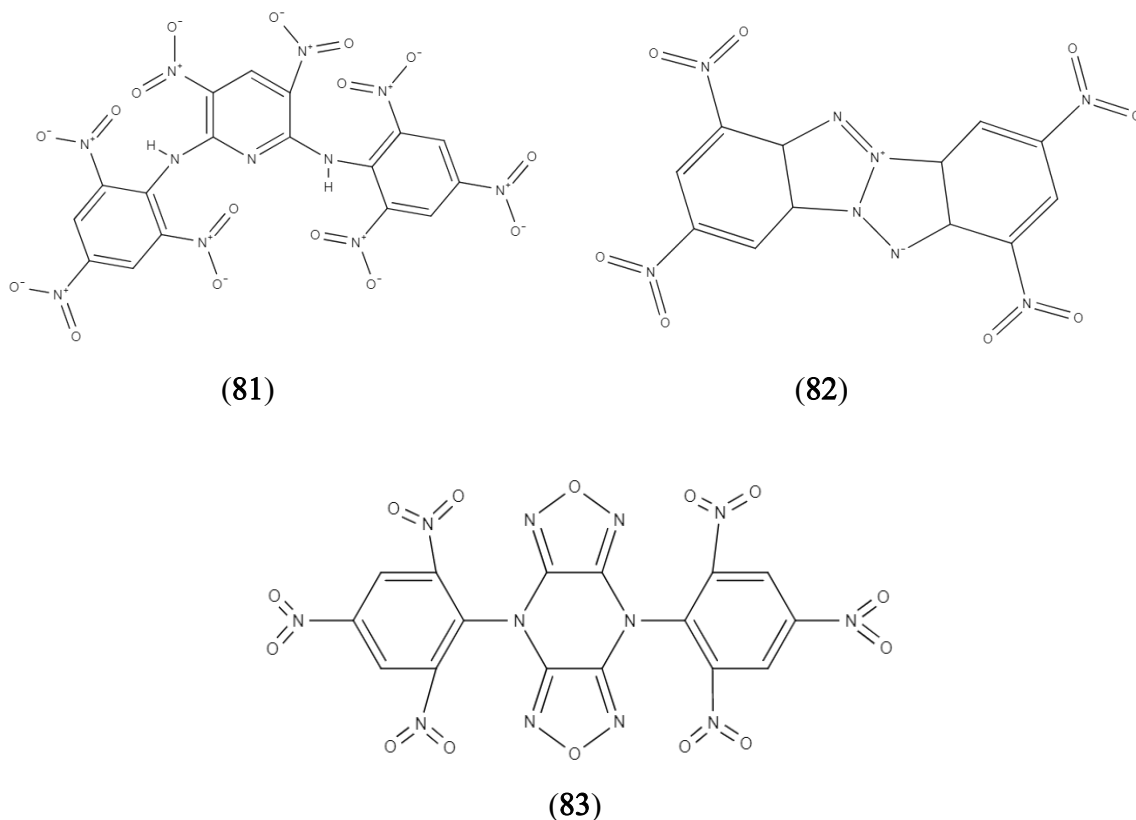


(80)

(76)  $N^5$ -(1 H -1,2,4-triazol-3-yl)-1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene, TTATNB, m.m.  $>340^{\circ}\text{C}$ ; (77) 3,6-Bis(3,5-diamino-1,2,4-triazol-1-yl)-1,2,4,5-tetrazine, BDATTz, m.m.  $370^{\circ}\text{C}$ ; (78) 4,4'-Bis(1,2,4-triazol-3-ylamino)-2,2',3,3',5,5',6,6'-octanitroazobenzene, BTDAONAB, m.m.  $550^{\circ}\text{C}$ ; (79) 4,4' - Bis(picrylamino)-2,2',3,3',5,5',6,6'-octanitroazo benzene, BPAONAB, m.m.  $373^{\circ}\text{C}$ ; (80) 3,3',5,5' - Tetrakis(picrylamino)-2,2',4,4',6,6'-hexanitro azobenzene, TPAHNAB, m.m.  $493^{\circ}\text{C}$ ;

Слика број 27. Експлозивне материје побољшане термичке стабилности настале комбинованим приступом синтезе

У групу експлозивних материја које, осим побољшане термостабилности, карактерише и виши ниво неосјетљивости сврставају се експлозивне материје под називом *PYX*, *z-TACOT* и *TNBP* [41].

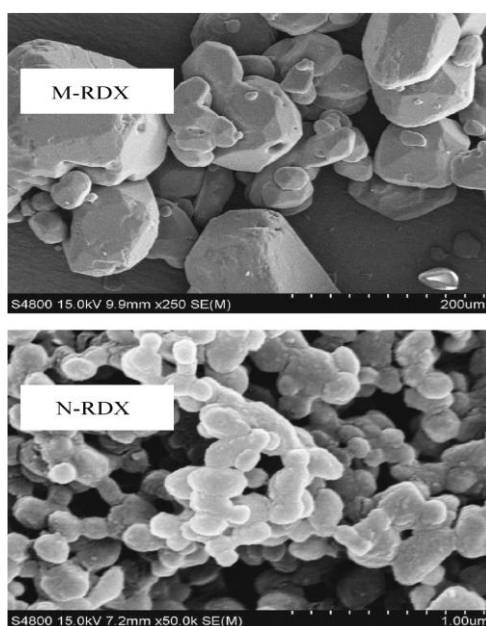


(81) 2,6-bis(picrylamino)-3,5-dinitro-1,3,4,6a-tetraazapentalene, *PYX*, *m.m.* 460°C; (82) tetranitro-2,3,5,6-dibenzo-1,3a,4,6a-tetraazapentalene, *z-TACOT*, *m.m.* 410°C; (83) 4,8-di(2,4,6-trinitrophenyl)bisfuranopyrazine, *TNBP*, 397,5°C

Слика број 28. Експлозивне материје побољшане термичке стабилности и неосјетљивости

У новије вријеме вршена су испитивања нових термостабилних експлозивних једињења на бази нитро-функционалне групе (хомолози *z-TACOT-a*). Резултати су указали на висок ниво термостабилности и неосјетљивости на удар и трење [42].

Брзи развој нанотехнологије је утицао на развој и примјену наноматеријала<sup>105</sup> у подручју високоенергетских материја. У општем смислу експлозивне материје су хомогена смјеса честица чија величина износи 1–100 микрометра ( $10^{-3}$  m). Предност смањења честица, односно довођење на тзв. наноскалу огледа се у значајном повећању контактне површине и запремине, односно, показују знатно већу специфичну површину, реактивност, каталитичке ефекте као и каталитичке ефекте на саму реакцију [43]. Карактеристике наночестица утичу на значајно повећање брзине ослобађања енергије, односно већу експлозивну снагу, бољу контролу поузданости, смањење осјетљивости и сл.



Слика број 29. Снимак електронским микроскопом RDX-а, M-RDX -честице микрометарске величине, N-RDX -честице нановеличине [44]

Поређењем физичко-хемијских и експлозивних карактеристика RDX-а, HMX-а и CL-20 микрометарске и нановеличине честица као и појединих формулација пластичних експлозива уочљиве су значајне разлике (табела 6).

Табела број 6. Физичко-хемијске и експлозивне карактеристике микро и нано експлозивних материја RDX-а, HMX-а и CL-20 и PBX формулацијама [44]

<sup>105</sup> Наноматеријали представљају материје чија величина појединачне честице износи од 1 до 100 нанометара ( $10^{-9}$  m) или су продукт примијењених нанотехнолошких поступака.

Експлозивна материја	Фрикциона осјетљивост* $\bar{p} / \%$	Ударна осјетљивост** $H_{50} / \text{cm}$	Шок осјетљивост*** $\delta / \text{mm}$	Брзина детонационог таласа $\text{ms}^{-1}$
<i>RDX</i>	80	49,8	15,38	8750
<i>N-RDX</i>	50	99,1	6,17	
<i>HMX</i>	86	44,1	13,96	9100
<i>N-HMX</i>	58	63	6,08	
<i>CL-20</i>	88	13,6	43,72	9380
<i>N-CL-20</i>	66	29,4	18,31	
<i>RDX-PBX</i>			24,65	7850
<i>N-RDX-PBX</i>			18,6	7980
<i>HMX-PBX</i>			23,74	8120
<i>N-HMX-PBX</i>			18,31	8260

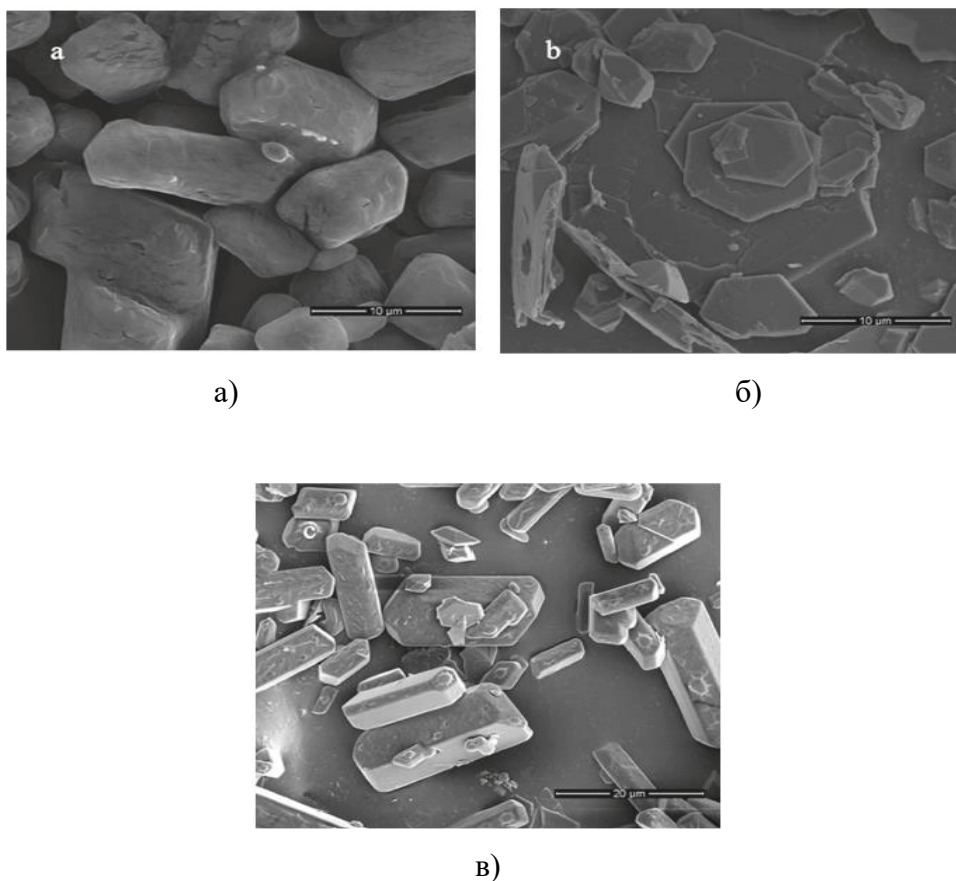
\* – тест трења клизањем (енг. *sliding friction*) \*\* – тест на ударну осјетљивост (енг. *drop-hammer test*) \*\*\* – тест на шок осјетљивост (енг. *small scale gap test, SSGT*)

Наноексплозивне материја су нашле широку примјену у војне сврхе као главно пуњење за бојеве главе, неосјетљиву муницију, пуњење за класичну муницију и муницију промјенљиве експлозивности, односно, муницију са помичном осјетљивошћу (енг. *Switchable Explosivity*)<sup>106</sup>. Примјена наночестица у енергетским материјалима, осим примјене у секундарним експлозивима има такође примјену у термитним експлозивима, пропелантима и пиротехничким средствима [45].

Развој секундарних експлозива карактерише, поред синтезе нових експлозивних материја са жељеним карактеристикама и веома интензивна истраживања у области тзв. кокрystalних експлозива, односно, примјена и развој концепта кокрystalа у области високоенергетских материја [46]. Савремени експлозиви, посматрано са становишта структуре, представљају молекуле кристалне структуре. Молекулски кристали могу се подијелити на једнокомпонентне и вишекомпонентне.

<sup>106</sup> Пуњење за бојеве главе – повећање експлозивне снаге, неосјетљива муниција – смањење осјетљивост, пуњење за класичну муницију – могућност токсичног дјеловања присуством у људском организму, муниција промјенљиве експлозивности – развој могућности неосјетљивости приликом манипулације и експлозивности приликом доласка на циљ.

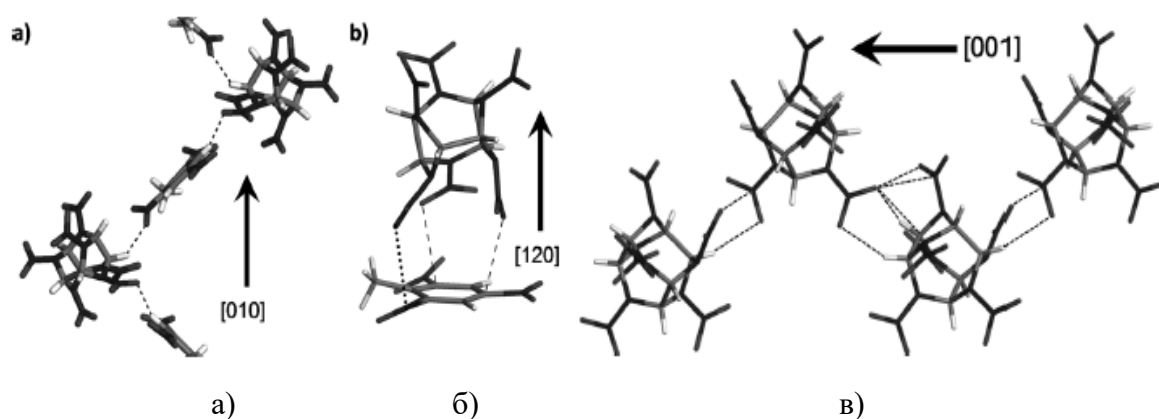
Једнокомпонентни системи се састоје од једне врсте молекула повезаних у различите кристалне форме док вишекомпонентни се састоје од двије или више врста молекула. Појам кокристал (енг. *cocrystal*) је уведен деведесетих година ради описивања молекулских кристала који су садржавали више од једне врсте молекула у смислу хемијског састава (слика 30) [47].



Слика број 30. Сlike добијене помоћу скенирајућег електронског микроскопа а) *HMX* б) *TATB*, в) *HMX/TATB* кокристала [48]

Тренутно постоји више дефиниција појма кокристал при чему је најчешће кориштена да су кокристали вишекомпонентне чврсте твари које настају из двије или више различитих хемијских врста од којих свака посједује стабилну форму при стандардном притиску и собној температури [49]. Кокристалне системе карактеришу међумолекулске интеракције као што су водикова веза, јонска интеракција, Ван дер Валсова интеракција и  $\pi$  интеракција као и одсуство трансфера протона [50]. Усљед присуства више међумолекулских интеракција између кристалних супстанци које учествују у стварању кристалних комплекса, њихове карактеристике се разликују од

карактеристика појединачних интеракција. Успостављањем међумолекуларних интеракција долази до промјене поларизације густине електрона у молекулу (дипол-дипол интеракција) а, самим тим, и до формирања кристалних система који посједују различите физичко-хемијске карактеристике у односу на карактеристике кристалних система појединачних компоненти [51]. Међумолекулске интеракције и формиране кристалне структуре генеришу различите физичко-хемијске особине насталих супстанци у односу на физичко-хемијске особине појединачних компоненти. Досадашња истраживања у области кокристалних експлозива су вршена као теоретска и експериментална. Теоретски резултати су добијени примјеном одговарајућег софтвера на основу теорије линеарне комбинације атомских орбитала (енг. *linear combination of atomic orbitals, LCAO*), теорије функционалне густине (енг. *Density functional theory, DFT*) и густине стања (енг. *DOS-density of state*) те молекулске динамичке симулације (енг. *molecular dynamics simulation, MD simulation*) [52].



Слика број 31. Међумолекулске интеракције између CL-20 и TNT: а) водикове везе које се налазе у комплетној кристалној структури; б) интеракција нитро-групе и ароматског прстена (црткана линија) и нитро-нитро групе (тачкаста линија) која није присутна у комплетној кристалној структури; в) међумолекулске интеракције између сусједних молекула CL-20 [53]

Већи број експерименталних и теоретских истраживања експлозивних кокристалних материја спроведена су на кокристалним системима на основу HMX-a, CL-20 и TNT-a [52]. Резултати истраживања указују да кокристални системи посједују побољшање појединих карактеристика у односу на карактеристике кристалних материја које учествују у структури кокристала (табела 7).

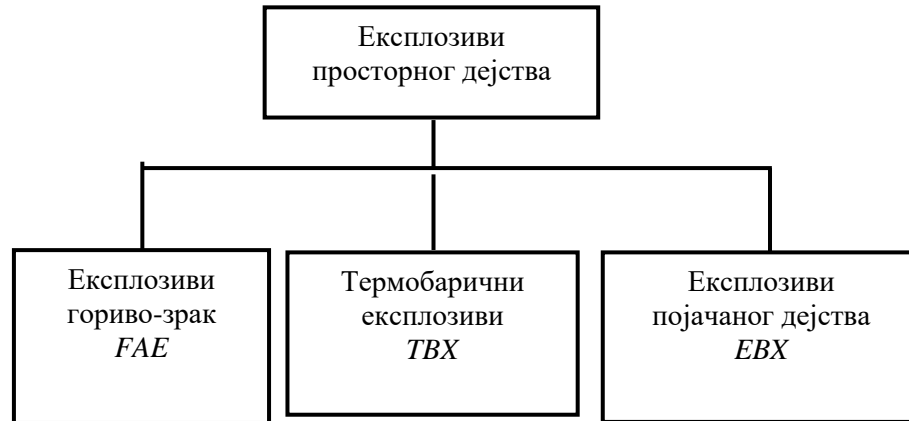
Табела број 7. Експлозивне карактеристике *CL-20*, *HMX*, *BTF*, смјеше *CL-20/HMX*, кокристала *CL-20/BTF*, кокристала *CL-20/HMX* [54,55]

Експлозив	Густина $g/cm^3$	Детонациона брзина $m/s$	Детонациони притисак $GPa$	Осјетљивост на механички удар	
				$H_{50}/cm$	$P/\%$
<i>CL-20</i>	2,035	9385	44.9	13,1	100
<i>HMX</i>	1,910	9324	39,3	19,6	84
<i>BTF</i>	1,901	8425	34.3	-	-
Смјеша <i>CL-20/HMX</i>	-	-	-	15,4	96
Нано <i>CL-20/HMX</i>	-	-	-	47,3	64
Кокристал <i>CL-20/BTF</i> кокристал	1.918	8969	39.1	-	-

Развој војног наоружања и војне технике довео је до развоја нове класе оружја под називом волуметријска оружја<sup>107</sup>. Енергетске материје (експлозиви) кориштене за израду ове класе оружја се називају експлозиви просторног дејства. Стандардне експлозивне материје, употријебљене за израду убојних средстава, своје дјеловање заснивају на начин да експлозивни процес доводи до фрагментације (цијепаче на више дијелова) материјала у којем је смјештена експлозивна материја при чему се дејство на циљу остварује помоћу фрагментираних сегмената. Други ефекат који се остварује на циљу представља ефекат рушења усљед дејства детонационог таласа, односно, притиска експлозије који је еквивалентан брзини детонационог таласа. Карактеристика ударног таласа изазваног процесом експлозије стандардних експлозива је високи детонациони притисак (ударног таласа) са кратким временским трајањем а резултат тога је мали енергетски импулс. На тај начин изазван ударни талас, показује изразиту тенденцију опадања разорне моћи ударног таласа са повећањем удаљености од центра експлозије и протоком времена а, самим тим, и смањење разарајућег ефекта на околину. Код експлозива просторног дејства, нагласак је стављен на ефекте експлозије као што су температура и притисак. Карактеристика експлозива просторног дејства је нешто нижи детонациони притисак са дужим временским трајањем, а резултат тога је већи енергетски импулс а, самим тим, и већи разарајући ефекат на околину. У групи

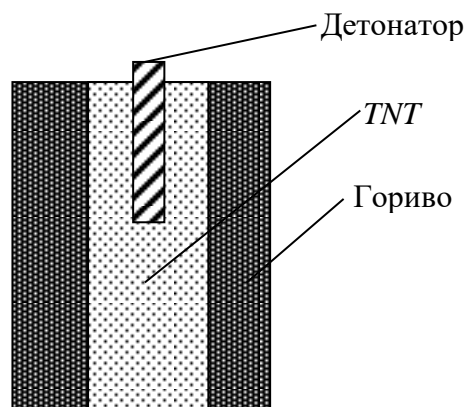
<sup>107</sup> Оружја и борбени системи чији се ефекти на околину заснивају на дејству веома високих притисака

експлозива просторног дејства се сврставају тзв гориво-зрак експлозивни (енг. *fuel-air explosives, FAE*), термобарични експлозивни (енг. *thermobaric explosives, TBX*) и експлозивни појачаног дејства (енг. *enhanced blast explosives, EBX*) (слика 32).



Слика број 32. Класификација експлозива просторног дејства

Гориво-зрак експлозивни представљају смјешу енергетских материја (називају се још и горива, гориви елемент) које, приликом контакта са ваздухом, у коме се налази кисеоник потребан за одигравање процеса детонације, могу изазвати експлозију. На слици 33 је шематски приказана стандардна конфигурација убојних средстава које користе гориво-зрак експлозиве.



Слика број 33. Стандардна конфигурација убојних средстава са FAE експлозивом [56]

Карактеристика горива је да одређена концентрација горива у ваздуху (локално посматрано) посједује могућност детонирања. Да би се покренуо процес експлозије,

потребно је извршити мијешање горива са ваздухом из околине а затим извршити иницирање настале смјеше. Већина горива се распршује експлозивним пуњењем класичног експлозива при чему се ствара облак аеросолне смјеше<sup>108</sup> која експлодира од 0,1 до 5 секунди након распршења горива у ваздуху. Иницирање аеросолног облака се може вршити ударним таласом иницијалног експлозива или хемијским иницирањем<sup>109</sup>. Класификација се може извршити на основу агрегатног стања употребљеног горива: чврсти гориво-зрак експлозиви (енг. *solid fuel-air explosives, SFAE*) и течност-чврсти гориво-зрак експлозиви (енг. *liquid fuel-air explosives, LFAE*). Најчешће кориштена горива у гориво-ваздух конфигурацијама су метан, етилен-оксид, пропилен оксид и мјешавина метил ацетилен пропандиена и пропана (*MAPP*) [57]. Поређењем количине ослобођене енергије између *FAE* експлозива и *TNT*-а (конвенционалног експлозива) приликом експлозије видљиво је да експлозиви гориво-зрак ослобађају значајно већу количину енергије по јединици масе/волумена.

Табела број 8. Количина ослобођене енергије по јединици масе и запремине за различите *FAE* и *TNT* [58]

Гориво	Ослобођена енергија по јединици масе ( <i>kcal/g</i> )	Ослобођена енергија по јединици волумена ( <i>kcal/cm<sup>3</sup></i> )
<i>Decane</i> <sup>A</sup>	11,3	8,5
<i>Kerosene</i> <sup>B</sup>	10,2	8,2
<i>Propylene Oxide</i> <sup>B</sup>	7,9	6,6
<i>Aluminium</i> <sup>Г</sup>	7,4	11,0
<i>Ethylene Oxide</i> <sup>D</sup>	6,9	6,0
<i>TNT</i> <sup>B</sup>	1,1	1,6

<sup>A</sup>– декан је алкан-угљоводоник са хемијском формулом  $C_{10}H_{22}$ ; <sup>B</sup>–керозин, парафин или уље за лампе је запаљива течност угљоводоника која се добија из нафте; <sup>B</sup>– пропилен оксид је акутно токсично и канцерогено органско једињење са молекулском формулом  $CH_3CHCH_2O$ ; <sup>Г</sup>– алуминијум (лат. *aluminium*) јесте хемијски елемент, сребренасто-бели

<sup>108</sup> Аеросоли, односно, аеросолне смјеше представљају чврсте честице или мале капи течности дисперговане у атмосферском ваздуху.

<sup>109</sup> Користи се двоструки иницирајући експлозив, први који распршује гориво и други који иницира настали облак. Код хемијског иницирања користе се материје које, или међусобно реагују или са горивом, истовремено се распршују са горивом док је топлота реакције довољна за активирање облака.

лаки метал са симболом Al и атомским бројем 13; <sup>Д</sup>- етилен-оксид је органско једињење са формулом  $C_2H_4O$ ; <sup>Б</sup>- тринитротолуен.

У идеалним условима, потенцијална горива, услед велике топлоте експлозије, могу ослободити значајно веће количине енергије у поређењу са TNT-ом. Имајући у виду да ваздух садржи 21% кисеоника, ефикасност FAE експлозива је мања од 40%. Такође, утицај има значајно присуство азота у ваздуху који разријеђује систем и апсорбује топлоту те неравномјерност концентрације кисеоника у реалном систему.

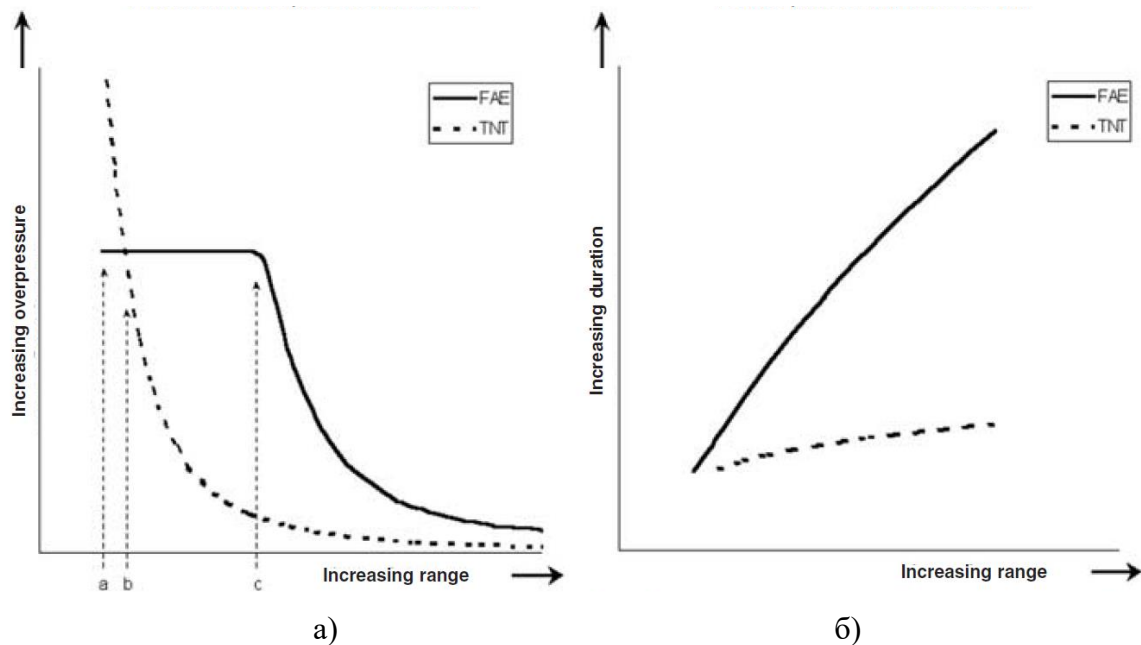
Табела број 9. Топлота експлозије за различите потенцијалне FAE и TNT [59]

Гориво	Топлота експлозије (MJ/kg)
<i>Propane</i> <sup>A</sup>	38
<i>Ethylene (Acetylene 3)</i> <sup>B</sup>	5
<i>Oxirane</i> <sup>B</sup>	21
<i>Gasoline (Aerosol)</i> <sup>Г</sup>	37
<i>Aluminium (Dust)</i> <sup>Д</sup>	16
<i>TNT</i> <sup>Б</sup>	4,2

<sup>A</sup>- пропан, (молекулска формула  $C_3H_8$ ), безбојан је алкан, у гасовитом агрегатном стању; <sup>Б</sup>- етен (ранији назив етилен) јесте хемијско једињење које спада у групу алкена. Његова формула је  $C_2H_4$ ; <sup>Б</sup>- етилен-оксид је органско једињење са формулом  $C_2H_4O$ ; <sup>Г</sup>- бензин је провидна запаљива течност добијена од нафте која се првенствено користи као гориво у већини мотора са унутрашњим сагоријевањем; <sup>Д</sup>- алуминијум (лат. aluminium) јесте хемијски елемент, сребренасто-бели лаки метал са симболом Al и атомским бројем 13; <sup>Б</sup>- тринитротолуен.

Ударни талас настао детонацијом FAE експлозива посједује различите особине у односу на ударни талас формиран услед детонације конвенционалних секундарних експлозива. Карактеристике ударног таласа насталог детонацијом конвенционалних експлозива карактерише веома висок максимални притисак релативно кратког времена трајања док ударни талас FAE експлозива карактерише нижи максимални притисак са значајно дужим временом трајања (слика 34) а што узрокује да је импулс ударног таласа FAE експлозива значајно већи у односу на импулс ударног таласа

конвенционалних експлозива<sup>110</sup>. Ограничења ове класе експлозива су везана за могућност постизања одговарајућег стехиометријског односа<sup>111</sup> са ваздухом у ком је распршено гориво као и климатски фактори који утичу на формирани експлозивни облак [60].



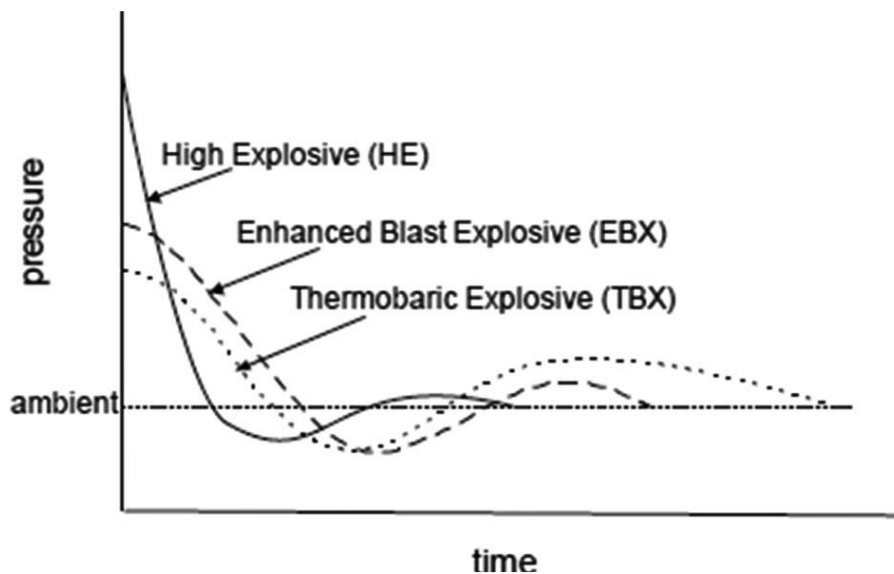
Слика број 34: А) зависност максималног притиска (*overpressure*) са повећањем површине на коју дјелује ударни талас настао детонацијом 1 кг етилен-оксида (FAE експлозив) и 1 кг TNT; б) зависност времена трајања максималног притиска ударног таласа са повећањем површине на коју дјелује ударни талас настао детонацијом 1 кг етилен-оксида (FAE експлозив) и 1 кг TNT.

Експлозивне материје које карактерише могућност генерисања тзв. термобаричног ефекта се називају термобарични експлозиви (енг. *thermobaric explosive, TBX*). Термобарични ефекат представља спој дејства повишеног притиска (разорно-рушећи, бласт ефекат) и количине ослобођене топлотне енергије (високе температуре и топлотног флукса) при чему је настали ударни талас знатно дужег временског трајања умјеренијег интензитета у односу на стандардне секундарне експлозиве (слика 35) [61]. За разлику од експлозива појачаног дејства (ЕВХ) у којима је акценат на појачању ударног таласа, код термобаричних експлозива нагласак је дат на термичке

<sup>110</sup> Мјера способности ударног таласа да изврши утицај на структуре (рушење) изражава се путем импулса (вриједност притиска у одређеном времену на одређену површину).

<sup>111</sup> Стехиометријски односи су квантитативни односи који слиједи из хемијских формула или хемијских једначина.

карактеристике. Механизам реакције термобаричних експлозива је сличан начину реакције FAE експлозива. Разлика се огледа у томе да су гориви елементи у FAE експлозивима различита органска једињења док су гориви елементи у TBX експлозивима метали у елементарном облику.



Слика број 35. Приказ зависности величине притиска у времену од момента детонације за класичне (HE), термобаричне (TBX) и појачаног дејства (EBX) експлозива [62]

Савремене експлозивне смјеше термобаричних карактеристика се израђују као пластични ливени експлозиви који су састављени од:

- експлозивне компоненте
- метала (горива компонента)
- оксиданса
- полимерног везива.

Експлозивне компоненте представљају стандардни и побољшани секундарни експлозиви као што су октоген (HMX), хексоген (RDX), пентрит (PETN), NTO, FOX-7, FOX-12, TATB, CL-20.

Гориву компоненту чине хемијски реактивни метали са високом вриједношћу енталпије<sup>112</sup> који не посједују довољну брзину реакције за учешће у реакцијама које се дешавају у моменту детонације те учествују у реакцијама са гасовитим продуктима експлозије или кисеоником присутним у зраку. Ради побољшања појединих карактеристика као што су смањење температуре паљења и сагоријевања, високи ниво степена сагоријевања, смањење токсичности, користе се смјеше елементарних метала. Посједују значајно већу енергију реакције у односу на енергију реакције стандардних експлозива. У групу хемијски реактивних метала се убрајају:

- елементарни метали (алуминијум, бор, магнезијум, берилијум, цирконијум, наночестице волфрама),
- смјеше елементарних метала (бор-алумунијум, бор-магнезијум),
- легуре метала (алуминијум-бор, алуминијум-магнезијум) и
- инкапсулирани метали (модификоване честице алуминијума с танким превлакама – филмовима никла, бакра, гвожђа, хафнијума, цирконијума, полимерним превлакама, флуоридним комплексима).

Оксиданси, једињења која су богата кисеоником и лако отпуштају кисеоник доприносе већем степену оксидације металних честица. Најширу примјену имају амонијум-перхлорат ( $NH_4ClO_4$ ), калијум-перхлорат ( $KClO_4$ ), натријум-нитрат ( $NaNO_3$ ), калијум-нитрат ( $KNO_3$ ), амонијум-нитрат ( $NH_4NO_3$ ), амонијум-динитрамид ( $H_4N_4O_4$ ) и хидразинијум-нитроформат ( $CH_5N_5O_6$ ,  $HNF$ ).

Полимерна везива сачињавају преполимери, умреживачи (умрежавајући агенси) и адитиви (пластификатори, тзв. бондинг агенси, површински активне материје, стабилизатори, катализатори). У употреби су инертне преполимерне супстанце на основи хидрокси-терминарних<sup>113</sup> полиетара ( $HTPE$ ), карбокси-терминираних полибутадиена ( $CTPB$ ), хидрокси-терминираних полибутадиена ( $HTPB$ ), хидрокси-терминирани капролактонски етри ( $HTCE$ ), поликапролактони ( $PCL$ ) и поликапролактонски полиоли ( $PCP$ ).

---

<sup>112</sup> Енталпија је термодинамичка функција стања равнотеже система која је представљена као збир унутрашње енергије и производа притиска и запремине.

<sup>113</sup> Терминација означава завршетак ланчане реакције у процесима полимеризације (везивања молекула полимера). Терминирано једињење представља полимерну супстанцу у чијој структури се, усљед међусобне реакције радикала, губи њихов радикалски карактер и настају стабилни макромолекули.

Ради повећања експлозивности, развијена су тзв. енергетска полимерна везива у која се сврставају глицидил азид-полимер (енг. *GAP*), поли(3-нитратометил-3-метилоксетан) (енг. *polyNIMMO*), поли(глицидил нитрат) (енг. *polyGLYN*) те различити флуорополимери, поливинилнитрати, полинитроаромати и нитровани полибутадиени (енг. *NHTPB*). Најпознатији савремени енергетски полимер у употреби је блок полимер сачињен из сегменат 3-азидометил-3-метилоксетана (енг. *polyAMMO*) и поли-3,3'-бис(азидометил) оксетана (енг. *polyBAMO*). Умреживачи (умрежавајући агенси) имају улогу креирања карактеристика тврдоће, чврстоће и еластичности у широком распону. У практичној примјени најзаступљенији су алифатски и ароматични полиизоцијанати<sup>114</sup>. Адитиви имају улогу модификације различитих физичко-хемијских карактеристика полимера као и утицај на провођење технолошких операција и поступака у току технолошког процеса производње [61, 63].

За разлику од термобаричних експлозива у којима горива компонента претежно ступа у реакције са продуктима детонације експлозивне компоненте или зраком, при чему се ефекат значајније огледа у повећању температуре, експлозиве појачаног дејства карактерише чињеница да гориви елементи ступају у реакцију претежно приликом детонације експлозивне компоненте при чему се ефекат огледа у повећању детонационог притиска, односно, ударно-рушећег ефекта. Такође је потребно напоменути да хетерогене експлозивне смјеше могу у зависности од физичке структуре и величине честица да показују појачане термичке или експлозивне карактеристике, односно, да се сврставају у термобаричне експлозиве или експлозиве појачаног дејства. Утицај физичке структуре и величине честица експлозивне материје на поједине карактеристике могу се уочити на примјеру различитих експлозивних смјеша, произведених у облику гранула.

Табела број 10. Састав експлозивних смјеша [64]

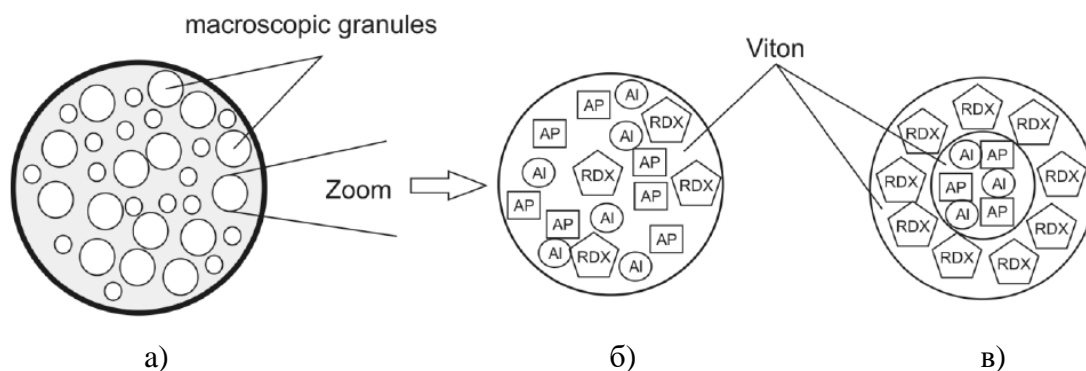
Ознака узорка	1*	2*	3**	4**	5****	6****
---------------	----	----	-----	-----	-------	-------

<sup>114</sup> Алифатски полиизоцијанати: 1,6-хекаметилендиизоцијанат (енг. *HDI*), изофородиизоцијанат (енг. *IPDI*), 1,1-метилен бис(4-изоцијанатоциклохексан), 1,4-циклохексилдиизоцијанат (енг. *CHDI*), ароматични полиизоцијанати : 2,4-толуендиизоцијанат, 2,6-толуендиизоцијанат (енг. *TDI*), 4,4'-метилендифенилдиизоцијанат (енг. *MDI*), 1,5-нафталендиизоцијанат (енг. *NDI*), 4,4'-дифенилдиизоцијанат

Компонента	маса %					
RDX кристални ( <i>RDX</i> )	50	18,2	50	18,2	50	50
Амонијум-перхлорат ( <i>AP</i> )	10	18,2	10	18,2	10	10
Алуминијум (прах) ( <i>Al</i> )	30	54,5	30	54,5	30	30
Витон (везиво) <sup>***</sup>	10	9,1	10	9,1	10	10

\* – честице алуминијума износе 44 микрометра, \*\* – честице алуминијума величине 44–149 микрометара, \*\*\* – кополимер винил-флуорида и перфлуоропропилена, \*\*\*\* – конфигурација хомогенизиране смјеше са алуминијумским прахом величине честице 44 микорметра, \*\*\*\*\* – конфигурација *core-shell* с алуминијумским прахом честица величине 44–149 микрометара

Одговарајућим технолошким поступцима припремљене су двије врсте гранула (зрна). Једна врста представља хомогенизовану смјешу а друга врста тзв. структуру језгро-љуска (енг. *core-shell structure*) (слика 36).



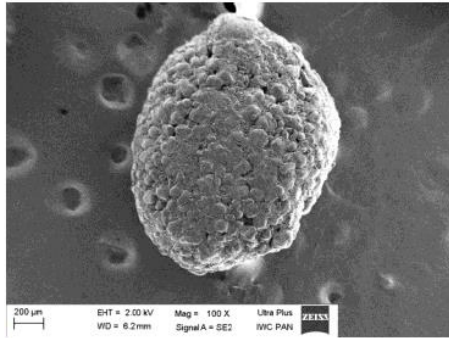
*RDX*-хексоген; *AP*-амонијум-перхлорат; *Al*-алуминијум; *визон*-везивни полимер

Слика број 36. Шематски приказ: а) макроскопска структура вишекомпонентних гранула; б) хомогена структура; в) конфигурација језгро-љуска [64]

Визуелни изглед и снимак електронским микроскопом је приказан на слици 37.



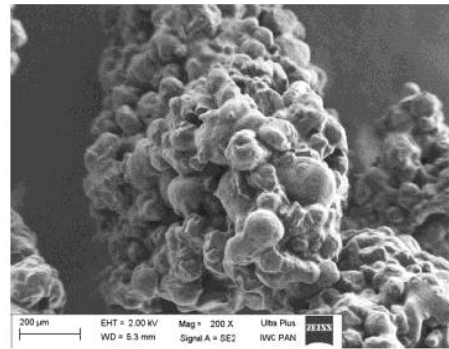
а)



б)



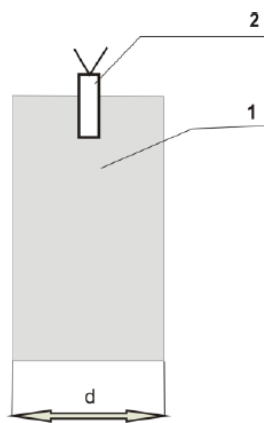
в)



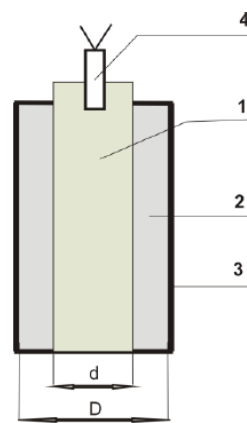
г)

Слика број 37. Визуелни изглед (а, в) и снимак електронским микроскопом (б, г) испитиваног узорака са а, б хомогеном конфигурацијом и в, г конфигурацијом језгро-љуска [64]

Такође су кориштена два начина припреме пуњења (ливено-пресовано и слојевито, слика 38).



а)



б)

Слика број 38. Шематски приказ а) ливено-пресовано пуњење (1-композит, 2-детонатор); б) слојевито пуњење (1-језгро RDX-а, 2-композит, 3-папирна туба, 4-детонатор) [64]

Резултати испитивања су показали да структура макроскопских гранула показује значајан утицај на експлозивне карактеристике испитиваних смјеша те да карактеристике ливено-пресованог пуњења у већем степену одговарају карактеристикама експлозива повећаног дејства (ЕВХ експлозив) док слојевито пуњење посједује карактеристике повећања термичког ефекта (ТВХ експлозив) [65].

Термитни експлозиви не представљају у правом смислу секундарне експлозиве. За разлику од „правих” секундарних експлозива чији се процес разградње (експлозија) одвија путем процеса детонације, експлозивни процес термитних експлозива се одвија путем дефлаграције при чему се могу класификовати као пиротехничке материје. С обзиром на савремену употребу у функцији ракетних горива, такође се могу класификовати као пропеланти (ракетна горива). Они посједују високи ниво топлотне енергије, односно, развијају високу температуру приликом процеса разлагања што представља једну од карактеристика секундарних експлозива (температура која се развија приликом реакције износи око  $2200^{\circ}\text{C}$ ). Такође их карактерише висока брзина процеса разлагања (дефлаграције) која је око 1000 пута већа у односу на процес горења секундарних конвенционалних експлозива. Термитни експлозиви представљају смјешу металних оксида који имају улогу оксиданта и метала који представљају гориво. Термитна реакција се одиграва према изразу:



$M^1_{(c)}$  – метал, гориви елемент у чврстом стању

$M^2O_{(c)}$  – метални оксид другог метала, оксидант у чврстом стању

$M^1O_{(c)}$  – метални оксид горивог елемента након реакције

$M^2_{(c)}$  – метал-оксида метала након реакције

$\Delta H$  – промјена енталпије система.

За израду термитне смјеше, користе се различити метали и метални оксиди у зависности од бројних захтијеваних карактеристика као што су висока топлота формирања, висока густина, ниска температура топљења, ниска токсичност и компатибилност са другим састојцима (табела 11).

*Табела број 11. Врсте горива и оксиданаса кориштених у термитним експлозивима [45]*

Горива компонента (гориво)		Оксидациона компонента (оксиданс)	
Литијум ( <i>Li</i> )	Цирконијум ( <i>Zr</i> )	Бор-триоксид ( $B_2O_3$ )	Ник(II)-оксид ( $NiO$ )
Берилијум ( <i>Be</i> )	Неодијум ( <i>Nd</i> )	Силицијум-диоксид ( $SiO_2$ )	Никл-(III)-оксид ( $Ni_2O_3$ )
Бор ( <i>B</i> )	Хафнијум ( <i>Hf</i> )	Хром(III)-оксид ( $Cr_2O_3$ )	Јод-пентоксид ( $I_2O_5$ )
Магнезијум ( <i>Mg</i> )	Тантал ( <i>Ta</i> )	Хром(II)-оксид ( $CrO$ )	Бакар(II)-оксид ( $CuO$ )
Алуминијум ( <i>Al</i> )	Торијум ( <i>Th</i> )	Ниобијум-пентоксид ( $Nb_2O_5$ )	Бакар(I)-оксид ( $Cu_2O$ )
Итриј ( <i>Y</i> )		Манган(IV)-оксид ( $MnO_2$ )	Волфрам-триоксид ( $WO_3$ )
		Паладијум(II)-оксид ( $PdO$ )	Молибден(VI)-оксид ( $MoO_3$ )
		Гвожђе(III)-оксид ( $Fe_2O_3$ )	Жива(II)-оксид ( $HgO$ )
		Сребро(I)-оксид ( $Ag_2O$ )	Бизмут(III)-оксид ( $Bi_2O_3$ )
		Кобалт(II)-оксид ( $CoO$ )	Олово(IV)-оксид ( $PbO_2$ )
		Калај(IV)-оксид ( $SnO_2$ )	Триуранијум-октаоксид ( $U_3O_8$ )

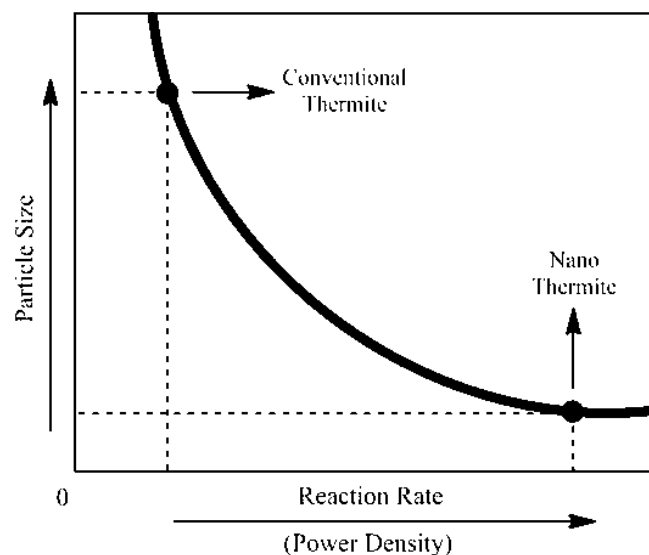
Захваљујући физичко-хемијским и термодинамичким карактеристикама, најшире примјењивани метал у функцији горивог елемента је алуминијум (*Al*) док се као оксиданси најчешће користе гвожђе-оксид, манганов-оксид и хромни-оксид. За специјалне намјене употребљавају се бакарни оксид и поједини флуорополимери (тефлон)<sup>115</sup>. Смјеша алуминијума или неке друге редукционе материје и сухог леда<sup>116</sup> представља тзв. криогене термитне смјеше те се након иницирања и хемијске реакције могу добити мање количине дијаманта.

Развој и примјена нанотехнологије у многим областима су веома значајно утицали и на област енергетских материја међу којима и на термитне експлозиве. Постоје различити називи за термитне смјеше чије су величине припадајућих компоненти реда наночестица. Назив нанотермити (енг. *nanothermites*) потиче од величине честица које

<sup>115</sup> Флуорополимери представљају групу полимера који посједују вишеструку везу угљик-флуор. Најзначајнији флуорополимер је тефлон, политетрафлуороетилен.

<sup>116</sup> Смрзнути угљен-диоксид

се користе у овим енергетским смјесама за разлику од стандардних термитних смјеса при чему су величине честица реда микрона. Други назив је метастабилни интермолекуларни композити (енг. *metastable intermolecular composites, MICs*) а који се повезује на чињеницу да су смјесе металних оксида и најчешће употребљаваног горива, алуминијума, стабилни до температуре паљења након чега долази до тзв. процеса самоумножавања синтезе високих температура (енг. *self-propagating high-temperature synthesis, SHS*) који продукује термодинамички производ метала и алуминијум-оксида. С обзиром на то да наночестице термитних експлозива показују веома различите карактеристике (слика 39) у односу на исте честице микронске величине као што су брзина сагоријевања и експлозивно понашање, сам процес се може више окарактерисати као детонациони процес него процес дефлаграције при чему се користи термин супертермити (енг. *superthermite*) [66].



Слика број 39. Вриједности брзине реакције (густине енергије) у односу на величину честица [66]

Осим термитне смјеше наночестица алуминијума и металног оксида развијени су и биметалне енергетске структуре које укључују два метала у функцији горива као што су никл/титан ( $Ni/Ti$ ), кобалт/алуминијум ( $Co/Al$ ), никл/алуминијум ( $Ni/Al$ ) и платина/алумијум ( $Pt/Al$ ). Усљед веома великог обима истраживања на пољу нанотермита, може се извршити подјела нанотермитних енергетских материја у три генерације. Прву генерацију представља хомогена смјеша наночестица алуминијума и металних оксида. Другу генерацију представљају хомогене смјеше обложених честица

нанометарских димензија (структуре језгро-љуска) док се трећа генерација огледа у тродимензионалним енергетским материјалима и дизајнираним материјалима према захтјевима (енг. *Ordered assembly of nano-energetic materials*).

Величина честица, врста оксиданса и начин производње у значајној мјери утичу на карактеристике како термитних материја тако и на карактеристике процеса дефлаграције у којима учествују ове материје. Поређењем термитних смјеша алуминијума и бакарног оксида и алуминијума и волфрамовог оксида уочавају се различите физичко-хемијске и експлозивне карактеристике у зависности од врсте оксиданса, величине и физичке форме честице [66].

Табела број 12. Брзина горења и количина сагорјеле енергетске материје у времену за термитну смјешу алуминијума и бакарног оксида у зависности од величине честице [66]

Бакарни оксид, $CuO$	Алуминијум, $Al$	Брзина горења ( $ms^{-1}$ )	Количина сагорјеле термитне смјесе ( $gs^{-1}$ )
Микрон	Микрон	220	2700
Микрон	Нано (49% $Al$ )	200	1100
Нано	Микрон	630	4850
Нано	Нано (49% $Al$ )	900	4000

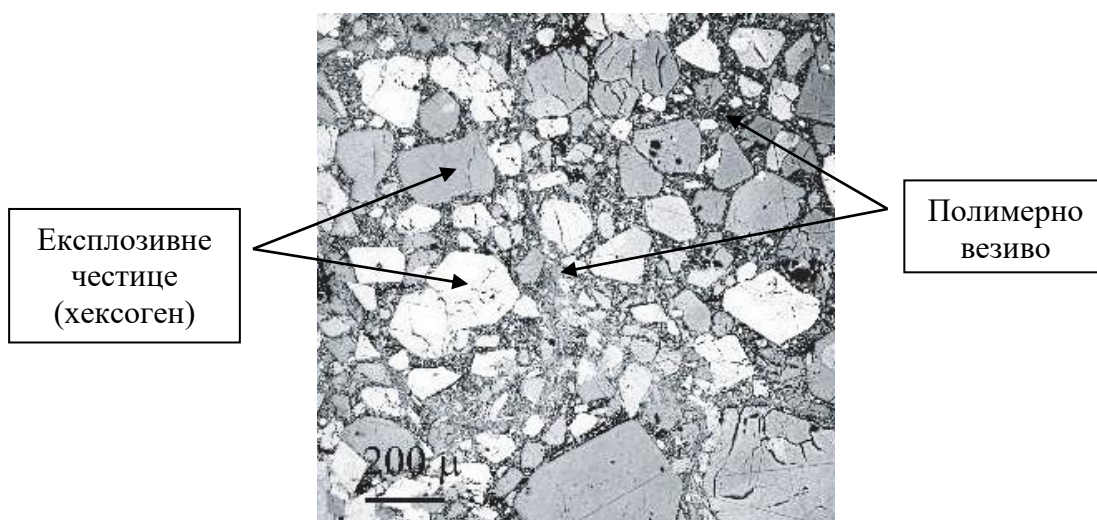
Табела број 13. Зависност брзине горења за термитну смјешу алуминијум и бакарни оксид у зависности од физичке форме наночестица. [45]

Састав термитне смјеше	Брзина горења ( $ms^{-1}$ )
Н-бакар оксид/н-алуминијум	550–780
Нано-тубе бакар оксид/н-алуминијум	2100–2400
Нано-шипке бакар оксид/н-алуминијум	1500–1800
Нано-жица бакар оксид/н-алуминијум	1900
Нано-шипка бакар оксид/н-алуминијум/полимер	1800–1900
Нано-шипке самостално састављене бакар оксид/н-алуминијум	1800–2200

Табела број 14. Осјетљивост на удар и трење за термитну смјешу алуминијум и тунгстен оксид у зависности од величине честице [66]

Алуминијум, $Al$ (nm)	Тунгстен-оксид, $WO_3$ (nm)	Осјетљивост на удар (J)	Осјетљивост на трење (N)	Брзина горења ( $ms^{-1}$ )
1912	724	>49 (неосјетљив)	>353 (неосјетљив)	<0,08
51	50	42 (неосјетљив)	<4,9 (веома осјетљив)	7,3

Полимерима везани експлозивни (енг. *polymer bonded explosives, plastics bonded explosives, PBX*) јесу врста композита са високим садржајем честица, углавном састављених од високоенергетских једнокомпонентних експлозивних честица и полимерног везива [67]. Кристалне честице секундарних експлозива су међусобно везане у матрици кориштењем мале количине синтетичког полимера (5–10 масених %).



Слика број 40. Микроскопска слика пластичног експлозива PBX 9501 са садржајем 92 мас. % хексогена и 8 мас. % везивне материје (смјеша Estane 5703<sup>117</sup> и пластификатора (BDNPA/F<sup>118</sup>), 1:1)[68]

<sup>117</sup> Термопластични полиуретан

<sup>118</sup> Bis(2,2-dinitropropyl)acetal/bis(2,2-dinitropropyl)formal (BDNPA/BDNPF, BDNPA/F), пластификатор.

(Пластификатор је супстанца која се додаје материјалу да би био мекши и флексибилнији, да би се повећала његова пластичност, смањено његово вискозитет и/или да би се смањило трење током руковања у производњи).

Најчешће кориштени назив за ову врсту експлозива је пластични експлозив. Ову врсту експлозивних материја карактерише пластичност, односно, могућност лаког и једноставног обликовања због чега се још називају и кит-експлозиви. Пластични експлозиви су развијени током Другог свјетског рата у циљу смањења осјетљивости до тада кориштених експлозива и експлозивних смјеса. Осим кристалних честица секундарних експлозива, у смјеси се налазе вазелин или течна нитро-компонента који су давали пластичност експлозивне смјесе, односно, могућност ручног обликовања смјесе према потребама при чему је ниво осјетљивост ових смјеса приликом кориштења обезбјеђивао довољну безбједност. У табели 15 су приказане пластичне експлозивне смјесе кориштене и развијене током и након Другог свјетског рата.

Табела број 15. Пластични експлозиви кориштени и развијени током и након Другог свјетског рата

Назив	Састав експлозивне смјесе
Састав А	88,3% <i>RDX</i> , 11,7% пластификатор
Састав Б (циклотол)	60% <i>RDX</i> , 39% <i>TNT</i> , 1% везиво (восак)
Октол	75% <i>HMX</i> , 25% <i>RDX</i>
Торпекс	42% <i>RDX</i> , 40% <i>TNT</i> , 18% алуминијум
<i>H6</i> <sup>119</sup>	44% <i>RDX</i> , 29,5% <i>TNT</i> , 21% алуминијум у праху, 5% парафински восак, 0,5% калцијум-хлорид
Окфол	96,5% <i>HMX</i> , 3,5 везиво (восак)
Баронал	Баријум-нитрат, <i>TNT</i> , алуминијум
Минол-2	40% <i>TNT</i> , 40% амонијум-нитрат, 20% алуминијум
Пентолит	50% <i>PETN</i> , 50% <i>TNT</i>
Пикратол	52% пикринска киселина, 48% <i>TNT</i>
<i>PIPE</i>	81% <i>PETN</i> , 19% <i>Gulf Crown E</i> уља*
<i>PTX-1</i>	30% <i>RDX</i> , 50% тетрил, 20% <i>TNT</i>
<i>PTX-2</i>	41-44% <i>RDX</i> , 26-28% <i>PETN</i> , 28-33% <i>TNT</i>
<i>PVA-4</i>	90% <i>RDX</i> , 8% <i>PVA</i> **, 2% дибутил фталат

<sup>119</sup> Експлозивна формулација кориштена као секундарни експлозив за МОАВ бомбу (енг. *Massive Ordnance Air Blast, GBU-43 / B*) масе 9500 килограма и представља једну од највећих конвенционалних бомби икада кориштених.

<i>RIPE</i>	85% <i>RDX</i> , 15% <i>Gulf Crown E</i> уља
Тетритол	70% тетрил, 30% <i>TNT</i>

\*– вишенамјенске масти на бази литијумског сапуна; \*\*– поливинил-алкохол

Даљи развој пластичних експлозивних материја и смјеса је вршен у циљу смањења осјетљивости као и лакшег, једноставнијег и безбједнијег руковања. За израду се користе различите полимерне материје у функцији везивног средств. Најпознатији представници ове групе експлозивних материја су пластични експлозиви под називом семтекс и Ц-4.

Табела број 16. Састав пластичних експлозива семтекс и Ц-4

Назив	Састав експлозивне смјеше
Састав Ц4	90% <i>RDX</i> , 10% поли изобутилен
Семтекс 1А (семтекс 10) (за минирање)	76% <i>PETN</i> , 4,6% <i>RDX</i> , 9,4% везиво стирен-бутадиен, 9% пластификатор н-октил фталат, 0,5% антиоксиданс н-фенил-2-нафтиламин, 0,5% пигмент под називом судан IV
Семтекс Н (хладна обрада метала–отврдњавање)	40,9% <i>PETN</i> , 41,2% <i>RDX</i> , 9% везиво стирен-бутадиен, 7,9% пластификатор н-октил фталат, 0,5% антиоксиданс н-фенил-2-нафтиламин, 0,5% пигмент под називом судан I
Семтекс 2Р (бустер, појачивач)	58,45% <i>PETN</i> , 41,2% <i>RDX</i> , 9,2% везиво стирен бутадиен, 8,45% пластификатор н-октил фталат, 0,5% антиоксиданс н-фенил-2-нафтиламин, варијабилно

У циљу замјене постојећих пластичних експлозива старије генерације развијен је већи број пластичних експлозива различите формулације и намјене кориштењем конвенционалних секундарних експлозива и различитих полимерних материја.

Табела број 17. Приказ различитих формулација пластичних експлозива [69]

Ознака	Састав експлозива	Везивни састојак
<i>EDC-29</i>	$\beta$ - <i>HMX</i> 95%	5% <i>HTPB</i> <sup>120</sup>

<sup>120</sup> Хидрокситерминирани полибутадиен

<i>EDC-37</i>	<i>HMX/NC 91%</i>	<i>9% полиуретанска гума</i>
<i>LX-04-1</i>	<i>HMX 85%</i>	<i>Viton-A<sup>121</sup> 15%</i>
<i>LX-07-2</i>	<i>HMX 90%</i>	<i>Viton-A 10%</i>
<i>LX-09-0</i>	<i>HMX 93%</i>	<i>BDNPA<sup>122</sup> 4.6%; FEFO<sup>123</sup> 2.4%</i>
<i>LX-09-1</i>	<i>HMX 93.3%</i>	<i>BDNPA 4.4%; FEFO 2.3%</i>
<i>LX-10-0</i>	<i>HMX 95%</i>	<i>Viton-A 5%</i>
<i>LX-10-1</i>	<i>HMX 94.5%</i>	<i>Viton-A 5.5%</i>
<i>LX-11-0</i>	<i>HMX 80%</i>	<i>Viton-A 20%</i>
<i>LX-14-0</i>	<i>HMX 95.5%</i>	<i>Estane<sup>124</sup> &amp; 5702-Fl 4.5%</i>
<i>LX-15</i>	<i>HNS 95%</i>	<i>Kel-F 800<sup>125</sup> 5%</i>
<i>LX-16</i>	<i>PETN 96%</i>	<i>FPC461 4%<sup>126</sup></i>
<i>PBX 9007</i>	<i>RDX 90%</i>	<i>Polystyrene 9.1%; DOP<sup>127</sup> 0.5%; rosin 0.4%</i>
<i>PBX 9010</i>	<i>RDX 90%</i>	<i>Kel-F 3700 10%</i>
<i>PBX 9011</i>	<i>HMX 90%</i>	<i>Estane 10%</i>
<i>PBX 9205</i>	<i>RDX 92%</i>	<i>Polystyrene 6%; DOP 2%</i>
<i>PBX 9404</i>	<i>HMX 94%</i>	<i>NC<sup>128</sup> 3%; CEF<sup>129</sup> 3%</i>
<i>PBX 9407</i>	<i>RDX 94%</i>	<i>FPC461 6%</i>
<i>PBX 9501</i>	<i>HMX 95%</i>	<i>Estane 2.5%; BDNPA-F 2.5%</i>
<i>PBX 9502</i>	<i>TATB 95%</i>	<i>Kel-F 800 5%</i>
<i>PBX 9503</i>	<i>TATB 80%; HMX 15%</i>	<i>Kel-F 800 5%</i>
<i>PBX 9604</i>	<i>RDX 96%</i>	<i>Kel-F 800 4%</i>
<i>PBXN-106</i>	<i>RDX 75%</i>	<i>Полиетилен гликол/BDNPA-F</i>
<i>PBXN-107</i>	<i>RDX 86%</i>	<i>Полиакрилат</i>
<i>PBXN-109</i>	<i>RDX 64%, Al 20% Binder 16%</i>	<i>HTPB, DOA, IPDI<sup>130</sup></i>
<i>PBXN-110</i>	<i>HMX 88%</i>	<i>12% HTPB</i>

<sup>121</sup> Синтетичка гума (флуорополимерни еластомер)

<sup>122</sup> Бис-динитропропилацетал

<sup>123</sup> Бис(2-флуоро-2,2-динитроетил) формал

<sup>124</sup> Комерцијални назив за термопластични полиуретан

<sup>125</sup> Кополимер-поли(хлортрифлуороетилен-ко-винилидин флуорид)

<sup>126</sup> Кополимер-винил хлорид/хлортрифлуороетилен

<sup>127</sup> Диоктил-фталат

<sup>128</sup> Нитроцелулоза

<sup>129</sup> Хлоретил-фосфат

<sup>130</sup> Изофорни диизоцијанат

<i>PBXN-111</i>	<i>RDX 20%, AP 43%, Al 25%</i>	<i>12% везиво</i>
<i>PBXN-3</i>	<i>RDX 85%</i>	<i>Најлон</i>
<i>PBXN-5</i>	<i>HMX 95%</i>	<i>Флуороеластомер 5%</i>
<i>PBXN-9</i>	<i>HMX 92%</i>	<i>HYTEMP 4454<sup>131</sup> 2%, DOA<sup>132</sup> 6%</i>
<i>X-0242</i>	<i>HMX 92%</i>	<i>Полимер 8%</i>
<i>XTX 8003</i>	<i>PETN 80%</i>	<i>Sylgard 182<sup>133</sup> 20%</i>
<i>RX-26-AF</i>	<i>49% HMX, 47% TATB</i>	<i>4% Estane</i>

Недостатак претходних генерације пластичних експлозива је представљала чињеница да су кориштена полимерна везива негативно утицала на експлозивне карактеристике те су развијена тзв. енергетска везива и енергетски пластификтори. У групу материја под називом енергетска везива се сврставају:

- глицидил нитрат (енг. *GLYN monomer*)
- поли(глицидил нитрат) (енг. *poly(GLYN)*)
- 3-нитратометил-3-метил оксетан (енг. *NIMMO (monomer)*)
- поли(3-нитратометил-3-метил оксетан) (енг. *poly(NIMMO)*)
- глицидил азид полимер – (енг. *GAP*)
- 3-азидометил-3-метил оксетан (енг. *AMMO (monomer)*)
- поли(3-азидометил-3-метил оксетан) (енг. *poly(AMMO)*)
- 3,3-бис азидометил оксетан – (енг. *BAMO (monomer)*)
- поли(3,3-бис азидометил оксетан) (енг. *poly(BAMO)*)

Савремене енергетске пластификаторе представљају:

- алкил-нитроетил-нитрамини (енг. *NENAs*)
- етилен-гликол-динитрат (енг. *EGDN*)
- метриол-тринитрат (енг. *MTN*)
- бутан-1,2,4-триол тринитрат (енг. *BTTN*)
- смјеса ди- и три-нитроетилбензен (енг. *K10*)

<sup>131</sup> Полиакрилатни еластомер

<sup>132</sup> Диисооктил адипат

<sup>133</sup> Силиконска гума

- смјеса бис-динитропропилацетал и бис-динитропропилформал (енг. *BDNPA/BDNFA*)

Примјеном нових, савремених мономолекуларних кристалних експлозива (експлозива побољшаних карактеристика на осјетљивост) омогућен је развој нових неосјетљивих пластичних експлозива са побољшаним карактеристикама.

Табела број 18. Пластични експлозиви побољшаних карактеристика [13, 20]

Ознака	Експлозивна компонента	Везиво и пластификатор	Остали адитиви
<i>IMX-101</i>	43% <i>DNAN</i> , 20% <i>NTO</i> , 37% <i>NQ</i>		
<i>IMX-104</i>	40% <i>DNAN</i> , 53% <i>NTO</i> , 15% <i>RDX</i>		
<i>LX-17</i>	92,5% <i>TATB</i>	7,5% <i>Kel-F 800</i>	Угљик
<i>PAX-2A(1)</i>	85% <i>HMX</i>	1,6 <i>CAB</i> <sup>134</sup> , 9% <i>K10</i>	
<i>PAX-21</i>	36% <i>RDX</i> , 34% <i>DNAN</i>		30% амонијум-перхлорат н-метил-нитроанилин
<i>PAX-24</i>	<i>DNAN</i>		Амонијум-перхлорат н-метил-нитроанилин
<i>PAX-25</i>	<i>RDX</i> , <i>DNAN</i>		Амонијум-перхлорат н-метил-нитроанилин
<i>PAX-26</i>	<i>DNAN</i>		Алуминијум, амонијум-перхлорат н-метил-нитроанилин
<i>PAX-28</i>	20% <i>RDX</i> , 40% <i>DNAN</i>		20% алуминијум, 20% амонијум-перхлорат н-метил-нитроанилин
<i>PAX-40</i>	65% <i>HMX</i> , 35% <i>DNAN</i>		Н-метил-нитроанилин
<i>PAX-41</i>	65% <i>RDX</i> , 35% <i>DNAN</i>		Нитроанилин

<sup>134</sup> Целулозни ацетат бутират

<i>PBXW-7</i>	<i>60% TATB, 35% RDX</i>	<i>5% PTFE<sup>135</sup></i>	
<i>PBXW-124</i>	<i>27% NTO, 20% RDX</i>	<i>5% HTPB, 7% IPDI</i>	20% алуминијум, 20% алуминијум-перхлорат
<i>PBXW-122</i>	<i>47% NTO, 5% RDX</i>	<i>5% HTPB, 7% IPDI</i>	15% алуминијум, 20% алуминијум-перхлорат
<i>AFX-521</i>	<i>95% PYX</i>	<i>5% Kel-F800</i>	
<i>AFX-757</i>	<i>40% NTO, 30% TNT,</i>		20% алуминијум, 10% восак
<i>X-0344</i>	<i>71,25% TATB, 23,75 HMX</i>	<i>5% Kel-F800</i>	
<i>BX-1</i>	<i>60% TATB, 35% nitramine (95% RDX, 5% HMX)</i>	<i>5% Kel-F800</i>	
<i>BX-2</i>	<i>60% TATB, 35% nitramine (95% RDX, 5% HMX)</i>	<i>5% PTFE</i>	
<i>BX-3</i>	<i>60% TATB, 35% nitramine (90% RDX, 10% HMX)</i>	<i>5% Kel-F800</i>	
<i>BX-4</i>	<i>60% TATB, 35% nitramine (90% RDX, 10% HMX)</i>	<i>5% PTFE</i>	
<i>X-0483</i>	<i>95% NTO</i>	<i>5% FPC-461</i>	
<i>X-0489</i>	<i>50% NTO, 50% TNT</i>		
<i>CPX-413</i>	<i>NTO, HMX</i>	<i>Poli NIMMO</i>	K10
<i>B-2214</i>	<i>72% NTO, 12% HMX</i>	<i>16% HTPB</i>	
<i>B-2245</i>	<i>8% NTO, 12% RDX</i>	<i>12% HTPB</i>	25% алуминијум, 43% алуминијум-перхлорат

Класификација пластичних експлозива се може вршити на основу технологије израде (слика 41) и енергетског потенцијала, односно, ефекта дејства (слика 42).

<sup>135</sup> Политетрафлуороетилен



Слика број 41. Подјела ПВХ експлозива према технологији израде [63]



Слика број 42. Подјела пластичних експлозива према енергетском потенцијалу, односно ефекту дејства, \*– високи детонациони параметри; \*\*– појачани ефекат фугасног (рушећег) дејства; \*\*\*– експлозиви просторног дејства

Ради побољшања физичко-хемијских и механичких карактеристика пластичних експлозива, врши се додавање различитих адитива (пластификатори, катализатори, стабилизатори) у зависности од жељеног ефекта. Такође су развијени пластични експлозиви одговарајућих *melt-castings* карактеристика и термостабилности, као и пластични експлозиви који се користе као ракетни пропеланти.

Терцијарни експлозиви (који се још називају експлозивна средства) представљају групу енергетских материја које веома тешко експлодирају и класификују се као неексплозивне материје у нормалним условима. Карактеристика ових материја је да се веома тешко могу иницирати (експлодирати) помоћу ватре, удара, трења па чак и

практичним количинама примарних експлозива при чему се за иницирање ових енергетских материја користе појачивачи иницирања у виду секундарних експлозива. Према хемијском саставу, терцијарни експлозиви представљају експлозивне смјеше оксиданаса и гориве компоненте различите формулације. Термин експлозивне смјеше подразумијева слједеће [24]:

- експлозивне мјешавине које у свом саставу немају ниједну компоненту која је сама бризантни експлозив те се могу транспортовати и складиштити по прописима за руковање запаљивим материјама;
- нису осјетљиве на стандардна средства за иницирање (детонаторске каписле и детонирајући штапин);
- поједине тзв. *Slurry* експлозивне смјеше, иако садрже тринитротолуен, бездимни барут или неку другу бризантну компоненту, нису осјетљиве на стандардна средства за иницирање те се сврставају у експлозивне смјеше за разлику од појединих емулзионих састава који не садрже бризантну компоненту али су осјетљиви на иницијална средства те се сврставају у експлозиве.

У свом чистом облику без додатака горивих елемената посједују малу количину енергије (1/3 енергије TNT-а) [70]. Међу најзначајније оксидансе се сврставају:

- амонијум-нитрат (енг. *AN*,  $NH_4NO_3$ ),
- амонијум-перхлорат (енг. *AP*,  $NH_4ClO_4$ ),
- амонијум-динитрамид (енг. *ADN*,  $NH_4N(NO_2)_2$ ),
- монотритолуен (енг. *MNT*)
- смјеше на бази ових супстанци.

Терцијарни експлозиви се најчешће примјењују за цивилну употребу, нарочито у функцији привредних експлозива. Општа класификација на основу начина декомпозиције терцијарних експлозива се врши на:

- дефлагранте
- бризантне терцијарне експлозиве,

при чему се поједини терцијарни експлозивни могу сврстати и унутар других група енергетских материја у зависности од примјењиваног критеријума.

Примјена дефлагрантних терцијарних експлозива је знатно мања у односу на бризантне терцијарне експлозиве. С обзиром на механизам декомпозиције (дефлаграција), дејство ових експлозивних материја се испољава путем притиска гасовитих продуката сагоријевања а што условљава специфичну примјену. Најзначајнији представник ове групе терцијарних експлозива је црни барут. Детаљнији приказ црног барута је приказан у наслову Пропеланти.

Бризантни терцијарни експлозивни представљају сложене експлозивне материје (смјеше хемијских једињења) чија се декомпозиција врши путем процеса детонације те се могу подијелити у три групе:

- динамити,
- АНФО-сухе смјеше
- кашасти експлозивни и експлозивне смјеше (тзв. *slurry* експлозивни).

Динамити су група енергетских материја у форми смјеше која у свом саставу садржи више компоненти које посједују различиту функционалну улогу. Општу формулацију (састав) динамита у савременој употреби сачињавају:

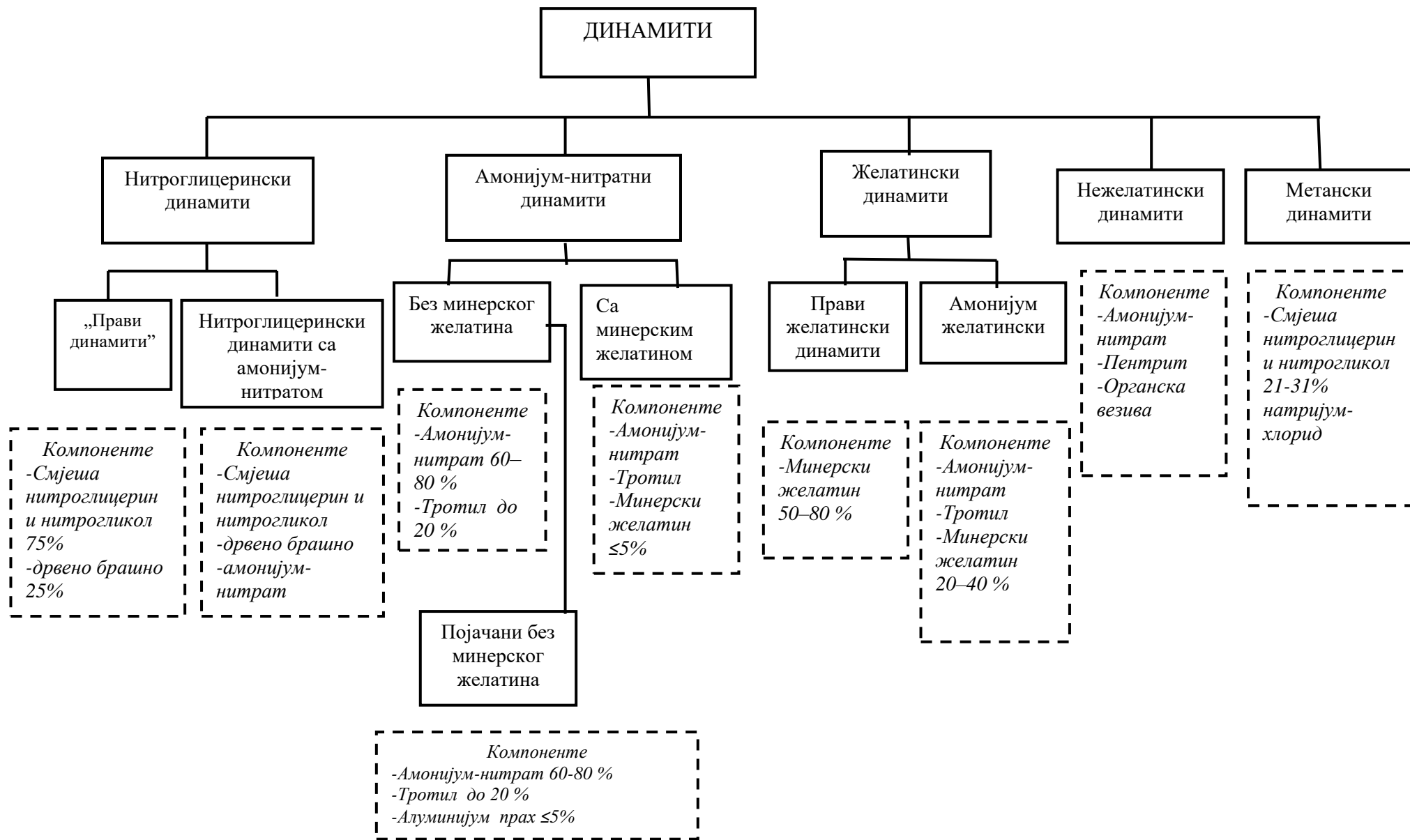
- експлозивна база
- оксиданс
- гориво
- флегматизатор
- депресант пламена
- стабилизатор.

Појединачна хемијска једињења и материје које се користе у изради динамита различитих формулација као и функционалност су приказана у табели 19.

*Табела број 19. Компоненте које улазе у састав динамита*

Функција компоненте	Компонента	Опис функције
Експлозивна база	Нитроглицерин	Компоненте које обезбјеђују снагу и осјетљивост експлозива
	Нитрогликол	
	Нитроцелулоза	
	Тротил	
Оксиданси	Амонијум-нитрат	Носиоци кисеоника
	Натријум-нитрат	
	Калијум-нитрат	
Гориво	Дизел уље	Гориве материје које потпомажу сагоријевање и повећавају количину ослобођене енергије
	Дрвено брашно	
	Угаљ	
	Алуминијумски прах	
Флегматизатори	Синтетички воскови	Материје које облажу кристалне честице експлозивних компоненти и спречавају међусобни контакт и трење и на тај начин смањују осјетљивост експлозива
	Парафин	
	Полимери	
Депресанти пламена	Натријум-хлорид	Спречавају појаву пламена и снижавају температуру – код метански сигурних експлозива
	Калцијум-хлорид	
Стабилизатори	Натријумове соли	Материје које обезбјеђују стабилност мјешавине
	Карбоксицелулоза	

Најчешће употребљаване материје у саставу динамита у савременој употреби су комбинација нитроглицерина, нитрогликола, нитроцелулозе, оксиданса и горива. Мјешавина нитроглицерина и нитрогликола носи заједнички назив, нитроглицерин. Мјешавина смјеше нитроглицерина и нитрогликола са нитроцелулозом назива се минерски желатин (праскави желатин). Експлозивне карактеристике динамита у највећој мјери зависе од количине експлозивне базе у формулацији динамита. Класификација динамита у зависности од хемијског састава је приказана на слици 43.



Слика број 43. Подјела динамита према хемијском саставу [24]

Нитроглицеринске динамите карактерише висока осјетљивост као и одвајање нитроглицерина приликом дужег складиштења на повишеним температурама. Претежно се употребљавају приликом извођења грађевинских радова (изградња канала).

Амонијум-нитратни динамити су материје прашкасте конзистенције, неотпорне на воду, најслабијих експлозивних карактеристика и са најмањом осјетљивошћу. Користе се за минирање у сухим срединама.

Желатински динамити посједују пластичну конзистенцију и високу отпорност на утицај воде. Погодни су за примјену у влажним и воденим срединама.

Метански динамити су терцијарне експлозивне супстанце које се користе приликом подземне експлоатације руда и минерала (рудници), односно, тамо гдје постоји опасност од присуства метана или угљене прашине. Присутни натријум или калијум-хлорид у смјеси снижавају температуру експлозије за око  $100^{\circ}\text{C}$  при чему у знатној мјери смањују снагу експлозивне материје.

АНФО-сухе смјеше представљају смјешу амонијум-нитрата и горивог елемента, нафте без присуства воде. Имајући у виду технолошки процес добијања, потребне сировине, физичко-хемијске карактеристике и цијену, АНФО експлозиви представљају најјефтиније експлозивне материје, безбједније и једноставније за руковање приликом кориштења у односу на динамите. Основни састојак АНФО експлозива (95%) јесте амонијум-нитрат чија је употреба веома распрострањена<sup>136</sup>. Користи се у веома великим количинама као вјештачко ђубриво у пољопривреди и као основна компонента експлозивних смјеша. Чврсти амонијум-нитрат се може синтетизирати у различитим формама као што су грануле, чврсте пахуљице, зрнасте кристалне форме, хигроскопан је и растворљив у води. Експлозивне карактеристике га сврставају у групу слабих експлозива и јаких оксиданса. Индустриска производња амонијум-нитрата се врши у облику кристала



Слика број 44.  
Амонијум-нитрат

<sup>136</sup> У САД 80% кориштених привредних експлозива су АНФО експлозиви

(кристални амонијум-нитрат) или гранула (гранулисани амонијум-нитрат). Непорозне грануле се користе као пољопривредно ђубриво док се порозне грануле користе у производњи експлозива<sup>137</sup>. Имајући у виду да се амонијум-нитрат складишти у веома великим количинама, двије карактеристике га чине опасним и непредвидљивим. Прву карактеристику представља високи степен хигроскопности, односно, способност упијања влаге из атмосферског зрака а што доводи до растварања и повећања порозности. Друга карактеристика је тзв. феномен цикличности амонијум-нитрата. Овај феномен представља карактеристику да на различитим температурама на којима се налази амонијум-нитрат посједује различите кристалне форме (табела 20).

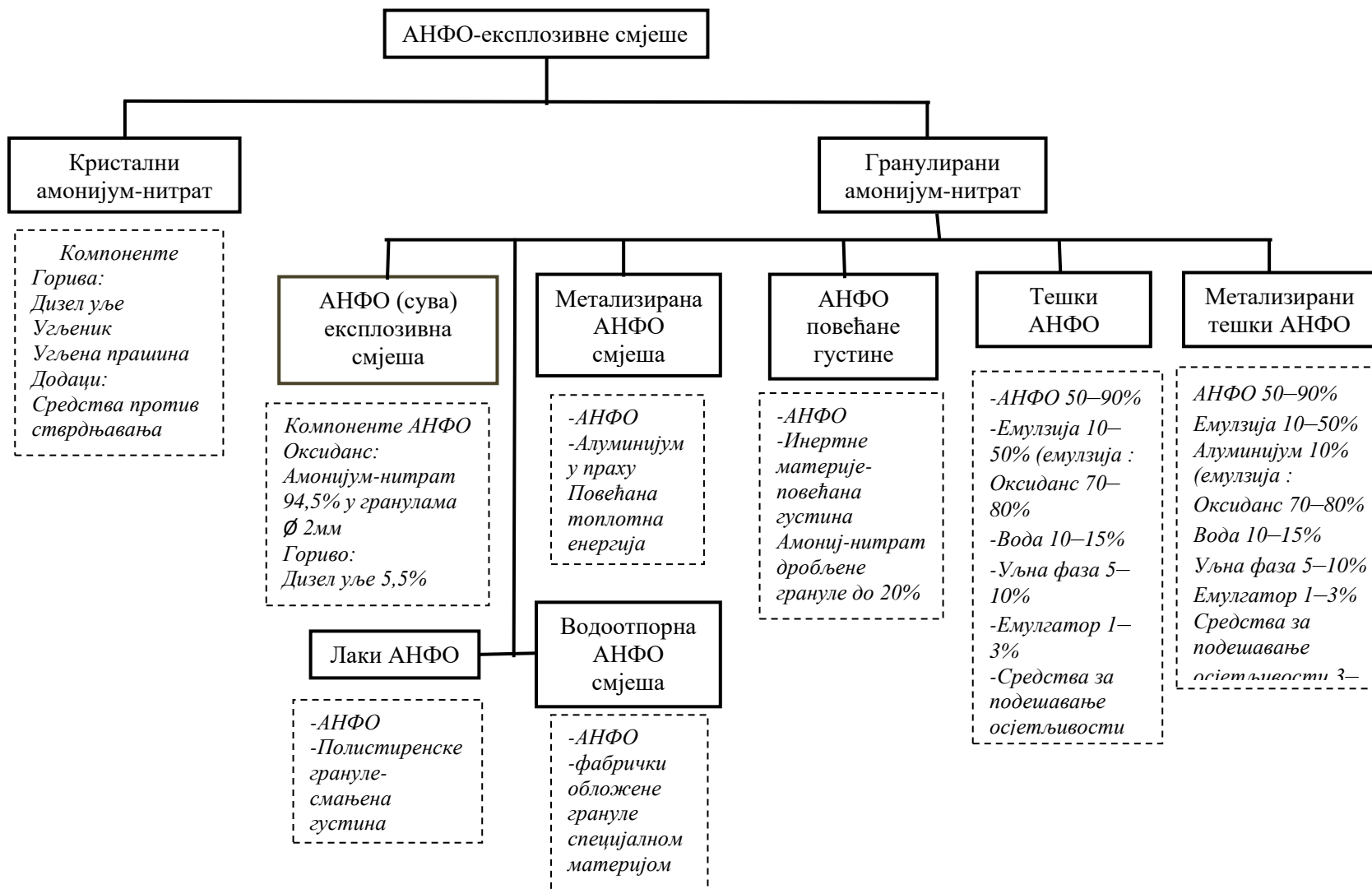
*Табела број 20. Зависност кристалне форме амонијум-нитрата од температуре*

Температура	Кристална форма
$> 32^{\circ}\text{C}$	Кубна
$85^{\circ}\text{C} - 125^{\circ}\text{C}$	Тетрагонална
$32^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$	Орторомбична
$-18^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C}$	Псеудотетрагонална
$< -18^{\circ}\text{C}$	Тетрагонална

С обзиром на температурне опсеге у којима се мијења кристална форма амонијум-нитрата, осциловање температуре зрака у нормалним зимским и љетним условима доводи до промјена кристалне форме. Ефекат осциловања се огледа у дробљењу гранула амонијум-нитрата на ситније дијелове (када температура расте преко  $32^{\circ}\text{C}$ , мијења се кристална форма, стварају се ситнији дијелови, поновни пад температуре испод  $32^{\circ}\text{C}$ , усљед преласка у претходну кристалну форму ситнији дијелови се даље уситњују), што ствара већу густину и повећава осјетљивост. Са настанком ситнијих дијелова повећава се контактна површина између честица амонијум-нитрата и атмосферског зрака што доводи до бржег и већег упијања влаге а, самим тим, и растварања честица. Пад температуре проузрокује поновну кристализацију (рекристализација) у веће честице. На тај начин, маса амонијум-нитрата може имати

<sup>137</sup> Порозност представља невидљиву шупљикавост, способност чврстих тијела да пропуштају течности и гасове. Непорозне грануле упијају гориво само по површини, тврде су, густине  $0,9 \text{ г/см}^3$  са садржајем инертног омотача 3–4%. Порозне грануле су мекане, густине  $0,8 \text{ г/см}^3$ , садржај инертног омотача 1–1,5 % и упијају гориво по цијелој запремини.

дијелове са повећаном густином и дијелове са крупним кристалима. Карактеристике тих дијелова су веома различите, у распону од веома експлозивних до неосјетљивих. Развијен је већи број различитих АНФО експлозивних смјеша у зависности од намјене. Класификација АНФО експлозивних смјеша је приказана на слици 45.



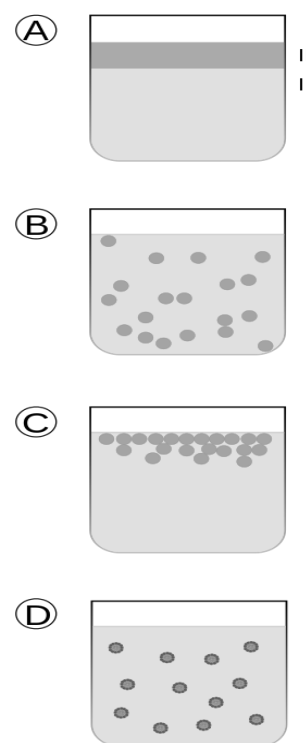
Слика број 45. Класификација АНФО експлозивних смјеша

Према хемијским карактеристикама, кашасти експлозивни и експлозивне смјеше (енг. *SLURRY* експлозивни) представљају водене гелове на бази раствореног амонијум-нитрата у води са додатком бризантних компоненти као и емулзиони раствори двије течне компоненте које се међусобно не мијешају са садржајем чврстих компоненти. *Slurry* експлозивне материје садрже амонијум-нитрат као оксиданс док се као гориво користи дизел уље. Ради повећања енергетске моћи додаје се алуминијум. Кашаста конзистенција је резултат присуства високог садржаја течне компоненте.

Подјела *Slurry* експлозива и експлозивних смјеша се врши на водопластичне (енг. *water gels*) и емулзионе. Водопластичне експлозиве и експлозивне смјеше представљају засићени водени колоидни<sup>138</sup> раствори чврстих компоненти, тзв. гелови. Емулзиони експлозивни и емулзионе експлозивне смјеше су немјешљиви раствори воде и уља који садрже чврсте компоненте (слика 46).

Водопластични експлозивни и експлозивне смјеше сачињавају засићени колоидни раствори амонијум-нитрата (оксиданс, обложене честице са воском – штите од утицаја воде), дизел уље (гориво), агенси за згушњавање, стабилизатори и компоненте за подешавање осјетљивости. Величина чврстих честица у раствору износи 0,2 mm.

Емулзиони експлозивни и смјеше су експлозивне материје које не садрже бризантну компоненту. То су двофазни емулзиони системи типа вода у уљу при чему је континуална фаза уље (дизел гориво) а диспергована фаза засићени водени раствор амонијум-нитрата (или неког другог оксиданса). Стабилизација емулзије се врши додавањем емулгатора. Типични састав емулзионих експлозивних смјеша чини 70–80% оксиданса (нитратне соли), 10–15% воде, 5–10% уљне фазе, 1–3% емулгатора и 3–5% средства за подешавање осјетљивости. Подјела водопластичних и емулзионих експлозива и смјеша је приказана на слици 47



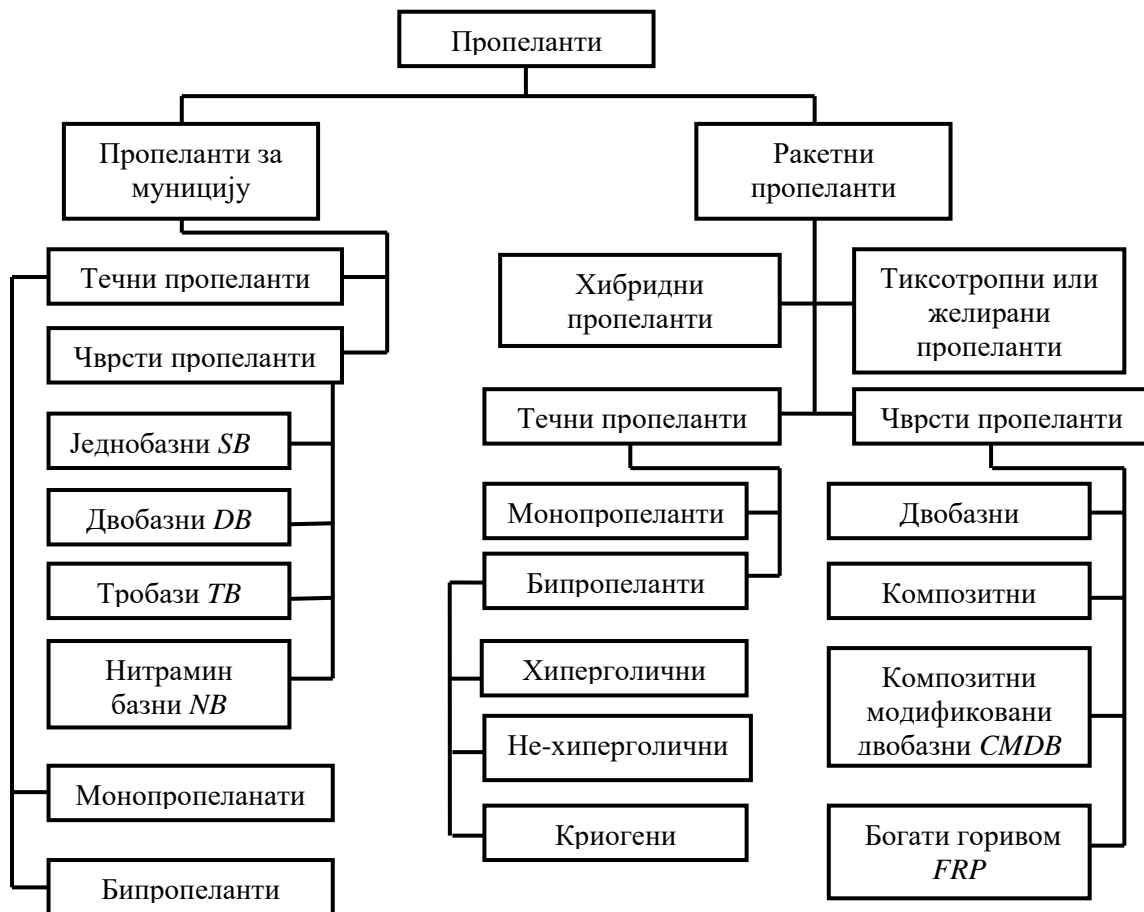
Слика број 46.  
 Емулзиони раствор  
 А-двје текућине  
 које не могу чинити  
 стабилну смјесу  
 Б-мијешање  
 текућина  
 Ц-поновно одвајање  
 /без емулгатора/  
 Д-стабилна емулзија  
 са емулгатором

<sup>138</sup> Раствори у којима су дисперговане честице величине 1–100 нанометара



Слика број 47. Шематски приказ подјеле кашастих експлозива и експлозивних смјеса

Са становишта појма *енергетски материјали*, пропеланти или погонска горива представљају класу енергетских материјала које карактерише релативно спори и контролисани процес горења приликом чега настаје већа количина гасовитих продуката горења са високим температурама који представљају енергетску основу за вршење основне функције (покретања или кретања). Пропеланти садрже потребне количине кисеоника<sup>139</sup> за адијабатско<sup>140</sup> сагоријевање при чему разлагање енергетских материја карактерише процес горења, односно, не долази до експлозије (детонације). Класификација пропеланата се може вршити на основу више различитих критеријума од којих се најчешће употребљава критеријум области примјене. Подјела на основу области примјене је приказан на слици 48.



Слика број 48. Класификација пропеланата у односу на област примјене [13]

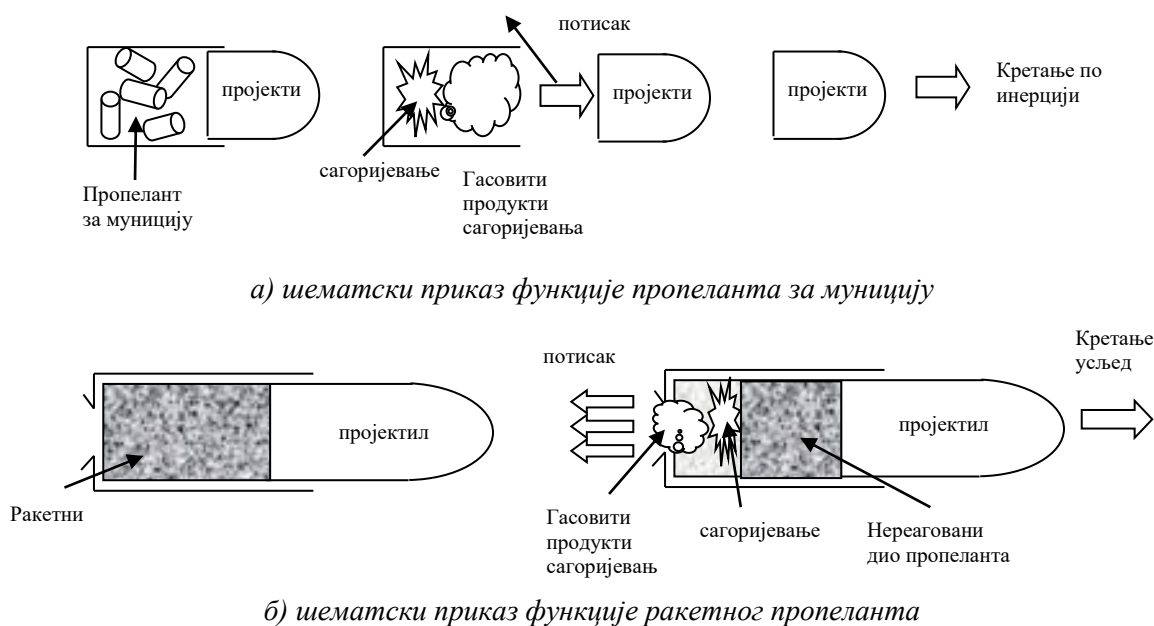
<sup>139</sup> Потребне количине кисеоника се налазе унутар молекулске структуре материје или се додају у састав пропеланта као оксиданс.

<sup>140</sup> Подразумијева процес сагоријевања при чему не долази до губитка топлоте у околину, односно сва топлота настала сагоријевањем се троши на загријавање продуката сагоријевања.

На основу критеријума *област примјене*, разликују се двије главне групе пропеланата, пропеланти за муницију и ракетни пропеланти.

Основна улога пропеланата за муницију (енг. *gun propellants*) јесте постизање велике брзине пројектила претварањем топлотне енергије у кинетичку енергију. Велика брзина пројектила утиче на смањење времена кретања, повећањем домета, бољим продирањем на циљу (пенетрацијом), повећањем вјероватноће погађања циља и повећаним терминалним балистичким ефектима<sup>141</sup> на циљу. У функционалном смислу, пропеланти који се користе за муницију обезбјеђују почетни енергетски импулс на основу кога се пројектил даље креће по инерцији.

Ракетни пропеланти су дизајнирани на начин да их карактерише константан енергетски импулс у неком времену у зависности од количине пропеланта.



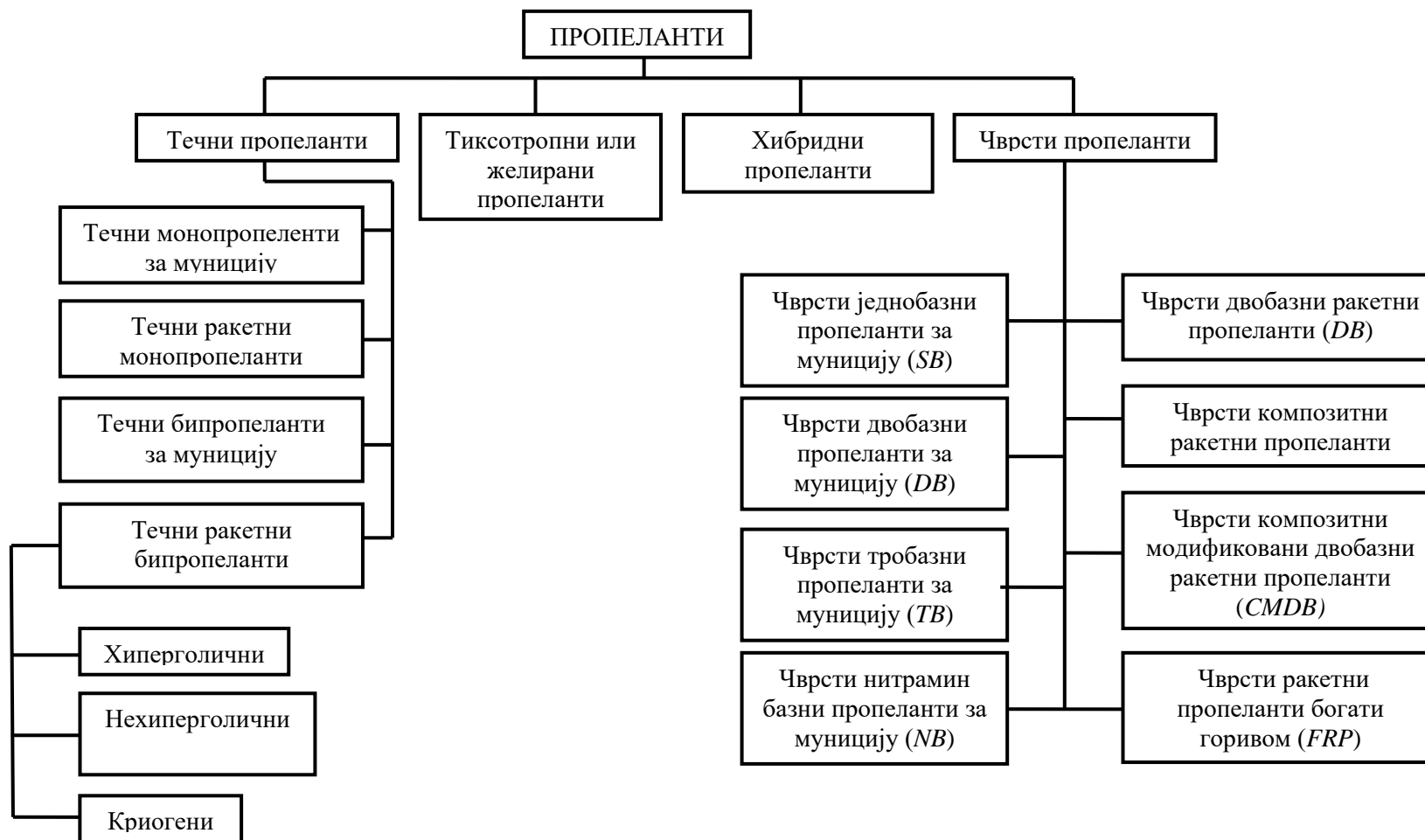
Слика број 49. Шематски приказ функције пропеланта за муницију и ракетног пропеланта

Вриједност енергетског импулса израженог помоћу притиска за ракетне пропеланте износи приближно  $7 \text{ MPa}$  (константна вриједност у неком времену, вријеме трајања значајно дуже у односу на вријеме трајања импулса за пропеланте за муницију) за

<sup>141</sup> Бави се проучавањем понашања и ефектима пројектила када погоди мету и кинетичку енергију пројектила пренесе на циљ.

разлику од пропеланата за муницију које карактерише притисак чија вриједност износи приближно  $400 \text{ MPa}$  (краће вријеме трајања импулса у односу на вријеме трајања импулса ракетних пропеланата) [71].

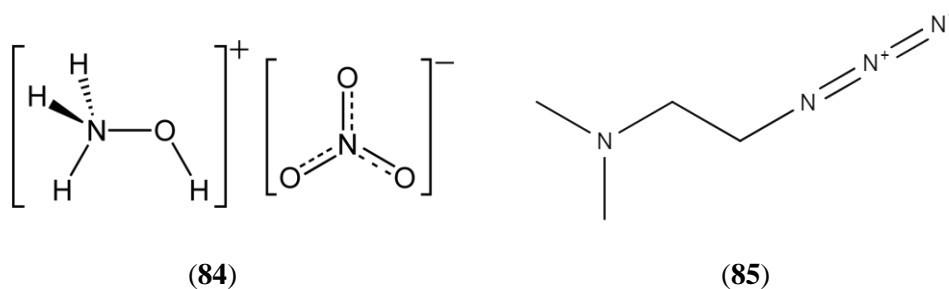
Такође, класификација пропеланата се може вршити према физичком стању материје (имајући у виду да поједине материје улазе у састав пропеланата за муницију и ракетних пропеланата). Подјела пропеланата према критеријуму физичког стања материје се врши на течне, чврсте, хибридне и тиксотропне пропеланте (који се примјењују и за пропеланте за муницију и за ракетне пропеланте).



Слика број 50. Класификација пропеланата према физичком стању материје

Течни пропеланти представљају хомогене (колоидне) материје у течном стању које се користе као пропеланти за муницију и ракетни пропеланти. Широм примјену, течни пропеланти имају у области ракетних горива у односу на пуњења за муницију. Разликују се монопропеланти и бипропеланти. Назив монопропеланти се односи на хемијска једињења или смјеше хемијских једињења за која нису потребни засебни оксиданси за разлику од појма бипропеланти за чије функционисање је неопходно гориво и засебно оксидационо средство.

Истраживања примјене течних монопропеланата за муницију су иницирана примјеном и развојем ракетних пропеланата. Вршена су испитивања могућности примјене више различитих хемијских једињења и њихових формулација од којих се посебно издвајају хидроксил-амонијум-нитрат (енг. *HAN*) и 2-(диметиламино)етил-азид (енг. *DMAZ*) [72].



Слика број 51. Хемијска структура течних монопропеланата за муницију (84) *Hydroxylammonium nitrate, HAN*; (85) *2-Azido-N,N-dimethylethan-1-amine, DMAZ*;

Различите формулације (смјеше) засноване на хидроксил-амонијум-нитрату, као што су *HAN/H<sub>2</sub>O*, *HAN/TEAN*<sup>142</sup>/*H<sub>2</sub>O*, карактерише високи ниво безбједности приликом складиштења, манипулације и употребе [73].

Течни ракетни монопропеланти сачињавају хемијска једињења која ослобађају енергију егзотермном реакцијом<sup>143</sup> разградње при чему се потребне количине кисеоника налазе унутар молекулских структура. Најчешће кориштене материје које се класификују као течни монопропеланти су изопропил-нитрат, водоник-пероксид, хидразин, метил нитрат и етилен-оксид. Карактеристике течних ракетних

<sup>142</sup> Нитратна со триетаноламина.

<sup>143</sup> Егзотермна реакција представља реакцију приликом које се ослобађа топлота.

монопропеланата је релативно ниска енергија и специфични импулс. Најчешће кориштени монопропелант је хидразин.

Табела број 21. Карактеристике појединих течних ракетних монопропеланата [71]

Течни монопропелант	Хемијска формула	Специфични импулс $Nskg^{-1}$	Температура пламена $K^0$
Хидроген-пероксид	$H_2O_2$	1186	900
Етилен-оксид	$C_2H_4O$	1167	1250
Хидразин	$N_2H_4$	1863	1500
Изопропил-нитрат	$C_3H_7ONO_2$	1569	1300
Нитрометан	$CH_3NO_2$	2127	2400

Истраживања везана за употребу течних бипропеланата за муницију су вршена помоћу смјеша азотна киселина/хидрокарбонати, хидразин/водоник-пероксид те хидразин/азотне киселине. С обзиром на то да су резултати истраживања указали на већи број негативних карактеристика ове врсте пропеланата за муницију, даљи развој је првенствено усмјерен у правцу монопропеланата за муницију [74].

Течни ракетни бипропеланти представљају смјеше хемијских једињења који енергију ослобађају хемијском реакцијом између оксиданса и горива, односно, смјеше течног оксиданса и течног горива. Материје које сачињавају бипропеланте се складиште у засебне резервоаре одакле се убризгавају у комору за сагоријевање гдје долазе у међусобни контакт и одиграва се хемијска реакција. Најчешће материје које сачињавају бипропеланте су приказане у табели 22.

Табела број 22. Најчешће кориштене материје у течним ракетним бипропелантима [13]

Гориво	Оксиданс	Гориво	Оксиданс
Метанол <sup>144</sup>	Азотна киселина	Хидразин-хидрат	Водик-пероксид

<sup>144</sup> Метил-алкохол, најпростији алкохол

Керозин <sup>145</sup>	Азотна киселина	Хидразин <sup>146</sup>	Азотна киселина/водик- пероксид
Анилин <sup>147</sup>	Црвена димна азотна киселина	UDMH <sup>148</sup>	Азотна киселина/водик- пероксид/динитроген- тетраоксид
Амонија <sup>149</sup>	Азотна киселина		

Већина течних ракетних бипропеланата се користи за погон ракетних система који се користе у свемирским технологијама, балистичких ракета, помоћних мотора у системима за маневрисање свемирских летјелица и сателита.

Течни ракетни бипропеланти се дијеле на:

- хиперголичне течне ракетне бипропеланте
- нехиперголичне течне ракетне бипропеланте
- криогене течне ракетне бипропеланте.

Хиперголични течни бипропеланти представљају материје које карактерише способност спонтаног паљења (самозапаљење) приликом међусобног контакта, односно, самозапаљиви су и не захтијевају секундарни извор паљења. Типични примјер хиперголичних течних бипропеланата представља систем несиметрични диметил-хидразин (енг. *unsymmetrical dimethyl hydrazine, UDMH*)<sup>150</sup> и азотна киселина.

За разлику од хиперголичних, нехиперголични течни бипропеланти не посједују способност самозапаљивости. Представник ове класе течних бипропеланата

<sup>145</sup> Продукт дестилације сирове нафте.

<sup>146</sup> Анорганска компонента, једноставни пниктоген-хидрат (енг. pnictogen hydride) – бинарни састав водика и пниктогених атома, односно, атома 15 групе периодног система, азот, фосфор, арсен, антимон и бизмут/ повезаних ковалентном везом.

<sup>147</sup> Органско једињење.

<sup>148</sup> Несиметрични диметил хидразин

<sup>149</sup> Анорганска компонента, једноставни пниктоген хидрат (енг. pnictogen hydride) – бинарни састав водика и азота/ повезаних ковалентном везом.

<sup>150</sup> 1,1 диметилхидразин (енг. *1,1-dimethylhydrazine*).

представља систем гасолин<sup>151</sup> (црвена димна азотна киселина (енг. *Red fuming nitric acid, RFN*)<sup>152</sup>.

Криогени течни пропелант су материје које захтијевају складиштење на екстремно ниским температурама да би могла садржати течну стању. Користе се за погон свемирских летјелица имајући у виду да у простору свемира није могуће користити класична горива због неодговарајућег окружења (присутна незнатна количина кисеоника). Веома често кориштен течни криогени бипропелант је систем течни водик/течни кисеоник (енг. *liquid hydrogen – liquid oxygen, LOX*)<sup>153</sup>.

Чврсти пропеланти за муницију се користе у изради различите муниције (пуњења за муницију) за покретање различитих пројектила (пиштољски, пушчани и слично). Садрже једну или више експлозивних материја у улози главне компоненте и различите адитиве у зависности од намјене.

Класификација чврстих пропеланата за муницију се врши на:

- једнобазне пропеланте
- двобазне пропеланте
- тробазне пропеланте
- пропеланте са нитраминском базом.

Најстарији познати пропелант за муницију је црни барут (енг. *blackpowder, gunpowder*) који је сачињен од 75% калијум-нитрата, 10% сумпора и 15% угљене прашине.

Под називом једнобазни чврсти пропелант за муницију (енг. *single-base, SB*) сматра се пропелант који садржи нитроцелулозу као једини експлозивни састојак. *SB* пропеланти садрже 90% и више нитроцелулозе у којој се налази од 12,5 до 13,25% азота. Кориштењем пластификатора (дибутил фталат) и стабилизатора (карбамит)<sup>154</sup> нитроцелулоза се доводи у физички облик у коме се може вршити даља обрада у

---

<sup>151</sup> Продукт фракционе дестилације сирове нафте

<sup>152</sup> Садржи 84% азотне киселине, 13% динитро тетраоксид, 1–2% воде

<sup>153</sup> Тачка кључања *LOX* система износи од -252<sup>0</sup> С до -183<sup>0</sup> С на атмосферском притиску, користи се у свемирском програму *Space Shuttle, Ariane IV*. Криогено гориво користи се и за погон авиона руске производње тупољев-155 (*Tu-155*) који је имао први лет 1989. године.

<sup>154</sup> (Енг. *carbomite*), 1,3-Diethyl-1,3-diphenylurea

одговарајући облик и величину. Енергетска вриједност за ову врсту пропеланата износи 3100–3700  $Jg^{-1}$ . Једнобазни пропеланти се користе у свим врстама пиштољске, пушчане и артиљеријске муниције.

Двобазне пропеланте (енг. *double-base, DB*) чине нитроцелулоза и нитроглицерин чији масени удио зависи од захтијеваних карактеристика и намјене пропеланта. Посједују вишу енергетску вриједност (3300-5200  $Jg^{-1}$ ) у односу на једнобазне пропеланте. Недостатак ове врсте пропеланата се огледа у повећаном степену корозије цијеви оружја као и повећању свјетлосног ефекта на „устима” цијеви. Користе се за израду пушчане, минобацачке, артиљеријске муниције, ракета и пројектила.

Тробазни пропеланти су развијени са циљем уклањања недостатака двобазних пропеланата при чему је енергетска вриједност тробазних пропеланата између енергетске вриједности једнобазних и двобазних пропеланата (3200–3700  $Jg^{-1}$ ). Тробазни пропеланти, осим нитроцелулозе и нитроглицерина, садрже и нитрогванидин чији масени удио износи 50–55%. Употребљава се за израду тенковске муниције и муниције за велике калибре.

Осим кориштења тробазних пропеланата ради изналажења рјешења проблема корозије, истраживања су се развијала у правцу изналажења нових енергетских материја које карактерише сагоријевање на што нижим температурама са одговарајућим перформансама. Истраживања указују да увођење пропеланата на бази једињења богатих азотом као што су триаминогванидинијум азотетразолат (енг. *triaminoguanidiniјum azotetrazolat, TAGzT*) и хидразинијум-5-аминотетразолат (енг. *hidraziniјum 5-aminotetrazolat, HyAt*) дају одговарајуће резултате [75].

Са циљем побољшања балистичких карактеристика различитих пројектила, првенствено артиљеријске и тенковске муниције, развијени су чврсти пропеланти за муницију на нитраминској бази. У саставу пропеланата на нитраминској бази (пропеланти за муницију високе енергије), осим нитроцелулозе, налази се и секундарна експлозивна материја (хексоген, октоген, *CL-20*) те полимерно везиво [13]. Типичне формулације једнобазних, двобазних, тробазних пропеланата и пропеланата на нитраминској бази су приказане у табели 23.

Табела број 23. Типични састав једнобазних, двобазних, тробазних и на бази нитрамина чврстих пропеланата за муницију [76]

Једнобазни	Двобазни	Тробазни	На нитраминској бази
Нитроцелулоза (са 13,15% азота) 90%	Нитроцелулоза (са 12,2% азота) 49,5%	Нитроцелулоза (са 13,1% азота) 20,8%	Нитроцелулоза (са 13,15% азота) 30%
Динитротолуен 7,5%	Нитроглицерин 47%	Нитроглицерин 20,6%	Хексоген 60%
Дибутилфталат 1,5%	Карбамит 3,5%	Нитрогванидин 55%	Динитротолуен 5%
Дифениламин 1% (+0,5 дијелова калијум-сулфата)		Карбамит 3,6%	Диоктилфталат 4%
			Карбамит (+1 дијелова калијум-сулфата) 1%

Ради смањења осјетљивости муниције на вањске утицаје као што су удари пројектила велике брзине, пламен, експлозија, развијени су на нитраминској бази тзв. пропеланти за муницију мале рањивости (енг. *Low vulnerability ammunition (LOVA) propellants*). Главне компоненте ове врсте пропеланата су:

- оксиданси
- везивне материје
  - инертна везива
  - енергетска езива
- пластификатори.

Нитраминска једињења као што су хексоген и октоген су најчешће кориштени енергетски материјали (оксиданси) у саставу пропеланата за муницију мале рањивости. Предност у односу на пропеланте на бази нитроестара (нитроцелулоза) се огледа у

вишој термичкој стабилности као и мањем степену узроковања корозије цијеви оружја у коме се користе.

Способност декомпозиције везивних материја путем ендотермних реакција има веома важну улогу са становишта смањене осјетљивости на утицај топлоте која се кондукцијом (међусобним контактом) преноси са врућих честица метала. У употреби се налазе два типа везивних материја:

- инертна везива
- енергетска везива.

У групу инертних везива се сврставају полибутадиени и деривати нитроцелулозе. У полибутадиенска једињења се убрајају хидрокси-терминирани полибутадиен (енг. *Hydroxy-terminated polybutadiene, HTPB*) и комплекс карбокси-терминирани полубутадиен/полибутадиен акрилонитрил (енг. *carboxy-terminated polybutadiene, CTPB*)/*poly(butadiene-acrylonitrile), PBAN*). Деривате нитроцелулозе представљају етил целулоза (енг. *ethyl cellulose, EC*), целулоза ацетат (енг. *cellulose acetate, CA*), целулоза ацетат-бутират (енг. *cellulose acetate butyrate, CAB*) и целулозни ацетат-пропионат (енг. *cellulose acetate propionate, CAP*).

Групу енергетских везива представљају материје које истовремено повећавају ниво енергетске вриједности пропеланта и позитивно утичу на физичка својства при чему посједују нижи ниво осјетљивости. За ову намјену се користе материје кориштене код композиција ракетних пропеланата [77] као што су *poly(BAMO)* (*poly[bis(azido methyl oxetane)*) и *GAP* (*glycidyl azide polymer*) [78].

Ради постизања одговарајућих физичко-механичких карактеристика везивних материја у саставима пропеланата за муницију смањене рањивости се налазе пластификатори. Ову групу једињења чине ацетил-триетил-цитрат (енг. *acetyl triethyl citrate, АТЕС*), триацетин (енг. *triacetin, ТА*) и дибутил фталат (енг. *dibutyl phthalate, DBP*) [79].

Састави чврстих пропеланата за муницију садрже различите адитиве чија је улога специфична и зависна од захтијеваних карактеристика пропеланта. Класификација адитива се може вршити на основу функције коју врше.

Табела број 24. Класификација адитива у смјеси чврстих пропеланата за муницију [71, 80]

Функција	Адитив	Улога
Стабилизатор	Карбамит ( <i>Carbamite, diphenyl diethyl urea</i> ), метил централит ( <i>methyl centralite, diphenyl dimethyl urea</i> ), креда, дифениламин	Повећање рока трајања
Пластификатор	Дибутил-фталат, карбамит, метил-централит	Гелирање
Средство за хлађење	Дибутил-фталат, карбамит, метил-централит, динитротолуен	Снижење температуре пламена
Површински успоривачи	Дибутил-фталат, карбамит, метил-централит, динитротолуен	Редукција брзине горења на површини зрна
Површинска мазива	Графит	Смањење карактеристике течења
Инхибитори свјетлосног ефекта	Калијум-сулфат, калијум-нитрат, калијум-алуминијум-флуорид, натријум-криолит	Редукција свјетлости на устима цијеви
Агенси за дебакаризацију	Оловна или калајна облога, материје које садрже олово или калај	Спречавање настанка наслага бакра насталих кретањем пројектила кроз цијев
Антикорозивни агенси	Титанијум-диоксид или магнезијум-силикат (талк)с	Смањење корозије цијеви оружја

Осим пуњења за муницију, чврсти пропеланти се користе и за израду чврстих ракетних горива (пропеланата). Ова класа ракетних горива се употребљава за израду различитих система наоружања.

Подјела чврстих ракетних пропеланата се врши на:

- двобазни
- композитни
- композитни модификовани двобазни (енг. *composite modified double-base propellants, CMDB*)
- богати горивом пропеланти (енг. *Fuel - rich propellant, FRP*).

Двобазне чврсте ракетне пропеланте представљају хемијска једињења или смјеша хемијских једињења која истовремено имају улогу и оксиданса и горива (енергетске материје). Претежно садрже нитроцелулозу, нитроглицерин и адитиве. У табели 25 су приказане материје које се користе за израду двобазних чврстих ракетних пропеланата.

Табела број 25. Хемијска једињења присутна у двобазним чврстим ракетним пропелантима [81]

Пластификатор (оксиданс и гориво)	Нитроглицерин, триметилолетантринитрат, триетиленгликолдинитрат, динитротолуен
Пластификатор (гориво)	Диетилфталат, дибутилфталат, целулоза триацетат, полиуретан
Учвршћивач	Диамет-Ц
Стабилизатор	Етиленцентарлит, 2-нитродифениламин, дифениламин
Пластификатор (енергетско гориво)	Глицилидазид полимер, азидиметил-бис-оксетан (ВАО), 3-азидометил-3-метилоксетан (АММО)
Везиво (гориво и оксиданс)	Нитроцелулоза
Катализатор сагоријевања	Оловни салицилат, оловни стеарат, олово 2-етилхексаноат, бакар салицилат, бакар стеарат, бакар 2-етилхексаноат, литијум флуорид
Модификовани катализатор сагоријевања	Угљик (графит)
Компоненте за смањење нестабилности сагоријевања	Алуминијум, цирконијум, цирконијум карбид, тантал карбид
Боје	Угљик (графит)

Композитна чврста ракетна горива представљају смјешу хемијских једињења код којих су оксиданс и гориво засебне материје. У састав композитног пропеланта, осим горива и оксиданса, налази се и везивна материја. Карактеристика савремених чврстих композитних ракетних горива се огледа у томе да везивна материја има истовремено улогу везива и енергетске материје (горива). Предности које посједују композитни чврсти ракетни пропеланти у односу на чврсте двобазне пропеланте се огледају у [82]:

- једноставности технолошких поступака производње
- високој стабилности складиштења са дугим „животним” вијеком трајања
- високој стабилности на вањске импулсе
- поузданости приликом експлоатације
- великој вриједности потиска (погонске силе).

Класификација чврстих композитних ракетних горива се врши на основу врсте полимерног везива/горива које је кориштено у смјеси.



Слика број 52. Класификација чврстих композитних ракетних горива на основу врсте везивне материје [83]

Материје које се употребљавају у улози оксиданса претежно су амонијум-нитрат (енг. *AN*), амонијум-перхлорат (енг. *AP*), амонијум-динитрамид (енг. *ADN*), хидразинијев нитроформат (енг. *HNF*) и триаминогванидинијум нитроформат (енг. *TAGNF*).

Осим оксиданса, горива и везивних материја, у саставу чврстих композитних ракетних пропеланата се налазе и различити адитиви.

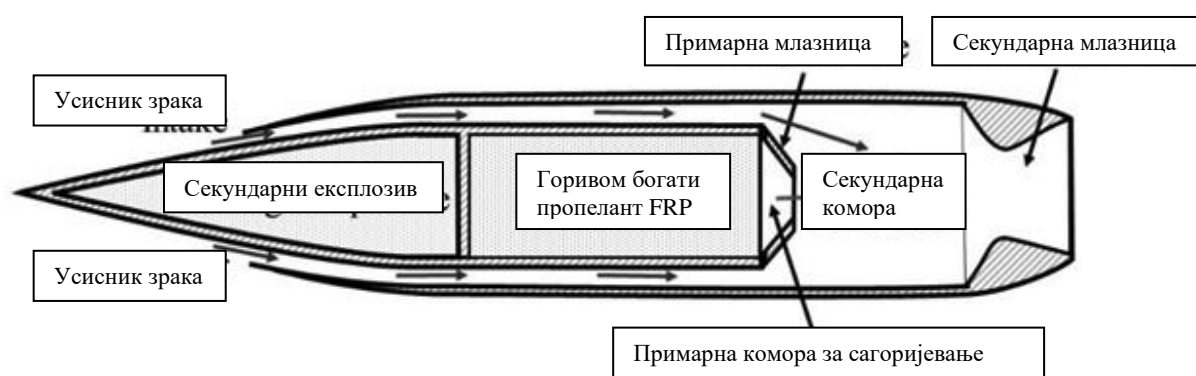
Табела број 26. Хемијска једињења присутна у композитним чврстим ракетним пропелантима [81,84]

Оксиданс	Амонијум-перхлорат
	Хидроксил-полибутадиен ( <i>HTPB</i> )
	Карбоксил-полибутадиен ( <i>CTPB</i> )
	Полибутадиен-акрилонитрил ( <i>PBAN</i> )
	Полиетар који садржи хидроксил ( <i>HTPE</i> )
Везиво (гориво)	Полиестар који садржи хидроксил ( <i>HTPS</i> )
	Полиацетилен који садржи хидроксил ( <i>HTPA</i> )
	Полиуретан ( <i>PU</i> )
	Полисулфидна гума ( <i>PS</i> )
	Поливинил-хлорид ( <i>PVC</i> )
Везиво (енергетско гориво)	Глицидилазид-полимер ( <i>GAP</i> )
	Бисазидометил-оксетан ( <i>BAMO</i> )
	3-азидометил-3-метилоксетан ( <i>AMMO</i> )
	<i>iso</i> -фороне <i>di-iso</i> -цијанат ( <i>IPDI</i> )
	Толуен <i>di-iso</i> -цијанат ( <i>TDI</i> )
	<i>p</i> -кинон-диоксим ( <i>PQD</i> )
Средства за умрежавање и очвршћавање	1,6 диизоцијанатоксан ( <i>HMDI</i> )
	Трис(2-метилазиридин-1-yl)фосфин оксид ( <i>MAPO</i> )
	Diamet-C
	Метални β – дикетонати (никл, бакар, манган)
Средства за увезивање	Трис(2-метилазиридин-1-yl)фосфин оксид ( <i>MAPO</i> )

	Три-етаноламин ( <i>TEA</i> )
	2 мола <i>MAPO</i> , 0,7 мола адипинске киселине, 0,3 мола винске киселине
Пластификатори	Диоксиладипат ( <i>DOA</i> )
	<i>iso</i> – децилпеларгонат ( <i>IDP</i> )
	Диоктилфталат ( <i>DOP</i> )
Катализатори сагоријевања	Жељезни оксид ( $Fe_2O_3$ )
	<i>n</i> -бутил фeroцен ( <i>n-BF</i> )
	<i>terc</i> -бутил фeroцен ( <i>terc-BF</i> )
	<i>OSF</i>
Негативни катализатори сагоријевања	Литијум-флуорид ( <i>LiF</i> )
Модификатори негативне брзине сагоријевања	Оксамид-амид-оксалат ( <i>OXM</i> )
Метална горива	Алуминијум, магнезијум, алуминијумске легуре
Високоенергетски адитиви	Хексоген ( <i>RDX</i> ), октоген ( <i>HMX</i> )
	Нитрогванидин ( <i>NQ</i> )
	<i>CL-20</i>
	Амонијум-динитармид ( <i>ADN</i> )
Компоненте за сузбијање нестабилности сагоријевања	Алуминијум, цирконијум
	Цирконијум-карбид ( <i>ZrC</i> ) танталов-карбид ( <i>TaC</i> )
Компоненте за сузбијање хлороводоничне киселине	Магнезијум ( <i>Mg</i> ), легура магнезијум-алуминијум ( <i>MgAl</i> ), магнезијум оксид ( <i>MgO</i> ), натријум-нитрат ( <i>NaNO<sub>3</sub></i> )

Композитни модификовани двобазни пропеланти (енг. *composite modified double – base propellants, CMDBs*) представљају ракетне пропеланте који се састоје од двобазних пропеланата, металног горива (алуминијумског праха) и нитраминских секундарних експлозива (хексоген, октоген, *CL-20*). Присуство секундарних нитраминских материја у формулацији утиче на побољшање специфичних карактеристика (више вриједности специфичног импулса) ове класе ракетних пропеланата.

Горивом богати пропеланти (енг. *Fuel – rich propellant s, FRP s*) су група ракетних пропеланата који се користе приликом рада погонских система у тзв. рамџет (eng. *ramjet*) моду. Рамџет (аеро-термодинамички канал) мод функционише на начин да се сагоријевање пропеланта врши помоћу зрака који се узима из околине. Гориви елемент су врели гасовити продукти настали сагоријевањем пропеланта са високим садржајем металног праха. Предност ракетних система који користе ову врсту горива је смањење тежине саме ракете јер не постоји потреба ношења оксиданса уз ношење горива. На бази рамџет мода је развијено више врста артиљеријске муниције већег домета [85].



Слика број 53. Шематски приказ артиљеријске гранате изведене у рамџет моду [85]

Недостаци који се јављају приликом употребе течних ракетних пропеланата (складиштење, манипулација, транспорт, цурење и расипање) и чврстих ракетних пропеланата (смањење потисне карактеристике, сложена изведба система за покретање) условили су развој нове класе ракетних пропеланата под називом желирани (тиксотропни) ракетни пропеланти. Специфичне карактеристике желираних ракетних пропеланата се односе на својства течења и деформације под утицајем статичких и динамичких сила које дјелују на материју (гориво). За практичну примјену желираних ракетних пропеланата значајне су карактеристике тиксотропности<sup>155</sup> и реопектичности<sup>156</sup>. Класификација желираних (тиксотропних) ракетних пропеланата на основу реолошких<sup>157</sup> карактеристика се врши на [86]:

<sup>155</sup> Тиксотропност је својство које указује на смањење вискозитета под непромјенљивим силама смицања.

<sup>156</sup> Реопектичност је повећање вискозитета са непромјенљивим силама смицања.

<sup>157</sup> Реологија је грана физике која се бави деформацијом и протоком материјала, чврстих и течних материја.

- псеудопластични
- вискозноеластични
- тиксотропни.

Уобичајена горива и оксиданси се додавањем одговарајућих средстава преводе у желатинозно стање при чему се обезбјеђује већа равномјерност расподеле у суспензији чврстих честица адитива [87].

Табела број 27. Желирани (тиксотропни) пропеланти и материје за желирање [87]

Материје за желирање	Користе се за превођење у желатинозно стање		
	Горива	Оксиданса	Монопропеланата
Силицијум-диоксид ( $SiO_2$ )	Несиметрични диметил-хидразин ( $UDMH$ )	Инхибирана црвена димна азотна киселина ( $IRFNA$ ) <sup>158</sup> Хлор-пентафлуорид ( $ClF_5$ ) Водоник-пероксид ( $H_2O_2$ )	Азот-тетроксид ( $N_2O_4$ ) Триетилен-гликол-динитрат ( $TEGDN$ ) /триметил-етан тринитрат ( $TMETN$ ) /водик-пероксид;
Колоидни силицијум-диоксид <sup>159</sup>	Хидразин, ( $N_2H_4$ )	Црвена димна азотна киселина ( $RFNA$ )	Хидразин/црвена димна азотна киселина
Силикагел <sup>160</sup>			Натријум-перхлорат/хидроксил амонијум-перхлорат ( $HAP$ )
Целулоза и деривати целулозе	Несиметрични диметил хидразин ( $UDMH$ )		Етил-нитрат/пропил-етер

<sup>158</sup> Смјеса која се састоји од азотног диоксида (13-15%), воде (1,5-2,5%), азотне киселине (81,6-84,8%), флуороводоника (0,7%)

<sup>159</sup> Колоидни силицијум-диоксид су суспензије финих аморфних, непорозних и типично сферних честица силицијум-диоксида у течној фази.

<sup>160</sup> Силикагел је силицијум-диоксид аморфне структуре (веома порозан)

	Монометилхидразин ( <i>MMH</i> ) -Хидразин/ несиметрични диметил хидразин	
Натријум- силикат		Црвена димна азотна киселина ( <i>RFNA</i> )
Минерали глине <sup>161</sup>	Несиметрични диметил хидразин ( <i>UDMH</i> ) Монометилхидразин ( <i>MMH</i> ) -Керозин	
Фосфор(V)- оксид		Инхибирана црвена димна азотна киселина ( <i>IRFNA</i> )
Угљик		-Смјеса азотне киселине, азот тетроксида, флуороводика, воде
Алуминијум- оксид		Течни водоник/течни кисеоник ( <i>LOX</i> )
Полиакрил- амид		Хидразин
Пропилен - гликол	Керозин	

Желирани (тиксотропни) ракетни пропеланти показују низ значајних побољшаних карактеристика у односу на течна и чврста ракетна горива.

*Табела број 28. Предности желираних (тиксотропних) пропеланата у односу на чврста и течна ракетна горива [87]*

<sup>161</sup> Минерали глине су водени филосиликати алуминијума, понекад са промјенљивим количинама гвожђа, магнезијума, алкалних метала, земноалкалних метала и других катјона.

	Фактори	Примједба
Безбједност	Цурење и изливање	Могућност цурења и изливања је мања у поређењу са течностима јер се површина гела стврдњава у гасовитом окружењу.
	Осјетљивост на удар, трење и електростатичко пражњење	Гелови су неосјетљиви као течности у поређењу са чврстим материјама гдје може доћи до експлозије
	Случајно паљење	У гелу исто као и у течности, сагоријевање се може контролисати, док у чврстим материјама, моторно паљење може довести до катастрофе.
	Пукотине на структури горива	Гел, сличан течности, уноси се директно у комору за сагоријевање, што не изазива појаву пукотина на структури гела, док у чврстом стању, пукотина може довести до неконтролисаног сагоријевања и на крају експлозије.
Карактеристике	Специфични импулс	Гел има исти импулс као и течности и може се повећати ако се унесу металне честице.
	Густина импулса	Гел са додатком металних честица има бољу густину импулса од течности.
	Управљање и контрола енергије	Гел има исте могућности као и течности
Складиштење	Стабилност	Гел има више од 10 година могућности складиштења
	Паковање	Флексибилно паковање, исто као код течности

Хибридни пропеланти су класа ракетних пропеланата који у свом саставу садрже два различита физичка стања материје. Гориво (гориви елемент) налази се у чврстом стању док се оксиданс налази у течном или гасовитом стању. Најшире кориштени хибридни

пропеланти се налази у облику шупљег зрна без оксиданса и засебно одвојеног оксиданса које се дистрибуира у комору у тренутку кориштења горива. Азотни тетраоксид и хлор-трифлуорид се користе као оксиданс а хидрокси-терминирани полибутадиен (енг. *HTPB*) као гориво. Такође су вршена испитивања хибридних горива на бази система *HTPB-PAPI* (гориво-оксиданс, полиизоцијанат) уз додатак адитива гориву (гванидинујум азо тетразолат, *GAT*). Оксиданси новијег датума су мјешавине азотних оксида и кисеоника те додаци гориву (10% алуминијум-хидрида).

Пиротехничке материје су супстанце или смјеше супстанци које приликом процеса сагоријевања (егзотермних хемијских реакција) стварају различите ефекте као што су топлотни, свјетлосни, временски успорени, звучни и димни. Разлика пиротехничких материја и смјеша од примарних, секундарних, терцијарних експлозива и пропеланата се огледа у брзини одвијања егзотермних реакција. Експлозиве карактерише највећа брзина хемијских реакција<sup>162</sup> док пропеланти показују најнижу брзину хемијских реакција. Брзина одвијања хемијске реакције пиротехничких материја и смјеша је мања у односу на експлозиве и већа у односу на пропеланте. Пиротехничке материје су претежно смјеше неорганских супстанци те се за провођење процеса сагоријевања не користи атмосферски кисеоник. Формулације пиротехничких материја углавном сачињавају [13]:

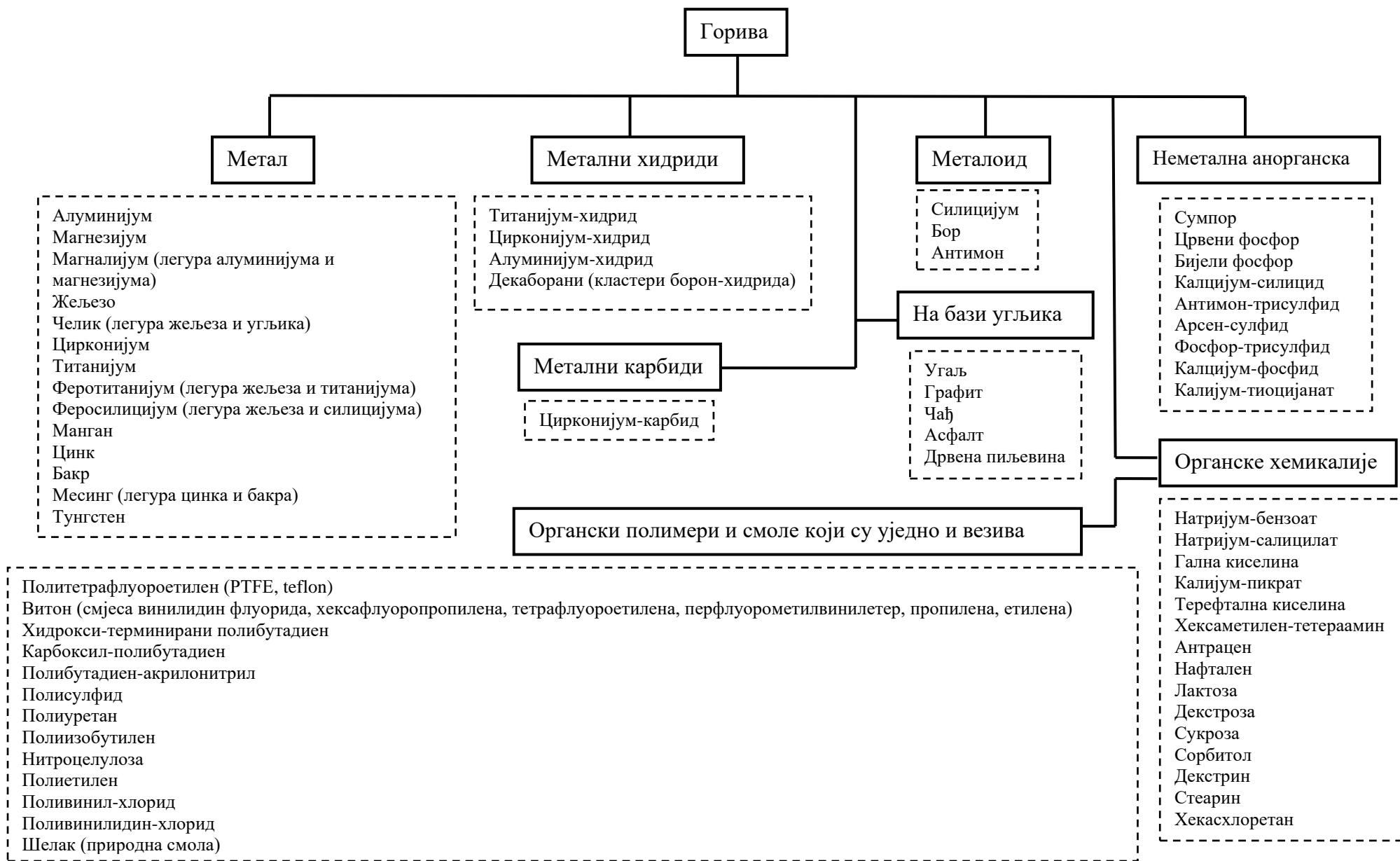
- гориво
- оксиданс
- адитиви.

Гориво (енг. *fuel*) јесте главни извор енергије на основу које настаје одговарајући ефекат. Према хемијском саставу, горива могу бити метални, неметални елементи, бинарне смјеше, разне врсте природних и синтетичких материјала на бази угљеника и органске хемикалије (полимери, смол и слично).

Оксиданси (енг. *oxidizers*) представљају извор кисеоника неопходног за одигравање хемијске реакције.

---

<sup>162</sup> Промјена концентрације у јединици времена, приказује се путем брзине настанка продуката или брзине трошења реактаната



Слика број 54. Класификација горива на основу хемијског састава у пиротехничким формулацијама



Слика број 55. Класификација оксиданса према хемијском саставу у пиротехничким формулацијама

У зависности од намјене у циљу побољшања захтијеваних карактеристика у састав пиротехничких смјеша се додају и различити адитиви (материје). Разликују се сљедеће врсте адитива:

- везива (енг. *binders*) су материје које повећавају кохезију између честица горива и оксиданса и истовремено имају заштитну улогу честица горива од утицаја влаге и ваздуха. У природна везива убрајају се различити воскови (парафински, пчелињи, карнауба, кинески), шелак и сл. док групи вјештачких везивних материјала припадају смоле (бакелитна, полиестарска, епокси, винил-ацетат алкохолна), хлорисана гума, поливинил-хлорид, тиокол гума, тефлон и слично;
- средства за хлађење (енг. *Coolants*) се користе за смањење температуре током процеса горења. За ову намјену се користе карбонатне соли магнезијума;
- успоривачи горења (енг. *Retardants*) су материје које имају улогу смањења брзине поцеса горења (на примјер, оксалати);
- боје (енг. *colorants*) су материје које имају улогу продукције различитих боја. Претежно се употребљавају соли различитих метала (баријума, стронцијума, калција, натрија, бакра);
- појачивачи боја (енг. *Color Intensifiers*) су супстанце које се користе ради појачања интензитета боје. Поједини органски хлориди (поливинил-хлорид, хексахлор-бензен) у смјеси са металним солима појачавају интензитете боје настале приликом сагоријевања пиротехничке смјесе;
- модератори (енг. *Moderators*) се употребљавају за модификацију пламена и повећање ефикасности сагоријевања (баријум, стронцијум-нитрат);
- успоривачи пламена (енг. *Flame suppressant*) којима је циљ спречавање или успоравање процеса сагоријевања пиротехничких смјеса. Најчешће кориштени успоривачи пламена су калијум-нитрат и калијум-сулфат;
- опацификатори представљају материје помоћу којих се постиже непрозирност<sup>163</sup> материјала (пиротехничке смјесе) у коме се налазе. Ради спречавања преноса топлоте радијацијом врши се додавање угљика у форми графита или чађи;
- катализатори (енг. *Catalysts*) представљају материје које доводе до повећања брзине хемијске реакције (сагоријевање пиротехничких материја представља

---

<sup>163</sup> Непрозираност је мјера непробојности за електромагнетно или друге врсте зрачења, посебно видљиву свјетлост.

егзотермну хемијску реакцију). Као катализатор се користе амонијум-дихромат, жељезни оксид, манганов диоксид, калијум-дихромат, бакарни хромат, оловни салицилат, оловни стеарат, литијум-флуорид, бакарни салицилат, бакарни стеарат;

- стабилизатори (енг. *Stabilizers*) су материје које имају улогу спречавања или инхибирања процеса деградације хемијских једињења која се налазе у пиротехничкој смјеси. Смјесе које садрже хлорате имају временом тенденцију разлагања и настанка „киселих” нуспродуката. У функцији стабилизатора се користе благо алкалне материје (натријум-карбонат, калцијум-карбонат, баријум-карбонат) помоћу којих се врши уклањање киселих нуспродуката;
- средства против згрушавања (енг. *Anticaking agents*) имају улогу спречавања стварања грудвица у прашкастим и гранулисаним материјама. За ове намјене најчешће се користи тзв. испарени силицијум-диоксид (пирогенични силицијум-диоксид)<sup>164</sup>;
- пластификатори (енг. *Plasticizers*) су материје које побољшавају механичке особине пиротехничких смјеса у циљу постизања већег степена пластичности. У ову врсту адитива се сврставају диоктил-адипат, изодецил-пеларгонат и диоктил-фталат;
- средства за очвршћивање и умрежавање (енг. *Curing and crosslinking agents*) се употребљавају за очвршћивање полимерних компоненти које се налазе у пиротехничким смјешама. Као средство за очвршћивање и умрежавање користе се паракинон-диоксим, толуен-2-4-диизоцијанат и изофорни диизоцијанат.

Класификација пиротехничких смјеша се врши на основу ефеката који настају приликом употребе [13, 88]. Основни ефекти који настају усљед употребе пиротехничких смјеша су:

- свјетлосни
- временски
- димни
- топлотни

---

<sup>164</sup> Испарени силицијум-диоксид познат и као пироген силицијум-диоксид састоји се од микроскопских капљица аморфног силицијум-диоксида спојених у разгранате, ланчане, тродимензионалне секундарне честице које се затим агломерају у терцијарне честице.

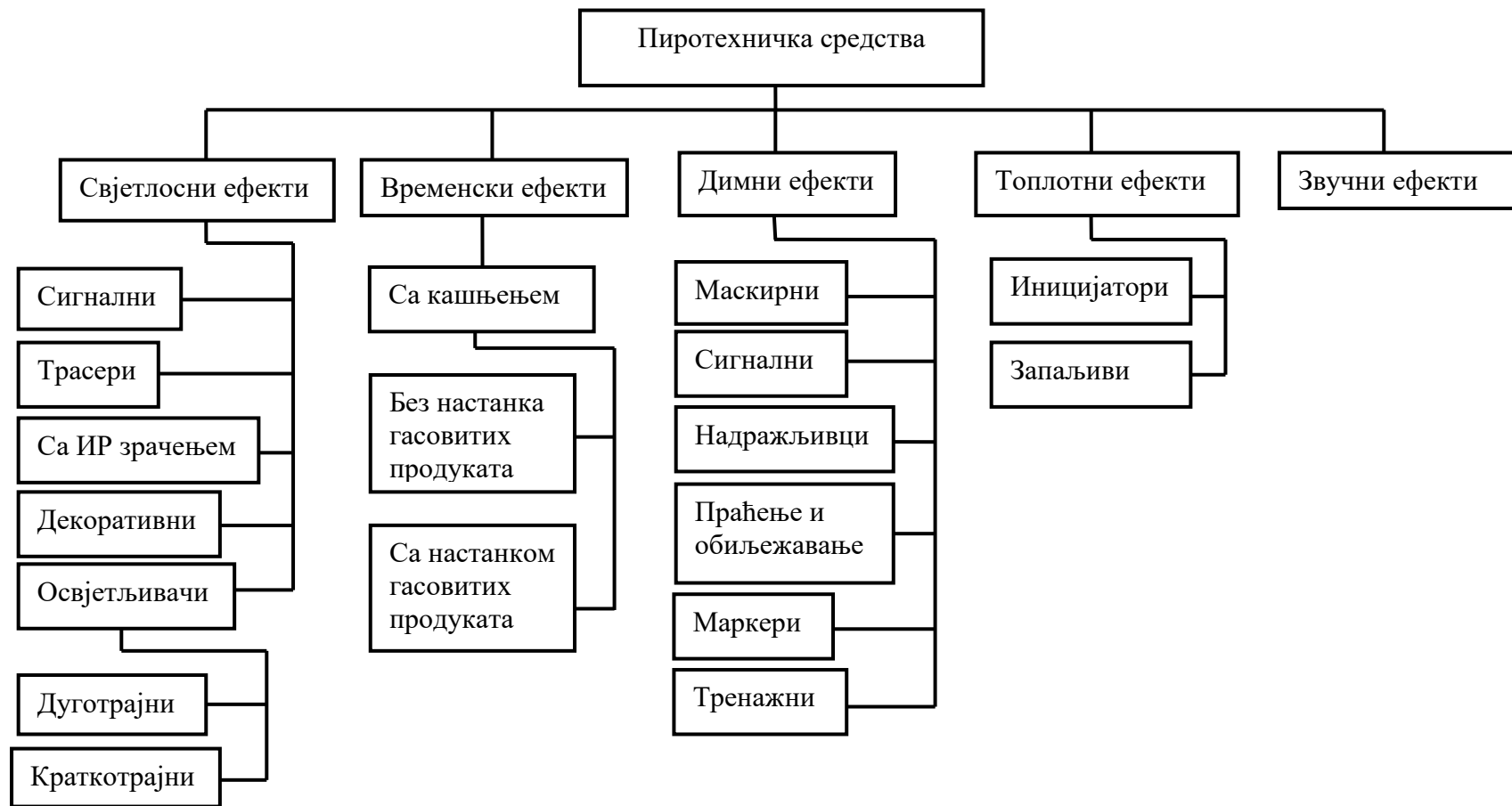
- звучни.

Пиротехничке материје које посједују могућност изазивања свјетлосног ефекта (свјетлости)<sup>165</sup> нашле су примјену у многим војним и цивилним областима примјене. Освјетљавање простора на коме се изводе борбене операције, сигнализирање, обиљежавање, трасирање су само неке могуће употребе пиротехничких материја у војне сврхе. У цивилном сектору, ова врста пиротехничких средстава се користи приликом извођења различитих операција спасавања на води и копну као и у области забаве (ватромети, музички концерти и слично). Подјела пиротехничких материја са свјетлосним ефектима према намјени се може извршити на:

- освјетљавачи
- сигнални
- трасери
- емитери инфрацрвеног спектра зрачења
- декоративни.

---

<sup>165</sup> Свјетлост су електромагнетни таласи чија је таласних дужина у видљивом спектру електромагнетних таласа (људско око може да прими, односно, региструје само електромагнетне таласе видљивог спектра).



Слика број 56. Подјела пиротехничких материја на основу ефекта

Пиротехничке материје које омогућавају освјетљавање одређеног простора у неком времену називају се освјетљивачи. Најчешће се користе материје које дају бијелу свјетлост различитог времена трајања и интензитета. Подјела освјетљивача се врши на:

- дуготрајна свјетла (енг. *flares*)
- краткотрајна свјетла (енг. *photoflashes*).

Под називом дуготрајна свјетла сматра се појединачни извор освјетљења намијењен за посматрање, идентификацију, обиљежавање мете и сл. Краткотрајна свјетла представљају јединични извор бљеска свјетлости намијењен за фотографисање у ноћним условима. Уопштено, освјетљивачи су смјеша металних оксида, оксиданса и адитива који имају улогу модификације брзине горења смјеше, излазног зрачења и повећања безбједности руковања њима. У најважније материје које се користе у ову сврху сврстава се бинарни систем магнезијум-натријум оксид ( $Mg-NaNO_3$ ). Карактеристике освјетљивача зависе од већег броја чинилаца у које се убрајају:

- природа горива – метални прахови који подлијежу егзотермном процесу оксидације уз истовремено развијање топлоте и свјетлости. Пожељна карактеристика је способност развијања бијеле свјетлости. Употребљавају се метални прахови магнезијума, алуминијума, титана, цирконијума и волфрама (тунгстен) при чему је магнезијум највише заступљен;
- природа оксиданса – материје које обезбјеђују потребне количине кисеоника за одвијање реакције оксидације при чему је пожељно да оксиданс лако „отпушта” кисеоник. Најчешће кориштени оксидант је натријум-нитрат који даје 0,4–0,5 грама кисеоника по граму оксиданса. С обзиром на то да се натријум у потпуности редукује, реакција се одвија у континуитету уз емитовање бијело-жућкасте свјетлости. Такође, натријум показује луминисценцију<sup>166</sup> која додатно повољно утиче на емитовану свјетлост;
- садржај горива – садржај магнезијума у пиротехничким смјешама утиче на карактеристике саме смјеше. Најинтензивнија свјетлост настаје када смјеша

---

<sup>166</sup> Луминисценција је карактеристика материје да емитује свјетлост која није последица утицаја топлоте, тзв. хладна свјетлост.

садржи 70–75% магнезијума, а даље повећање удјела магнезијума доводи да смањења интензитета свјетлости;

- величина честица састојака – с обзиром на то да мање честице посједују већу активну површину (специфичну површину), може се претпоставити да величина, облик и дистрибуција честица састојака пиротехничке смјеше могу имати утицај на процес горења а, самим тим, и на карактеристике пиротехничке смјеше. Смањење честица магнезијум праха повољно утиче на интензитет свјетлости и брзину горења;
- врста и тип везивног средства – садржај везива од 4–6% показује најбоље ефекте на интензитет свјетлости као и везива са већим садржајем кисеоника. Таква везива су незасићени полиестри и епоксидне смоле;
- природа и удио адитива – имајући у виду улогу адитива (средства за хлађење, успоривачи горења), утицај природе и удјела адитива у пиротехничким смјешама се огледа у утицају на процес горења а, самим тим, и на карактеристике смјеше;
- материјал кућишта – материјал и заштитни премаз од кога је сачињено кућиште пиротехничког средства показује одређени ниво утицаја на одвијање процеса горења, односно, карактеристике пиротехничке материје (губитак топлоте у околину, могућност трења). Најчешће употребљавани материјали за израду тијела пиротехничких средстава су картон, папир, терморективне смоле и сл.
- пречник свијетлеће површине – интензитет свјетлости је у директној пропорционалној вези са пречником површине на којој се одиграва процес горења;
- степен консолидације – свијетлећа пиротехничка средства претежно се израђују у геометријском облику шупље цијеви ради обезбјеђења одговарајуће површине на којој се одиграва процес горења (интензитет свјетлости), као и потребне количине смјеше за провођење процеса горења одређено вријеме (вријеме трајања емитовања свјетлости). Такође је значајно обезбиједити одговарајућу консолидацију (попуњеност) ради континуираног трајања процеса горења а, самим тим, и емисију и интензитет свјетлости. Са повећањем степена консолидације, линеарна брзина горења се незнатно смањује док се брзина горења и јачина свјетлости повећавају;

- амбијентални услови – окружење у коме се користе пиротехничка средства за освјетљавање такође утичу на карактеристике пиротехничких смјеша. У срединама са богатим садржајем кисеоника, интензитет емитоване свјетлости је вишег нивоа у односу на средине са смањеном количином кисеоника.

Температура горења пиротехничких смјеша износи око  $2200^{\circ}\text{C}$  када се користе хлорати и перхлорати као оксиданси и гориво органског поријекла. Додавањем металног праха магнезијума температура горења се повећава и износи  $2500\text{--}3300^{\circ}\text{C}$ .

Поједине пиротехничке смјеше се користе за емитовање краткотрајне бијеле свјетлости високог интензитета. Типичан примјер формулације ове врсте пиротехничких смјеша је смјеша:

- атомизирани алуминијум (величина честица  $20\pm 5$  микрона) 40%,
- калијум-перхлорат (величина честица 24 микрона) 30%
- баријум-нитрат (величина честица 150 микрона) 30%.

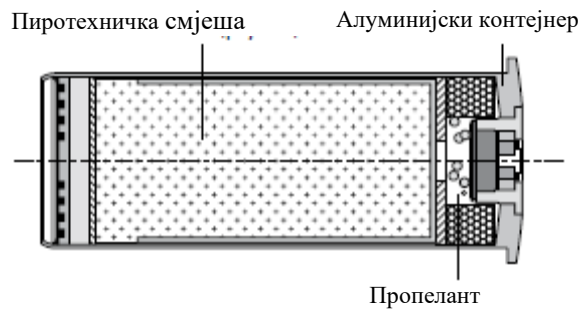
Сигналне пиротехничке смјеше путем емитовања свјетлости различитих боја дају претходно договорене сигнале. Најчешће у употреби су црвено свјетло које настаје кориштењем стронцијум нитрата, зелена – баријум-нитрата и жуто свјетло – натријум-оксалата. Магнезијум је уобичајени састојак ових пиротехничких смјеша са масеним удјелом од 15 до 30%.

Трасери представљају групу пиротехничких смјеша помоћу којих се врши осматрање путање (трајекторије) различитих врста пројектила. Најчешће у употреби су смјеше које емитују интензивно црвено свјетло (траг, путању). Основу састава чини систем магнезијум/стронцијум, нитрат/везивно средство са различитим адитивима. Везивне материје на основи полиестара као и гуме са високим садржајем флуора показале су веома добре карактеристике.

Пиротехничке смјеше које приликом сагоријевања емитују електромагнетно зрачење таласних дужина које се налази у опсегу таласних дужина инфрацрвеног (енг. *infra red*, *IR*) зрачења користе се у војне и цивилне намјене. Подјела се врши на:

- пиротехничке смјеше са *IR* зрачењем за праћење путање ракета
- пиротехничке смјеше са *IR* зрачењем у тренажне сврхе
- пиротехничке смјеше са *IR* зрачењем у улози лажних циљева (*IR* мамци).

Најзначајније мјесто заузимају пиротехничке смјеше са инфрацрвеним зрачењем у улози лажних циљева (слика 57).



Слика број 57. Шема конструкције *IR* мамца [13]

Оне се користе као одбрана од навођених ракета путем детекције извора инфрацрвеног зрачења. Развијена су два типа смјеша. Први тип представља смјешу старијег датума, која је интензивно кориштена у Вијетнамском рату (1955–1975) и сачињена је од магнезијума, тefлона<sup>167</sup> и витона<sup>168</sup> (*MTV*). Други тип представљају пиротехничке смјеше новијег датум које карактерише дуални (двојни) спектар зрачења<sup>169</sup>.

Пиротехничке смјеше са *IR* зрачењем за праћење путање ракета претежно садрже метално гориво (магнезијум, силицијум, цирконијум) или легуре (жељезо-силицијум, магнезијум-алуминијум), оксидансе (баријум-оксид, жељезни оксид), адитиве (угљени прах, графит) инкорпориране у полимерно везиво.

Пиротехничке смјеше се такође користе за добијање свјетлосних ефеката који утичу на естетске карактеристике у индустрији забаве (ватромети за свечаности, прославе, музичке концерте и слично). Састоје се од горива, оксиданса, неорганских соли које продукују одговарајућу боју и везива. Имајући у виду намјену, гориво се претежно

<sup>167</sup> Политетрафлуороетилен – синтетички флуорополимер тетрафлуороетилена

<sup>168</sup> Синтетичка гума

<sup>169</sup> Савремени инфрацрвени вођени ракетни системи користе напредније технологије у смислу употребе два или више спектралних опсега ради разликовања циља и лажног циља – инфрацрвеног мамца.

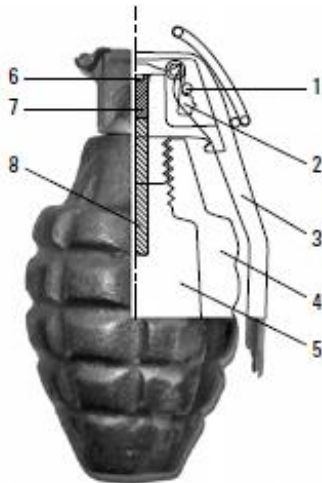
састоји од алуминијумског праха или легуре алуминијум-магнезијум под називом магналијум, оксиданса који може бити кисеоник из зрака или амонијум-перхлорат, везивног средства и неорганских соли у зависности од жељене боје свјетлости (табела 29).

Табела бој 29. Зависност настале боје свјетлости од кориштене неорганске соли

Боја	Метал	Састојак смјеше
Црвена интензивна	Стронцијум	Стронцијум-карбонат
Црвена	Литијум	Литијум-карбонат или литијум-хлорид
Наранџаста	Калцијум	Калцијум-хлорид
Жута	Натријум	Натријум-нитрат
Зелена	Баријум	Баријум-хлорид
Плава	Бакарни халиди <sup>170</sup>	Бакарни хлорид
Индиго	Цезијум	Цезијум-нитрат
Љубичаста	Калијум	Калијум-нитрат
Љубичасто црвена	Рубидијум	Рубидијум-нитрат
Златна		Угаљ, жељезо
Бијела		Титан, алуминијум, берилијум, магнезијум

У групу пиротехничких материја с временским ефектима убрајају се пиротехничке материје које показују ефекат кашњења (одлагања), односно, могућност настанка временске дистанце између двије експлозије (енг. *delay*). Једноставно објашњење се може дати на примјеру употребе ручне бомбе.

<sup>170</sup> Халиди су бинарне фазе у којима је један дио халогени атом а други дио атом елемента или радикал који је мање електронегативнији (електропозитивнији) од халогеновог атома



Слика број 58. Шематски приказ ручне бомбе (1 – осигурач, 2 – опруга ударног механизма, 3 – полука осигурача („кашика”), 4 – фрагментирано тијело, 5 – експлозивно пуњење, 6 – каписла, 7 – смјеша за паљење, 8 – пиротехничка материја са ефектом кашњења)

Приликом одстрањивања тзв. осигурача на ручној бомби, долази до почетка активирања експлозивног процеса, односно, активирања пиротехничке смјеше за кашњење која омогућава кретање ручне бомбе (бацање и вријеме лета) без активирања главног секундарног експлозивног пуњења одређени временски период након којег долази до иницирања и експлозије главног секундарног експлозивног пуњења. Временски период између двије експлозије који се може постићи употребом ове врсте пиротехничких смјеша износи од неколико милисекунди до једне минуте.

У зависности од природе продуката сагоријевања, пиротехничке материје са временским ефектом се дијеле на материје чијим сагоријевањем настају гасовити продукти (енг. *slagless*) и користе се у системима гдје је обезбијеђен одвод гасовитих продуката и на материје чијим сагоријевањем не долази до стварања гасовитих продуката (енг. *gasless*) које се користе у системима гдје није обезбијеђен одвод гасовитих подуката.

Друга врста класификације ових пиротехничких смјеса се може извршити на основу времена трајања ефекта кашњења помоћу тзв. инверзне брзине горења (енг. *inverse burning rate, IBR*) (табела 30).

Табела број 30. Класификација пиротехничких смјеса са ефектом кашњења

Класификација	IBR / $cms^{-1}$	Примјена
Веома брзе	$>0,04$	За милисекундна кашњења
Брзе	0,4	Почетна формулација за иницирање смјеше за кашњење
Средње	2	Одабир формулације се врши на основу
Споре	4	конструктивних могућности – расположивости
Веома споре	$>12$	дужине за одлагање кашњења, потребног времена и вањских утицаја

Већа вриједност инверзне брзине горења представља мању брзину линеарног сагоријевања, односно, ефекат успоравања је израженији.

У саставу пиротехничких смјеша са ефектом кашњења се налазе гориво, оксиданс, везивно средство и, према потреби, успоривач.

Смјеше које развијају гасовите продукте горења користе различите врсте горива као што су:

- природне материје (скроб, шећер, дрвени угљен, смоле, гуме),
- калијумове соли органских киселина (салицилна киселина, сулфонска киселина, нитрирани феноли, крезол и њихови деривати)
- хлоровани материјали (поли (винил-хлорид), ПВЦ и хлорована гума-хлоропрен)
- полинитрооргански деривати (тетранитрокарбазол, *TNC*; тетранитрооксанилид, *TNO*).

Баријев нитрат се генерално користи као оксиданс у спорим формулацијама.

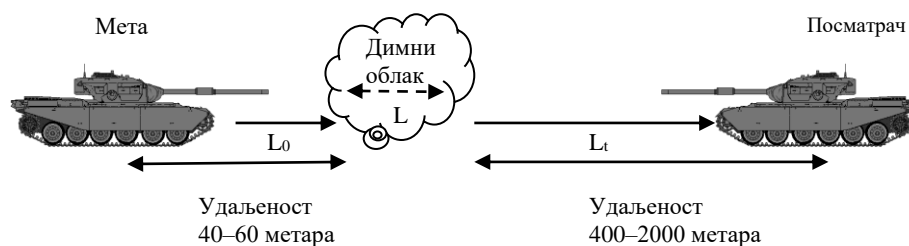
Реакциони механизам пиротехничких смјеша са ефектом кашњења које не продукују гасовите продукте (*gasless*) заснива се на механизму реакције слично механизму реаговања термитних експлозива (Голдшмитова реакција). У оксидо-редукцијској реакцији учествују метални прах и метални оксид уз развијање велике количине топлоте са веома малом количином гасовитог продукта (мање од 10 ml гаса по 1 g смјеше) или без гасовитих продуката. Гориво чине металне честице титана, циркона,

мангана, волфрама, молибдена и антимона величине 2–10 микрометара. Такође се користе неметална једињења (бор, силицијум), двојне легуре (феросилицијум, циркомијум-никл, алуминијум-паладијум) и метална једињења (антимонов сулфид, калцијум-силицид). Оксидативну компоненту чине оксиди тешких метала (црвено олово-олово (II, IV) оксид, миниј, олово-оксид, жељезо-оксид, бизмут-оксид, оловни и баријеви хромати, пероксида, оксалати калијума и баријума).

Дим представља супензију чврстих или течних честица мале величине у гасовитом медију, односно, аеросол. Пиротехничке материје стварају димни ефекат на начин да услед егзотермне оксидоредукцијске реакције оксиданса и горива (настаје одређена количина топлоте) долази до стварања гасовитих продуката реакције или испаравања појединих компоненти смјеше које се затим кондензују у контакту са околином (ваздухом) те настају ситне честице распршене у ваздуху, односно, формира се дим. Распршене честице у ваздуху апсорбују или рефлектују зрачење различитих таласних дужина у зависности од природе, величине и облика честица, као и од таласних дужина падајућег зрачења.

Пиротехничке материје са ефектом стварања дима се класификују на основу намјене насталог димног ефекта:

- пиротехничке материје које изазивају дим за маскирање (енг. *Screening smokes*) – употребљавају се за прикривање кретања, опреме и инсталација, односно за смањење могућности осматрања из ваздуха и са земље (слика 59). Обично су бијеле боје и дјелују у подручју видљивог и инфрацрвеног спектра електромагнетног зрачења.



Слика број 59. Шема употребе дима за маскирање ( $L_0$  – интензитет упадне свјетлости,  $L_t$  – интензитет пропуштене свјетлости,  $L$  – дужина димног облака)

Састав пиротехничких смјеша које дају димне ефекте и користе се за маскирање приказани су у табели 31.

Табела број 31. Састав пиротехничких смјеша за маскирање

Стандардни састави			Напредни састави		Састави без магнезијума
Састав 1	Састав 2	Састав 3	Састав 4	Састав 5	Састав 6
Црвени фосфор 10%	Црвени фосфор 50%	Црвени фосфор 75%	Магнезијум 7–12%	Магнезијум 12%	Црвени фосфор 58,5%
Калијум-нитрат 30%	Калијум-сулфат 37%	Калијум-оксид 10%	Црвени фосфор 65–70%	Црвени фосфор 66%	Калијум-нитрат 21,1%
Амонијум-хлорид 60%	Бор <sup>171</sup> 10%	Магнезијум 11%	РТФЕ 17%	Калијум-нитрат 16%	Цирконијум 4,7%
	Витон <sup>172</sup> 3%	Различита везива 4%	Полихлоропрен 6%	Поливинил алкохол 6%	Силицијум 4,7%
					Бор 4,7%
					Хлоропрен 6,3%

С обзиром на то да приликом складиштења и употребе пиротехничких смјеша са магнезијумом долази до нежељених нуспродуката, развијене су пиротехничке формулације у којима је магнезијум замијењен другим металима (табела 31).

- Пиротехничке материје у сврху сигналних димова (енг. *Signaling smokes*) – карактерише их веома добра уочљивост те се користе за сигнализацију и комуникацију. Бијела и сива боја димног облака се мање употребљава у односу на друге боје. Потребно је имати у виду, уопштено, да се процес горења димних пиротехничких смјеса одвија на нижим температурама у односу на друге типове пиротехничких смјеша из разлога што се димни облак загријан на вишим

<sup>171</sup> Хемијски елемент

<sup>172</sup> Синтетичка гума

температурам веома брзо подиже на већу висину (губи се циљ употребе) а кориштене димне боје у потпуности сагоријевају (оксидација у угљен-моноксид и угљен-диоксид). Пиротехничким смјешама намијењеним за добијање ефекта обојених димова се додају тзв. димне боје које могу имати двоструко дејство у формулацији. Димне боје узрокују ефекат сублимације који је ендотерман („троши топлоту“) и, самим тим, снижава температуру димног облака а сублимиране честице димне боје дају интензивно обојење димног облака. Састав пиротехничких смјеша које продукују обојене димове и претежно сагоријевају на нижим температурним режимима је заснован на калијум-хлорату ( $\approx 35\%$ ) као оксидансу, шећеру ( $\approx 20\%$ ) које има улогу горива и једне или више компоненти задужени за обојење дима (димне боје  $\approx 40\text{--}50\%$ ). Такође се у формулације овог типа пиротехничких смјеша додаје натријум-бикарбонат ( $\approx 2\%$ ) као средство за снижавање температуре горења и везивних материја попут винил-алкохол-ацетатне смоле (енг. *vinyl alcohol acetate, Resin, VAAR*) и поливинил алкохола (енг. *polyvinyl alcohol, PVA*). Типичне материје које представљају димне боје су 1-метиламино антракинон, дисперзна црвена 9 (црвена), 1-фенилазонафт-2-ол, судан 1 (наранџаста), ват жута са бензатроном (жута), 1-метиламино антракинон, дисперзна црвена 9 са 1,4-диамино-2,3-дихидроантракинон (љубичаста), ват жута са бензатроном и куинизарин зелени сс (енг. *Solvent Green 3*) (зелена), нафтаген и антрацен (црна).

- Димови надражљивци (енг. *Lachrymatory smokes*) – познатији под називом сузавци показују физиолошки утицај на људе у виду надржаја на сузе. Користе се у контроли нарушавања јавног реда и мира већих група људи (протести, немири, нереди и слично) те у изради уређаја за самоодбрану у виду спреја. Настају пиротехничком реакцијом која је праћена процесом испаравања и кондензовања. Физиолошка ефикасност у највећој мјери зависи од величине распршених честица дима. Најчешће супстанце које се користе у димним надражљивцима (сузавцима) су хлорацетофенон, орто-хлорбензилидин-малонитрил (енг. *CS*) и дибензоксазепин (енг. *CR*).



Слика број 60. Активирани уређај са сузавцем

- Димови за праћење путање и обиљежавања циљева (енг. *Tracking and acquisition smokes*) – користе се за визуелно праћење трајекторије путање свемирских возила и пројектила на великим висинама. Такође се примјењују за израду муниције за аутоматска оружја са циљем повећања степена контроле дејства аутоматских оружја.
- Димни маркери (енг. *marker smokes*) – подразумевају пиротехничке смјеше које у контакту са морском водом реагују при чему настаје гас фосфин чија је главна карактеристика веома висока реактивност (долази до спонтаног запаљења). У групу материја које реагују са морском водом припадају калцијум-фосфид, магнезијум-фосфид и алуминијум-фосфид. Маркери на бази ових материја се користе за обиљежавање на већим воденим површинама.
- Тренажне димне материје (енг. *training smokes*) – првенствено се употребљавају приликом извођења различитих врста обуке. Уопштено, карактерише их непостојање токсичног ефекта на људе као и негативног утицаја на животну средину. Формулацију ове групе супстанци чине гориво, оксиданс и везивно средство. Међу значајније пиротехничке смјеше ове намјене се сврставају смјеше израђене на основу амонијум-хлорида, натријум и калцијум-хлорида или циметне киселине и терефталне киселине.

Табела број 32. Састав пиротехничких смјеша за добијање димних ефеката у тренажним процесима

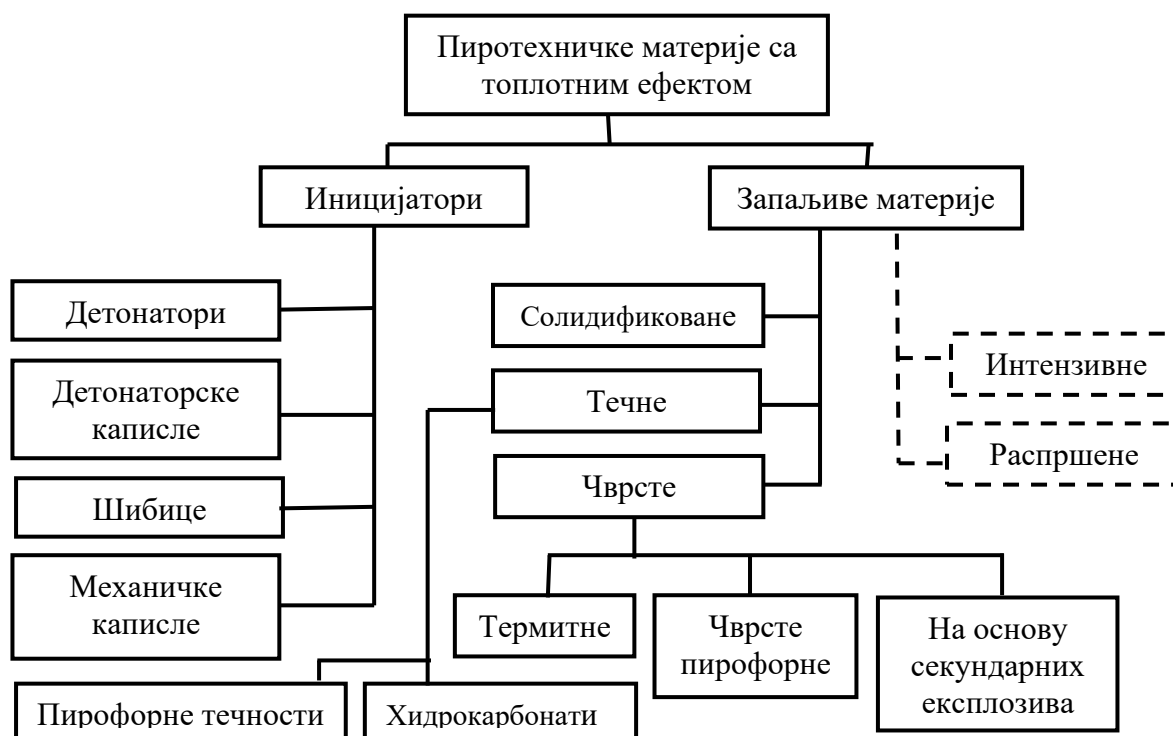
Састав на основу амонијум-хлорида		Састав на основу натријум-хлорида, калцијум-хлорида	Састав на основу циметне и терефталне киселине	
Амонијум-хлорид 56%	Амонијум-хлорид 50%	Калијум-хлорид 44%	Калијум-хлорат 29%	Терефтална киселина 57%
Шећер 15%	Нафтален/антрацен 20%	Калијум-нитрат 27%	Сукроза <sup>174</sup> 12%	Сукроза 14%
Росин <sup>173</sup> 9,5%	Калијум-хлорат 20–30%	Калијум-перхлорат 5%	Циметна киселина 47,5%	Калијум-хлорат 23%
Калијум-хлорат	Дрвени угаљ <10%	Магнезијум 8%	Натријум-бикарбонат	Магнезијум-карбонат 3%

<sup>173</sup> Калофониј, природна борова смола.

<sup>174</sup> Сложени шећер чија је молекула састављена од двије молекуле простих шећера (молекуле фруктозе и молекуле глукозе).

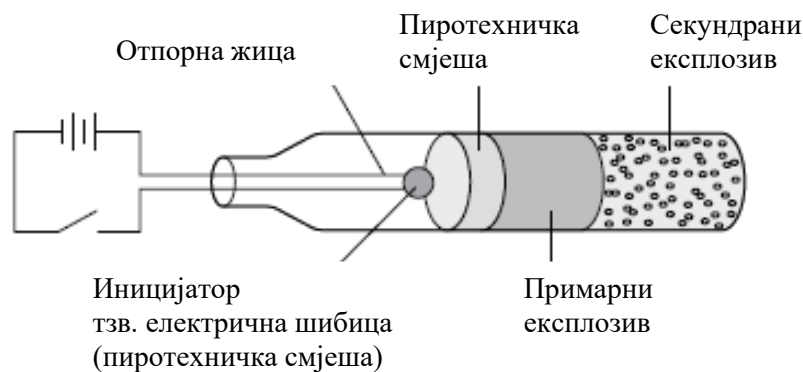
19,5%	Азодикарбонамид	6,5%	Графит 1%
	16%	Силицијум-диоксид 5%	Нитроцелулоза 2%
		Нитроцелулоза	

Пиротехничке материје током егзотермног хемијског процеса (горење) ослобађају одређену количину енергије која се манифестује у различитом облику (пламен, свјетлост, дим, гас). Пиротехничке смјеше које карактерише изражен ефекат пламена, односно, ослобађање веће количине топлотне енергије у односу на друге пиротехничке смјеше сврставају се у засебну групу пиротехничких материја са топлотним ефектом. Подјела овог типа пиротехничких смјеша се врши на основу начина примјене (сл. 61).



Слика број 61. Класификација пиротехничких материја које продукују топлотну енергију

Иницијатори су пиротехничке смјеше које производе интензивну топлоту у кратком временском периоду и користе се за паљење у експлозивним капислама, детонаторима или као тзв. прва ватра приликом употребе погонских горива. Користе се као запаљиви премази, пиротехничке смјеше за израду детонаторских каписли, детонатора, премаза осјетљивих на механички удар и шибице. Шематски приказ функције пиротехничке материје у улози иницијатора је представљен на слици 62.



Слика број 62. Приказ детонатора са електричним иницијатором

Примјери формулација (састава) пиротехничких материја (смјеса) са топлотним ефектом које се користе за наведене намјене су приказане у табели 33.

Табела број 33. Примјери формулација појединих пиротехничких смјеша у улози иницијатора

Тзв. прва ватра, запаљиви премази	Детонатори	Запаљиви премази осјетљиви на механички удар	Шибице
Живин фулминат, калијум-хлорат, Оловни стифнат, тетразен, баријум-нитрат, оловни диоксид, антимон-сулфид, калцијум-силицид, Диазодинитрофенол или стронцијум дiazодинитрорезорцинат, тетразен, цинк-пероксид	Оксиданси: калијум-нитрат, баријум-оксид, Гориво: магнезијум, титан, силицијум	Калијум-хлорат, тринитротолуен, оловни оксид, антимон- трисулфид	Антимон- трисулфид или сумпор, калијум- хлорат/фосфор (елемент за треће)

Запаљиве пиротехничке смјеше (састави) (енг. *Incendiary Formulations*) односе се на пиротехничке материје које имају способност лаког покретања пожара, односно материје које дуже вријеме могу развијати пламен. Класификација запаљивих пиротехничких смјеша се врши на смјеше интензивног и смјеше распршеног типа.

Материје интензивног типа карактерише самозапаљивост и одржавање пламена (горења) компактне масе без одигравања процеса детонације на мањем простору.

Смјеше распршеног типа представљају материје које се могу распршити на ширем простору.

Подјела запаљивих пиротехничких смјеша такође се може извршити према физичком стању на сљедеће категорије:

- течне материје (хидрокарбонати, пирофорне течности)
- солидификоване течности или гелови (хидрокарбонатни гелови)
- чврсте материје (термити, пирофорни метални прахови, запаљиве материје на бази секундарних експлозива).

У течне запаљиве пиротехничке материје убрајају се хидрокарбонати и пирофорне течности (енг. *Hydrocarbons and pyrophoric liquids*). У групу хидрокарбоната се сврставају поједини угљиководоници који се налазе у течном стању на собној температури као што су бензен, толуен, ксилен, бензин, дизел, керозин и терпентин. Овим материјама су пуњени различити пројектили при чему се као главни недостатак показао негативан утицај на балистичке карактеристике пројектила.

Течне пирофорне материје посједују карактеристику спонтаног сагоријевања у контакту са ваздухом или експлозивне реакције у контакту са водом. Типичне течне пирофорне материје су триетил-алуминијум, диметил-магнезијум, диетил-цинк и пентаборан.

Солидификоване течности или гелове представљају, у суштини, модификовани течни хидрокарбонати. Модификација се огледа у повећању густине супстанце која се постиже додавањем одговарајућих средстава за згушњавање и гелирање као што су гума, акрилни полимери, полистирени и сл. Додавањем ових супстанци настаје получврста формулација чије су карактеристике дуже вријеме горења и већа продукција топлотне енергије. Такође посједују изражену могућност заљепљивања на мјесту контакта. Међу познатијим солидификованим запаљивим пиротехничким смјешама се налази смјеша позната под називом напалм. Састав напалма представља

смјеша алуминијумског сапуна нафтенске и палмитинске киселине и бензина. Додавањем 12% праха ових сапуна у бензин настаје густа маса која старењем постаје жилава и љепљива. Даљим развојем произведена је материја под називом напалм Б који је представљао смјешу 50% полистирена, 25% бензина и 25% бензена. Напалм Б у односу на напалм је показао дуже вријеме горења, већу количину емитоване топлоте и боље карактеристике љепљења.

Чврсте запаљиве пиротехничке материје се дијеле на термитне, чврсте пирофорне и материје на основи секундарних експлозива. Термитне материје су детаљније приказане у претходном поглављу (класификација секундарних експлозива).

Чврсте пирофорне материје посједују особину паљења у контакту са ваздухом или водом. Представници ове групе пиротехничких материја су поједини метали у форми праха као што су цирконијум, титанијум. У смјеши са одговарајућим везивним средствима смањује се ниво пирофорности металних прахова те је могућа њихова употреба. Конструкција уређаја са чврстим пирофорним материјама је изведена на начин да се у централном дијелу налази секундарни експлозив који након активирања распршује ситне дијелове пирофорне смјеше металног праха и везива у свим правцима који се након контакта са ваздухом запале. Као везивна средства се користе невулканизирани природни каучук, тефлон и флексибилни полиестер. Карактеристике ових материја се могу приказати на примјеру смјеше цирконијума (97%) и невулканизованог природног каучука (3%). Пречник ширења износи 50 метара, вријеме горења смјеше 3–4 минуте а температура горења ситних дијелова износи око 2000<sup>0</sup>С.



*Слика број 63. Напалм*

Чврсте запаљиве пиротехничке материје на основи секундарних експлозива су смјеше сачињене од одређене количине металних прахова цирконијума, алуминијума, титанијума и секундарних експлозивних састава на бази хексоген/восак или хексоген/

тринитротолуен. Приликом активирања продукују тзв. ватрену куглу у трајању од неколико стотина милисекунди.

У групу пиротехничких материја које продукују звучни ефекат сврставају се пиротехничке смјеше које се користе за израду направа које су првенствено дизајниране да производе интензивну буку као и направе са истовременим звучним и свјетлосним ефектима. У такве направе убрајају се петарде, топовски удари и сл. Претежно се пакују у пластично или картонско кућиште у коме се чврсто сабијено налази погонско средство као што је кордит<sup>175</sup>, бездимни<sup>176</sup> или црни<sup>177</sup> прах. Такође се може налазити и мања количина металног праха у зависности од жељене боје свјетлосног ефекта.



Слика број 64. Различите врсте петарди

#### **2. 3. 4. Класификација енергетских материја на основу хемијског састава (експлозофора)**

Класификација енергетских материја (експлозива) може се вршити на основу присуства одређених молекулских група унутар молекулске структуре енергетске материје. Потребно је имати у виду чињеницу да процеси који се одигравају приликом оксидације (детонација, дефлаграција, горење) енергетских материја представљају распадање међуатомских и међумолекулских хемијских веза уз ослобађање одређене количине енергије у неком времену а што упућује на закључак да егзотермни хемијски процеси оксидације, у суштини, представљају молекуларне појаве, односно, да постоји веза између састава молекуле и експлозивних карактеристика. На основу претходно наведеног, може се извршити класификација енергетских материја на основу присуства различитих молекулских група које посједују експлозивне карактеристике а које су повезане хемијским везама у молекуле и налазе се унутар молекулских структура. У енергетске материје сачињене од молекулских група које посједују експлозивне карактеристике сврставају се једињења азота (нитрати), нитроестри, нитроамини,

<sup>175</sup> Композит који садржи 65% нитроцелулозе и 30% нитроглицерина са 5% мјешавине минералних уља и воска

<sup>176</sup> Бездимни прах /енг. *Smokeless powder*/ колоидни раствор нитроцелулозе у етил-алкохолу

<sup>177</sup> Црни прах (енг. *Gunpowder, black powder*) је смјеша сумпора, дрвеног угља и калијум-нитрата

деривати хлора и перхлорати, азиди, фулминати, азотом богате материје и многе друге. Молекулске групе које посједују експлозивна својства се називају експлозофоре. На основу присуства појединих експлозофора, у молекулама једињења извршена је класификација енергетских материја:

- неорганске и органске материје које садрже нитро-групу ( $-NO_2$ ) и нитроестар групу ( $-ONO_2$ )
- неорганске и органске материје које садрже азидну групу ( $-N=N-; -N=N=N-$ )
- материје које садржи групу халогених органских амина ( $-NX_2$ ,  $X$  = халоген (флуор, хлор, јод, бром))
- материје које садрже имино групу ( $-C=N-$ ) и фулминатну групу ( $-C=N-O-$ )
- неорганске и органске материје које садрже хлоратну ( $-OClO_2$ ) и перхлоратну групу ( $-OClO_3$ )
- неорганске и органске материје које садрже пероксидну ( $-O-O-$ ) и озонидну групу ( $-O-O-O-$ )
- материје које садрже ацетилдну групу ( $-C\equiv C-$ ) и металне ацетилде ( $MC\equiv CH$  и  $MC\equiv CM$ ,  $M$  = метал)
- материје које садрже металну везу са угљиком (органометали) ( $M-C$ ).

Такође је предложена класификација енергетских материја на основу функционалне улоге појединих молекулских група:

- носиоци оксиданса ( $-ONO_2$ ,  $-NO_2$ ,  $-NF_2$ )
- носиоци горива ( $-NH_2$ ,  $-NH$ )
- комбиновани носиоци оксиданса и горива ( $-ONC$  (фулминати),  $-NH-NO_2$  (нитрамини))
- носиоци енергије хемијске везе ( $-N_3$  (азиди)) који повећавају енергију детонационог процеса усљед прекида високоенергетских хемијских веза у структури.

### **2. 3. 5. Класификација енергетских материја на основу молекулске структуре**

Класификација енергетских материја на основу молекулске структуре врши се на органске<sup>178</sup> и неорганске материје<sup>179</sup>. Органске материје се даље класификују као ароматичне<sup>180</sup> и алифатске<sup>181</sup>. Ароматична једињења могу бити моноциклична (са једним прстеном) и полициклична (са више прстенова) док се алифатска дијеле на једињења са отвореним ланцем (линеарна структура) и једињења са цикличном структуром (слика 65).

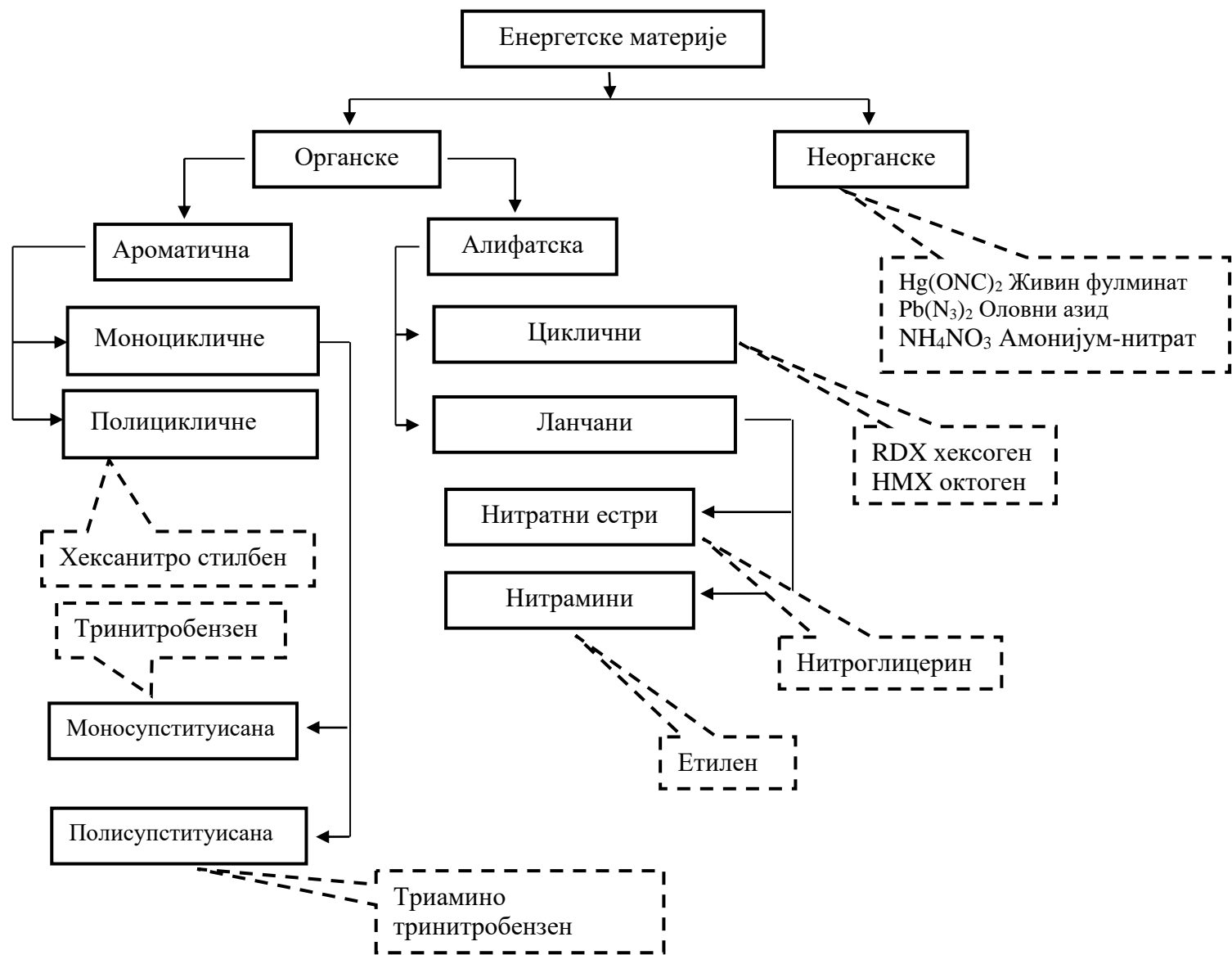
---

<sup>178</sup> Органске материје (супстанце, једињења, молекуле) назив су за сва једињења која садрже угљик. Изузетак представљају угљен-моноксид, угљен-диоксид, угљена киселина и њене соли карбонати, цијанди, метални карбонили те поједине алотропске модификације угљика као што су дијамант и графит.

<sup>179</sup> Неорганске материје (једињења, супстанце, молекуле) назив су за сва једињења која не садрже угљик, односно нису органска једињења.

<sup>180</sup> Ароматична једињења су органске материје које имају цикличну (прстенасту) структуру и посједују одређене карактеристике.

<sup>181</sup> Алифатска једињења су органске материје које имају ацикличну (линеарну) или цикличну (прстенасту) структуру и неароматске карактеристике. Ароматичност је хемијска особина којом коњуговани прстен незасићених веза, слободних парова или празних орбитала показује већи степен стабилности. Коњуговани систем је група везаних р-орбитала са делокализованим електронима у једињењима са наизмјеничним једноструким и вишеструким везама.



Слика број 65. Класификација енергетских материја на основу хемијске структуре

### 3. КАРАКТЕРИСТИКЕ ЕНЕРГЕТСКИХ МАТЕРИЈА

Физичко-хемијске карактеристике енергетских материјала имају највећи значај када се говори о могућности употребе у одређеној области. Са друге стране, развој савремене науке је омогућио дизајнирање енергетских материјала одговарајућих особина а према захтијеваним карактеристикама које се разликују у зависности од намјене. Такође, у великој мјери дефинисање специфичних особина енергетских материја зависи од врсте процеса разлагања енергетских материја.

Уопштено, да би се неко хемијско једињење могло употријебити у смислу енергетског једињења без обзира на намјену, потребно је извршити процјену датог хемијског једињења као потенцијалне експлозивне материје. Хемијско једињење или смјеша супстанци у метастабилном стању, која је способна за брзе хемијске реакције, без потребе за додатним реакционим партнерима (нпр. атмосферским кисеоником) може се процијенити као потенцијална експлозивна материја кориштењем одговарајућег критерија. Критериј на основу кога се врши класификација у смислу потенцијалне експлозивне материје се назива Бертелот-Ротова вриједност (енг. *Berthelot-Rot value*,  $B_R$ ). Израчунавање  $B_R$  вриједности се врши помоћу емпиријског израза [20]:

$$B_R [kJm^{-3}] = \rho_0^2 V_0 Q_0 \quad (2)$$

$\rho_0 [kgm^{-3}]$  – густина потенцијалног експлозива

$V_0 [m^3kg]$  – запремина гасовитих продуката

$Q_v [kJkg^{-1}]$  – топлота експлозије.

Референтну вриједност представља вриједност  $B_R$  за Опауерову со (енг. *Oppauer salt*)<sup>182</sup> која износи  $1193 \text{ kJm}^{-3}$ . Материје и смјеше чија  $B_R$  вриједност је једнака или већа од вриједности за  $B_{R, \text{ОПАУЕР СО}}$  класификује се као потенцијално експлозивна материја.

*Табела број 34. Бертелот-Ротова вриједност за поједине експлозивне материје [20]*

---

<sup>182</sup> Опауерова со, смјеса 55%  $NH_4NO_3$ , 45%  $(NH_4)_2SO_4$ . 21. 9. 1921. у мјесту Опау (Лудвигсхафен на Рајни, Хајделберг) догодиле су се двије експлозије у размаку од пола секунде. У силосу се налазило 4500 тона ђубрива. Експлодирало је око 10% при чему је настао кратер величине 90 x 125 метара, 19 метара дубине. Приликом експлозије, дошло је до великог броја жртава (500–600 погинулих око 2000 повријеђених). Звук детонације се чуо на око 300 километара.

Експлозивна материја	$\rho_0$ ( $kgm^{-3}$ )	$V_0$ ( $m^{-3}kg$ )	$Q_V$ ( $kJkg^{-1}$ )	$B_R$ ( $kJm^{-3}$ )
Хексоген, <i>HMX</i>	1,96	0,927	5253	18707
Нитрогванидин, <i>NG</i>	1,60	0,782	6218	12448
Тринитротолуен, <i>TNT</i>	1,65	0,975	3612	9588
Црни барут	1,87	0,274	3040	2913
Хидразин	1,00	1,993	1785	3558
Опауерова со	1,10	0,920	1072	1193

Потенцијална експлозивна материја може бити неопасна или опасна са становишта одигравања експлозивног процеса, односно, осјетљивости на иницирање помоћу вањског импулса. Критериј за дефинисање материја које могу бити опасне са становишта експлозије се врши помоћу тестова за одређивање сљедећих карактеристика:

- осјетљивост на удар (механички) (енг. *sensitivity to impact*)
- осјетљивост на трење (енг. *friction sensitivity*)
- осјетљивост на топлоту (енг. *thermal sensitivity*).

Гранична вриједност за осјетљивост удара износи 39 *J* док за фрикциону осјетљивост гранична вриједност износи 353 *N*. Осјетљивост на топлоту се одређује на основу резултата теста загријавања у затвореном простору и теста паљења у затвореном простору (тзв. Коенен теста). Ако приликом испитивања материја и смјеша помоћу наведених тестова само један резултат показује позитивну вриједност, испитивана материја или смјеша се класификује као опасна материја са становишта експлозије.

Препоручену методу испитивања осјетљивости на удар (механички) представља тзв. БАМ Фалхамер (енг. *BAM Fallhammera*) тест метода. За извођење ове методе користи се уређај са падајућим теговима чију је модификацију извршио Њемачки федерални завод за испитивање материјала (њем. *Bundesanstalt für Materialprüfung, BAM*) у циљу боље поновљивости мјерења. Овом методом се одређује тзв. критична енергија удара чија вриједност представља максималну вриједност енергије (изражене у џулима, *J*)

приликом које не долази до иницирања експлозива приликом извођења серије од шест проба [89].

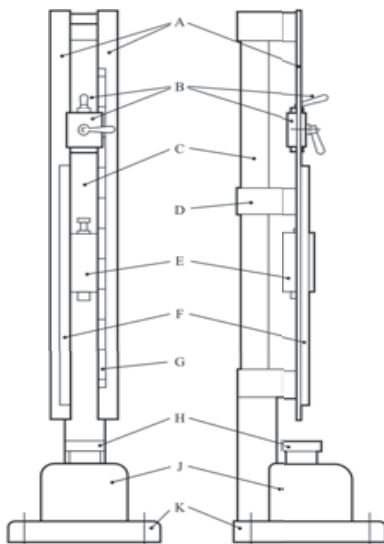
Принцип рада уређаја се заснива на слободном паду тегова различите масе са различитих висина а што одговара одређеној вриједности енергије удара. Користе се следећи тегови и висине пада:

- тег масе 1 kg, висина пада 10, 20, 30, 40, 50 cm (што одговара енергији удара 1–5 J)
- тег масе 5 kg, висина пада 5, 20, 30, 40, 50, 60 cm (што одговара енергији удара 7,5-30 J)
- тег масе 10 kg, висина пада 35, 40, 50 cm (што одговара енергији удара 35–50 J)

Табела број 35. Вриједност енергије удара за поједине експлозивне материје [89]

Супстанца	Критична енергија удара (J)
Етил нитрат (течни)	1
Хидразин перхлорат (сухи)	2
Оловни азид (сухи)	2.5
Оловни стифнат	5
Манитол хексанитрат (сухи)	1
Живин фулминат (сухи)	1
Нитрогванидин (течни)	1
<i>PETN</i> (сухи)	3
<i>PETN</i> /восак (95/5)	3
<i>PETN</i> /восак (93/7)	5
<i>PETN</i> /восак (90/10)	4
<i>PETN</i> /восак (75/25)	5
<i>PETN</i> /восак (85/15)	3
<i>RDX</i> /восак (74/26)	30
<i>RDX</i> (сухи)	5
<i>Tetryl</i> (сухи)	4

На слици 66 је шематски приказан БАМ Фалхајмер уређај за испитивање осјетљивости на удар (механичка).

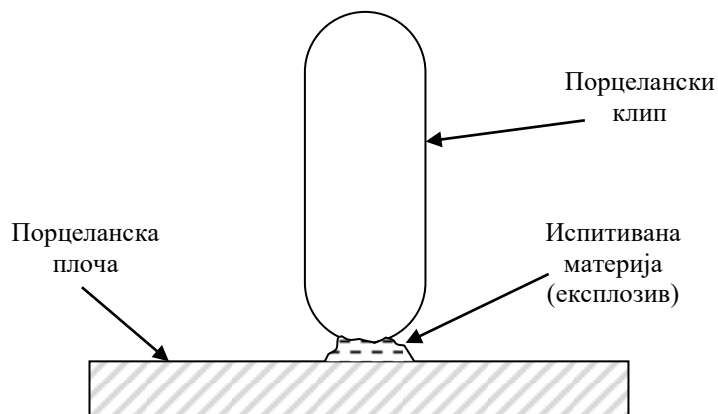


Слика број 66. Шематски приказ БАМ Фалхајмер уређаја за испитивање осјетљивости на удар (механичка) (A) водилице; (B) уређај за отпуштање тега; (C) шина; (D) средњи попречни комад; (E) падајући тег; (F) зупчаста летва; (G) мјерна скала; (H) наковањ 100 мм пречник × 70 мм; (J) челични блок 230 × 250 × 200 мм; (K) основа 450 × 450 × 60 мм; [89]

Уређај за испитивање осјетљивости на трење представља БАМ фрикциони уређај или Јулијус Питерс фрикциони уређај (енг. *BAM friction apparatus or Julius Peters friction apparatus*).

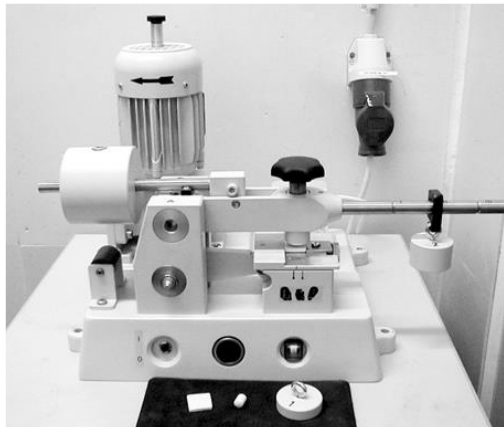
БАМ фрикциони уређај за одређивање осјетљивости на трење<sup>183</sup> се састоји од порцеланске плоче (25×25×5 милиметара) са грубом површином на коју се поставља испитивана материја (≈10 милиграм) и статичког порцуланског клипа (слика 67).

<sup>183</sup> БАМ метода је развијена 1955. године од стране Њемачког савезног института за истраживање материјала и лабораторија за испитивање.

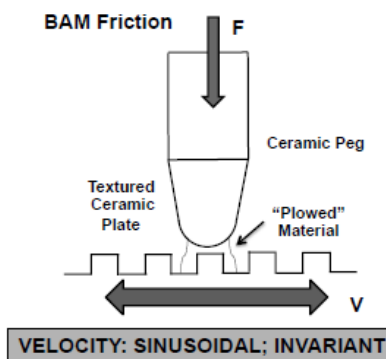


Слика број 67. Порцеланска плоча и статички порцелански клип

Сила притиска на испитивану материју је одређена помоћу полуге на којој се налазе тега и механизам на врху статичког порцеланског клипа. Порцеланска плоча на којој се налази узорак се равномерно покреће у смјеровима супротног знака (тзв. „лијево–десно“) амплитуде кретања 10 милиметара брзином од 10 центиметара у секунди (слика 68).



а)



б)

Слика број 68. а) БАМ фрикциони уређај; б) шематски приказ начина функционисања БАМ фрикционог уређаја ( $F$  - сила; *ceramic peg* – керамички клин; *textured ceramic plate* - текстурирана керамичка плоча; *plowed material* – испитивани материјал ) [90]

Користе се тегови различитих тежина (тзв. број тега) и удаљености (позиција тега на мјерној летви) који генеришу одређену силу (табела 36).

Табела број 36. Вриједности нормалне силе у односу на број тега и позицију на мјерној летви

Број тега	Вриједности нормалне силе (њутн, <i>N</i> )					
	Позиција тега на мјерној летви					
	I	II	III	IV	V	VI
1	4.9	5.9	6.9	7.8	8.8	9.8
2	9.8	11.8	13.7	15.7	17.7	19.6
3	19.6	23.5	27.5	31.4	35.3	39.2
4	29.4	35.3	41.2	47.1	52.9	58.9
5	39.2	47.1	54.9	62.8	70.6	78.5
6	58.9	70.6	82.4	94.2	105.9	117.7
7	78.5	94.2	109.8	125.6	143	156.9
8	117.7	143	164.8	188.4	211.9	235.4
9	176.6	211.9	247.2	282.5	317.8	353.2

Вриједности фрикционе осјетљивости се одређује појавом хемијске реакције за дати број тега и његову позицију.

Табела број 37. Вриједности осјетљивости на трење измјерен БАМ методом

	Супстанца	Осјетљивост на трење ( <i>N</i> )
Примарни експлозиви	Оловни азид	0,1-1
	<i>PETN</i>	>60
Секундарни експлозиви	Октоген ( <i>HMX</i> )	120
	Хексоген ( <i>RDX</i> )	120
	Тринитротолуен ( <i>TNT</i> )	>353
	Нитрогванидин	>353
	<i>TATB</i>	>353

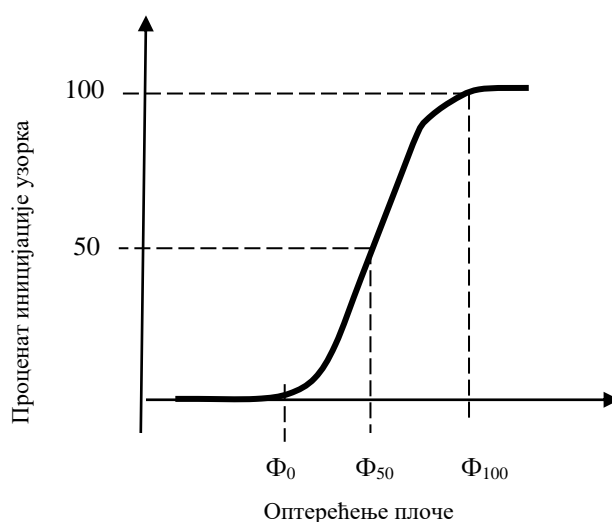
На основу шест узастопно поновљених мјерења за поједине услове испитивања израчунава се проценат иницирања:

$$I = \frac{N_{inicirano}}{N_{ukupno}} \times 100 \quad (3)$$

$N_{inicirano}$  – број проба код којих је дошло до иницијације узорка,

$N_{ukupno}$  – укупан број изведених проба

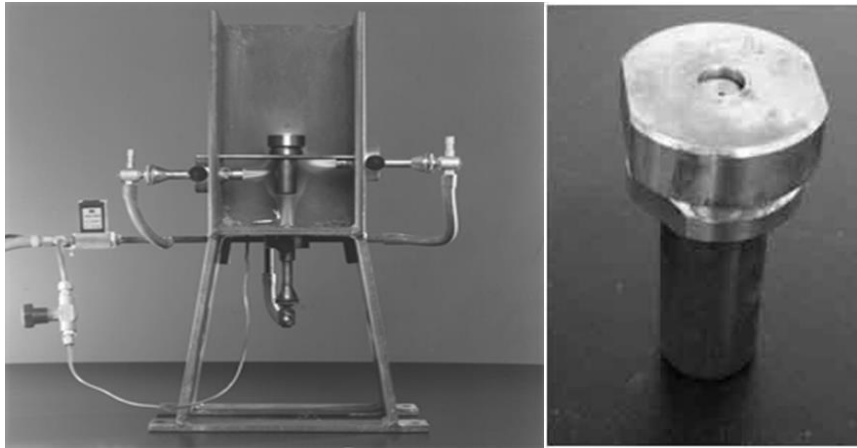
Израчунате вриједности се графички приказују помоћу криве процента иницирања у зависности од оптерећења на порцуланску плочу (слика 69).



Слика број 69. Крива процента иницирања у зависности од оптерећења на порцуланску плочу ( $\Phi_0$  – максимална сила притиска при чему у 0% проба долази до иницирања експлозије;  $\Phi_{50}$  – максимална сила притиска при чему у 50% проба долази до иницирања експлозије;  $\Phi_{100}$  – максимална сила притиска при чему у 100% проба долази до иницирања експлозије)

Класификација потенцијално опасне експлозивне материје на основу осјетљивости на топлоту се врши путем теста загријавања у затвореном простору (тзв. Коенен тест) и теста паљења у затвореном простору.

Коенен тест се проводи на начин да се узорак испитиване материје смјешта у тестну цијев са дводијелним затварајућим елементом а затим загријава помоћу отвореног пламена (плински горионик) (слика 70).

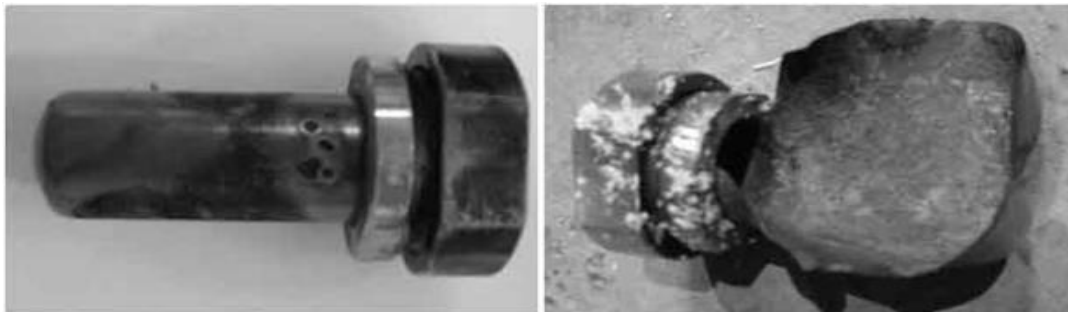


а)

б)

Слика број 70. Уређај за извођење Коенен теста: а) изглед уређаја; б) дводјелни елемент

Након загријавања и одигравања експлозивног процеса или процеса горења на основу механичког утицаја на тестну цијев врши се класификација испитиване супстанце (слика 71).



а)

б)



в)

г)

Слика број 71. Механички утицај процеса декомпозиције енергетске материје на тестну цијев и класификација испитиване супстанце у односу на механички утицај на тестну цијев ((а) - класа „А” ; (б) – класа „Д” ; (в) – класа „Е” ; (г) – класа „Ф”)

Класификација енергетских материја према резултатима Коененовог теста се врши на основу физичке промјене тестне цијеви. Класе енергетских материја са описом утицаја на тестну цијев су приказане у табели 38.

Табела број 38. Класификација енергетских материја према Коенен тесту [89]

Класа енергетске материје	Опис промјене тестне цијеви
„О”	Тестна цијев непромијењена
„А”	Дно тестне цијеви избочено
„Б”	Дно и зидови тестне цијеви избочено
„Ц”	Дно тестне цијеви одвојено у једном комаду
„Д”	Зид тестне цијеви одвојен, у једном комаду
„Е”	Тестна цијев раздвојена у два фрагмента
„Ф”	Тестна цијев раздвојена у три или више претежно већих фрагмената
„Г”	Тестна цијев је раздвојена у више мањих фрагмената, затварајући елемент неоштећен
„Х”	Тестна цијев фрагментирана у већи број мањих фрагмената, затварајући елемент избочен или фрагментиран

Класе енергетске материје од „О” до „Е” се класификују као неексплозивне а класе од „Ф” до „Х” се класификују као експлозивне.

Процедура провођења теста паљења у затвореном простору („вријеме/притисак” тест) врши се помоћу одговарајућег уређаја који је састављен од коморе у којој се врши паљење испитиване супстанце и уређаја за мјерење притиска. Узорак испитиване супстанце или смјеше (5 g) постави се унутар уређај на начин да се обезбиједи контакт са системом за паљење. Након иницирања (паљења) испитиване материје врши се праћење времена потребног да притисак у комори порасте са 690 kPa на 2070 kPa. Изводе се три мјерења при чему се за класификацију користи најкраћи измјерени временски интервал. Материја показује позитиван (+) резултат ако је вријеме пораста вриједности манометарског притиска од 690 kPa до 2070 kPa мање од 30 милисекунди

што представља способност испитиване материје да брзо сагоријева (дефлаграција). Ако се не достигне манометарски притисак од 2070 kPa или је трајање временског интервала једнако или дуже од 30 милисекунди, резултат се сматра негативним (-), односно, материја не показује способност дефлаграције или је сагоријевање споро.

Табела број 39. Класификација енергетских материја према „вријеме/притисак” тесту [89]

Супстанца	Максимални притисак (kPa)	Вријеме интервала пораста притиска од 690 до 2070 kPa (ms)	Резултат
Амонијум-нитрат (грануле високе густине)	< 2070	-	-
Амонијум-нитрат (грануле ниске густине)	< 2070	-	-
Амонијум-перхлорат (гранулација 2 $\mu$ m)	> 2070	5	+
Амонијум-перхлорат (гранулација 30 $\mu$ m)	> 2070	15	+
Баријум-азид	> 2070	< 5	+
Гванидин нитрат	> 2070	606	-
Изобутил-нитрит	> 2070	80	-
Изопропил-нитрат	> 2070	10	+
Нитрогванидин	> 2070	400	-
Пикринска киселина	> 2070	500	-
Натријум-пикрамат	> 2070	15	+
Уреа-нитрат	> 2070	400	-

### 3. 1. Основне карактеристике

Уопштено, карактеристике енергетских материја се могу подијелити у двије велике групе. Прву групу представљају основне карактеристике без обзира на подручје примјене и врсту процеса разлагања (односе се на примарне, секундарне, терцијарне експлозиве, пропеланте и пиротехничке материје). Другу групу особина, у суштини,

представљају особине енергетских материја карактеристичне за дату област примјене и одређени процес разлагања.

У важне основне карактеристике енергетских материја, без обзира на подручје примјене, сврставају се:

- компатибилност и стабилност (енг. *compatibility and stability*)
- равнотежа кисеоника (енг. *oxygen balance*)
- осјетљивост (енг. *sensitivity*)
- топлота формирања (енг. *heat of formation*)
- топлота експлозије и гасовитих продуката (енг. *heat of explosion and gases evolved*).

### **3. 1. 1. Компатибилност и стабилност**

Са аспекта функционалности и поузданости употребе, безбједности руковања, безбједног транспорта и могућности складиштења потребних количина, компатибилност и стабилност енергетских материја има велики значај. Најчешће енергетски материјали представљају садржај различитих уређаја или направа и као такви се употребљавају, транспортују и складиште.

Компатибилност се може дефинисати као могућност складиштења енергетских материјала без појаве међусобних хемијских реакција између самих компоненти енергетских материјала или хемијских реакција између енергетских материја и материјала са којима се налазе у непосредном контакту. Интеракција између појединих састојака енергетских материја као и између састојака и других материјала са којима су у непосредном контакту може да доведе до промјена физичко-хемијских и других карактеристика енергетских материја.

Једну од важнијих карактеристика енергетских материја представља стабилност која се дефинише као могућност складиштења у неком временском периоду без промјене физичко-хемијских карактеристика. На стабилност могу да утичу различити фактори као што су:

- температура складиштења
- хемијски састав
- изложеност сунчевом зрачењу
- електростатичко пражњење.

Утврђено је да се процес термичке разградње експлозивних материја одвија на температурама које су далеко ниже у односу на температуре при којој долази до спонтане експлозије. Сматра се да војни експлозиви имају високу стабилност која се налази унутар температурног интервала од  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ . Даље повећање температуре доводи до повећања брзине распада и смањења стабилности. Већина експлозивних материја постаје опасно нестабилна на температурама изнад  $+70^{\circ}\text{C}$ . Поједине експлозофоре као што су нитро-група ( $-NO_2$ ), нитроестарска група ( $-ONO_2$ ) и азидна група ( $-N=N-$ ;  $-N=N=N-$ ) карактерише повећање степена тзв. унутрашњег напрезања, односно, напрезања на молекулском нивоу (молекулска нестабилност) која може да доведе до декомпозиције материје и на стандардним температурама. Изложеност ултраљубичастом сунчевом зрачењу може да изазове распад енергетских материја а, самим тим, и до смањења стабилности (примарни експлозиви са нитро-групом). Такође, у одређеним условима статичко или електростатичко пражњење може да доведе до појаве експлозије. Уопштено посматрано, већина секундарних енергетских материја које су у употреби налазе се у чврстом стању и посједују високу топлотну стабилност на температурама које су мање од температура топљења. У течном (растопљеном) стању показују изразиту нестабилност. Киселине, базе, органске базе, јаке оксидационе и редукционе материје показују низак ниво компатибилности са секундарним експлозивима. Већина примарних експлозива посједује одговарајућу термичку стабилност. Претпоставља се да присуство влаге може имати утицај на стабилност примарних експлозива. Појединачно, састојци пиротехничких формулација показују захтијевани ниво стабилности. Због могућих интеракција готових смјеша са присутним испарењима гуме, пластике и сл. те присуства влаге нарочито ако су присутни слободни метали долази до значајног нарушавања стабилности пиротехничких материја. Постизање задовољавајућег нивоа компатибилности и стабилности пропеланата за муницију се повећава додавањем одговарајућих материја (стабилизатора). Испитивања су показала

да ракетни пропеланти посједују већи ниво стабилности у односу на пропеланте за муницију.

Општеприхваћени начин испитивања компатибилности и стабилности се врши помоћу теста стабилности у вакууму (енг. *vacuum stability test, VST*) и топлотног теста (енг. *Heat Test*). Развијено је више техника теста стабилности у вакууму [91].

Међу првим тестовима стабилности у вакууму развијен је тест који се проводи на начин да се испитивани узорак енергетског материјала (маса узорка секундарног експлозива износи  $5,0 \pm 0,01$  g, маса узорка примарних експлозива износи  $1,0 \pm 0,01$  g) постави у стаклену епрувету из које се евакуишу гасови (вакуумира). Након тога, испитна стаклена епрувета се подвргне константној температури (помоћу термостата на  $100^{\circ}$  или  $120^{\circ}\text{C}$ ) у трајању од 40 сати. За вријеме трајања испитивања помоћу одговарајуће опреме врши се мјерење запремине насталих гасова (слика 72). Већина експлозивних материја или експлозивних смјеша развија мање од  $1\text{cm}^3$  гаса по 1g испитиване материје или смјеше у експерименталним условима (температура и вријеме експеримента) [92]. Примјеном манометра који региструје промјену притиска у одређеној запремини унутар које се налази испитивани узорак изложен константној температури у одређеном временском периоду развијена је тзв. изотермна манометријска метода. Овом методом је могуће вршити испитивања кинетике термичке разградње енергетских материјала. Подаци добијени овом методом кореспондирају неаутокатализованим фазама термичког разлагања датог материјала [91].

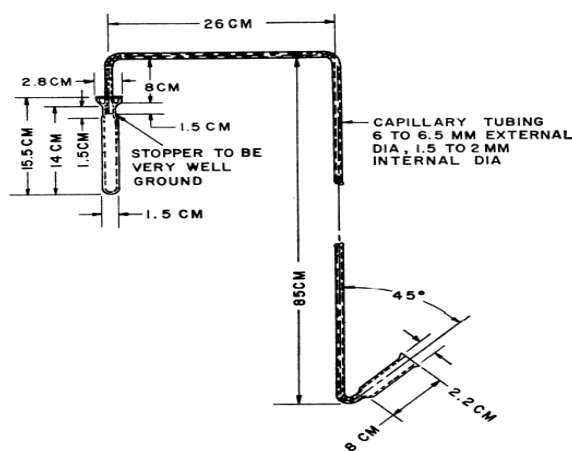


FIGURE 1. Apparatus for vacuum stability test.

Слика број 72. Капилара за мјерење количине ослобођеног гаса [91]

Модификовани изотермни манометарски тест под називом „STABIL” се проводи помоћу уређаја који је конструисан кориштењем електронских претварача притиска у вриједности запремине гасовитих продуката насталих термалном декомпозицијом. Омогућено је континуирано праћење промјене запремине насталих гасовитих продуката, прикупљање, архивирање и анализе података уз помоћ рачунара и одговарајућег софтвера.

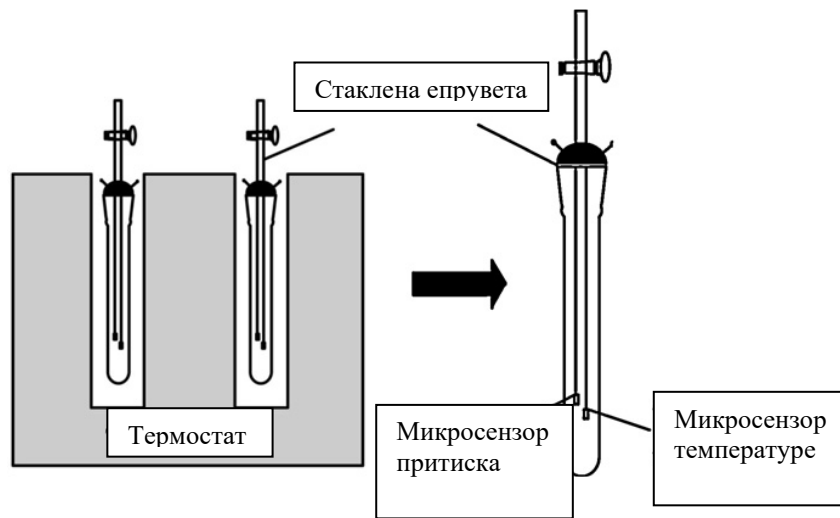


Слика број 73. Уређај за провођење теста стабилности „STABIL”

Као новија метода испитивања стабилности енергетских материја развијена је метода под називом динамички вакуумски тест стабилности (енг. *Dynamic Vacuum Stability Test, DVST*). Стаклене епрувете са узорком (вакуумирана) у којој се налазе микросензори притиска и температуре се поставља у термостат при чему гасовити продукти термичког распада енергетске материје узрокују промјену притиска и температуре у константној запремини (стакленој епрувети). Промјене притиска и температуре се путем сензора региструју директно и у реалном времену. Прикупљени подаци се користе за [93]:

- одређивање карактеристике термичког разлагања узорка према тренду криве притисак/вријеме
- одређивање кинетичких параметара и константе брзине реакције термичког разлагања испитиваног узорка
- процјену стабилности и компатибилности узорка према запремини еволуираног гаса у одређеном временском периоду

- предвиђање трајања складиштења узорка помоћу корелације брзине реакције и температуре.



Слика број 74. Шематски приказ уређаја за провођење динамичког вакуумског теста стабилности (DVST) [93]

Опрема за извођење теста стабилности у вакууму такође се користи за одређивање компатибилности енергетских материја са другим материјама у контакту (полимерна везива, материјал кориштен за амбалажу и слично). Експериментални услови провођења испитивања компатибилности су идентични условима испитивања стабилности. Разлика се огледа у томе што се приликом испитивања компатибилности врши мјерење насталог гаса засебно за енергетску материју, за материјал са којим се енергетска супстанца налази у контакту и смјешу испитиваних супстанци (енергетски и контактни материјал).

Волумен насталог гаса се израчунава према изразу:

$$V=C-(A+B) \quad (4)$$

$C$  – волумен насталог гаса из смјеше;

$A$  – волумен насталог гаса енергетске материје;

$B$  – волумен насталог гаса контактеног материјала.

Сматра се да, ако испитивана смјеша у датим експерименталним условима развија до  $3 \text{ cm}^3$  гаса по  $1 \text{ g}$  узорка, компатибилност испитиване смјеше је задовољавајућа. За вриједности већ од  $5 \text{ cm}^3$  насталог гаса сматра се да су материје у смјеши, односно контакту некомпатибилне. За опсег вриједности од 3 до  $5 \text{ cm}^3$  насталог гаса сматра се да је компатибилност несигурна (непоуздана).

Топлотни тест представља општеприхваћену методу испитивања стабилности енергетске материје на основу чијих резултата се може извршити процјена стабилности испитиване материје. Поступак провођења испитивања је дјелимично сличан тесту стабилности у вакууму. Засебно припремљени узорци енергетске смјеше, експлозивне компоненте и везивне материје ( $0,6 \text{ g}$ ) загријавају се на  $100^\circ\text{C}$  у два циклуса у трајању од по 48 сати. Губитак већи од 5% масе испитиваног узорка или појаве експлозије након 100 сати, указује на значајно повећање нестабилности испитиване материје.

### **3. 1. 2. Равнотежа кисеоника (биланс кисеоника)**

Једна од најважнијих карактеристика на основу које се може вршити процјена потенцијала енергетских материја у смислу експлозивности или у улози оксиданаса назива се равнотежа кисеоника. Потребно је нагласити да процеси који се одигравају приликом употребе енергетских материја (детонација, дефлаграција) у суштини су егзотермни процеси оксидације. Потребне количине кисеоника за одигравање ових процеса се налазе или унутар молекулске структуре енергетске материје или унутар молекулске структуре појединачних компоненти енергетске смјеше. Познавање биланса кисеоника у знатној мјери одређује ефикасност саме енергетске материје (ако се користи као једнокомпонентна), односно, неопходност присуства друге материје у улози оксиданса у енергетским смјесама (ако се користи као вишекомпонентна) са циљем максималног искориштења енергетског потенцијала кориштене енергетске материје.

Равнотежа кисеоника представља количину кисеоника који преостане након оксидације водоника, угљика и метала у воду, угљен-диоксид и метални оксид. Када је након ових реакција присутан вишак неизреагованог кисеоника, тада се говори о позитивном билансу кисеоника, а у случају када је сав кисеоник потрошен и остане вишак горива, тада се говори о негативном билансу кисеоника. У случају да

експлозивна молекула садржи кисеоника тачно колико треба да се цијела количина водика, угљика и метала оксидира при чему не преостаје вишак горива и кисеоника, тада се говори о нултом билансу кисеоника. Израчунавање биланса кисеоника енергетских материја чија је општа емпиријска формула  $C_aH_bN_cO_d$  врши се помоћу израза:

$$OB, \% = \frac{\left(d - 2a - \frac{b}{2}\right)}{M} \times 1600 \quad (5)$$

$d$  – број атома кисеоник,  $a$  – број атома угљика,  $b$  – број атома водоника,  $M$  – молекулска маса енергетске материје

и представља постотак кисеоника потребног за потпуну оксидацију угљика у угљендиоксид ( $C \rightarrow CO_2$ ) и водоника у воду ( $H \rightarrow H_2O$ ). Ако су у енергетској материји присутни и метални атоми, израз за израчунавање биланса кисеоника има облик:

$$OB, \% = \frac{\left(d - 2a - \frac{b}{2} - n\right)}{M} \times 1600 \quad (6)$$

$n$  – број атома метала.

Количина кисеоника у енергетским материјама се може изразити и помоћу коефицијента кисеоника који представља однос између количине кисеоника у енергетској материји и количине кисеоника потребне за потпуну оксидацију њених горивих елемената:

$$K_o, \% = \frac{d}{\left(2b + \frac{b}{2}\right)} \times 100 \quad (7)$$

Атоми кисеоника посједују различит енергетски потенцијал у зависности од свог положаја унутар структуре молекуле, односно, у процесу експлозије, осим ослобођеног кисеоника у облику атома који се у цијелости потроши на оксидацију горивих

елемената. Кисеоник који се налази у саставу појединих функционалних група не придонosi укупној суми ослобођене енергије у току процеса оксидације.<sup>184</sup> Одређене информације везане за биланс кисеоника дате експлозивне материје могу се уочити посматрањем настале количине дима након експлозије. Густо црни дим настао усљед експлозије указује на експлозивну материју са великим негативним билансом кисеоника, односно, настанком веће количине неоксидираних угљикових честица. Са друге стране, ако прорачун кисеониковог биланса показује велике негативне вриједности, може се претпоставити да ће се приликом експлозије стварати веће количине отровних гасова као што је угљен-моноксид. На основу познавања биланса кисеоника, могуће је одредити удио појединих компоненти енергетске смјеше са жељеним билансом кисеоника. У табели 40 су приказане вриједности биланса кисеоника за поједине примарне, секундарне и терцијарне експлозивне материје.

Табела број 40. Приказ вриједности биланса кисеоника за поједине примарне, секундарне и терцијарне експлозиве [13]

		Назив	Емпиријска формула	Биланс кисеоника (%)
Примарни експлозивни		Диазидинитрофенол ( <i>DDNP</i> )	$C_6H_2(NO_2)_2O$	-61,00
		Оловни стифнат-монохидрат	$C_6HN_3O_8Pb \times H_2O$	-22,00
		Живин фулминат	$Hg(ONC)_2$	-11,20
		Оловни азид	$Pb(N_3)_2$	-
		Базични оловни азид	$3Pb(N_3)_2 \times 2PbO$	-2,85
Секундарни експлозивни		Тетранитро-дибензо-1,3а,4,4а-тетраазапентален, <i>TACOT</i>	$(C_6H_2)_2(NO_2)_4N_4$	-74,20
		2,4,6 тринитротолуен, <i>TNT</i>	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	-74,00
		2,2',4,4',6,6' хексанитростилбен, <i>HNS</i>	$(C_6H_2)_2(CH)_2(NO_2)_6$	-68,00
		Триетилен гликол динитрат, <i>TEGDN</i>	$(CH_2)_6(ONO_2)_2O_2$	-66,70
		1,3,5-тринитробензен, <i>TNB</i>	$C_6H_3(NO_2)_3$	-56,3
	1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензен,	$C_6(NH_2)_3(NO_2)_3$	-56,00	

<sup>184</sup> У току одигравања процеса експлозије долази до више различитих хемијских реакција на молекулском и атомском нивоу које су праћене ослобађањем или трошењем енергије а што зависи од структуре и састава молекула.

TATB			
	1,3-диамино-2,4,6-тринитробензен, <i>DATB</i>	$C_6H(NH_2)_3(NO_2)_3$	-55,80
	2,4,6-тринитрофенил метил нитамин, <i>Tetryl</i>	$C_6H_2(NO_2)_3NNO_2CH_3$	-47,39
	2,4,6-тринитрофенол, <i>Pikrinska kiselina</i>	$C_6H_2(NO)_3OH$	-45,40
	Диетилен-гликол-динитрат, <i>DEGDN</i>	$(CH_2)_4(ONO_2)_2O$	-41,00
	Нитрогванидин, <i>NQ</i>	$HN = CNH_2NHNO_2$	-31,00
	Циклотетраэтилен тетранитрамин, <i>HMX</i>	$(CH_2)_4(NNO_2)_4$	-21,68
	Циклотриметилен тринитрамин, <i>RDX</i>	$(CH_2)_3(NNO_2)_3$	-21,60
	Хексанитрохексазаизовурцинат, <i>CL-20</i>	$(CH)_6(NNO_2)_6$	-10,95
	Пентаэритритол тетранитрат, <i>PETN</i>	$C(CH_2)_4(ONO_2)_4$	-10,30
	Етилен-гликол-динитрат, <i>EGDN</i>	$(CH_2)_2(ONO_2)_2$	0,00
	Нитроглицерин, <i>NG</i>	$C_3H_5(ONO_2)_3$	+3,50
Терцијарни експлозивни	Амонијум-динитрамид, <i>ADN</i>	$NH_4N(NO_2)_2$	+25,80
	Хидразинијум-нитроформат, <i>HNF</i>	$N_2H_5C(NO_2)_3$	+13,00
	Амонијум-нитрат, <i>AN</i>	$NH_4NO_3$	+20,00
	Амонијум-перхлорат, <i>AP</i>	$NH_4ClO_4$	+34,04

### 3. 1. 3. Осјетљивост

Приликом производње, руковања, употребе и складиштења, енергетске материје су изложене различитим вањским утицајима који могу бити узрок детонације или горења. Такође се иницијација („покретање експлозивног процеса”) енергетских материја одвија помоћу вањског почетног импулса. Ниво осјетљивости енергетских материја је кључна карактеристика ове групе материја у смислу одређивања могућности практичне примјене. Карактеристика осјетљивости (eng. *sensitivity*) представља способност енергетских материја да реагују на спољашњи утицај (дејство), односно, способност ширења експлозивног процеса у маси енергетске материје уз појаву сагоријевања или детонације. Потребно је напоменути да не постоји апсолутни показатељ осјетљивости у смислу минималне енергије потребне за покретање експлозивних процеса (иницирање) из разлога веома сложене природе самог феномена иницирања. Подјела осјетљивости енергетских материја се врши на [94]:

- осјетљивост на удар (механички) (eng. *impact sensitivity*)

- осјетљивост на трење (eng. *friction sensitivity*)
- осјетљивост на топлоту (eng. *sensitivity to heat*)
- електростатичка осјетљивост (eng. *electrostatic discharge sensitivity, ESD*)
- осјетљивост на шок (eng. *Shock sensitivity*)
- осјетљивост на ласерски зрак (eng. *Sensitivity to laser beam*).

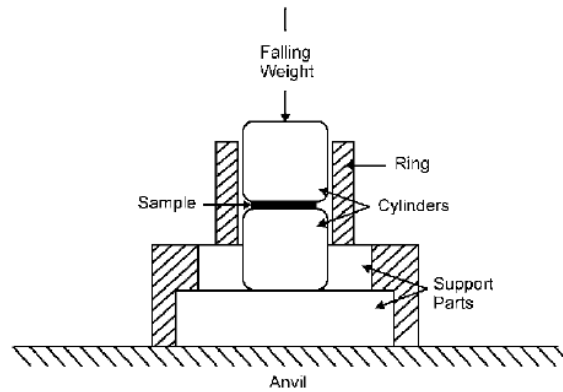
Осјетљивост на механички удар представља способност иницирања енергетске материје путем механичког удара. Дефинише се као висина (удаљеност) на којој се налази, предмет одређене (стандардне) масе који у контакту с испитиваном материјом (ударом) може изазвати експлозивни процес. Испитивање и одређивање осјетљивости на удар чврстих, течних и желатизираних енергетских материја врши се помоћу тзв. „уређаја са падајућим теговима” (eng. *drop hammer apparatus*), односно, методе падајућих тегова (eng. *drop hammer method*). Основни принцип рада уређаја се заснива на томе да се испитивани узорак енергетске материје ( $\approx 40$  милиграма) изложи слободном паду (механички удар) жељезног блока тежине 0,6, 2, 5, 10 килограма са висина у распону од 0,1 до 1 метар [20]. Развијено је више типова уређаја различите конструкције при чему је принцип функционисања исти за све типове уређаја (слика 73)<sup>185</sup> [95].

---

<sup>185</sup> Међу уређајима и методама за испитивање осјетљивости на механички удар (eng. *sensitivity to impact*) су тзв. уређај са падајућим чекићем (eng. *Fall hammer test*) који се веома често користи у Великој Британији и САД. У овим уређајима користе се падајући тегови масе између 0,5 и 5 килограма. Користе се различите варијанте уређаја, у смислу конструкције носача испитиваног узорка. Амерички биро за mine (eng. *US Bureau of Mines, BoM*) употребљава уређај са 0,02 g чврстог експлозива, односно, 0,007 g течног експлозива и масом тега 2 килограма. Минимална висина са које се испушта тег је она на којој минимално један од десет проба изазове активирање испитиване материје. Амерички биро за експлозиве (eng. *US Bureau of Explosives, BoE*) употребљава сличан уређај који се разликује од претходног у маси испитиваног узорка а који износи 0,01 грама за дати уређај. Војни научно-истраживачки центар Пикатини арсенал (eng. *Picatinny Arsenal, PA, US*) користи уређај с челичним матрицама прекривеним месинганим плочама за постављање узорака. За потребе америчке војске Амерички војни центар за истраживање, развој и инжењеринг наоружања (eng. *Armament Research, Development and Engineering Center*) је развио уређај који користи ударну иглу масе 2,5 килограма и масе узока  $35 \pm 2$  милиграма. За сваку висину пада игле врши се 20 проба при чему се висина пада игле на којој не долази до активације у току свих двадесет проба узима као измјерна вриједност.



а)



б)

Слика бој 75. Приказ а) уређаја за мјерење осјетљивости на удар; б) детаљна скица чекића за тестирање (falling weight – падајућа тежина; ring - прстен; sample - узорак; cylinders - цилиндар; support parts – помоћни дијелови ) [20]

Вриједност осјетљивости на удар испитиване енергетске материје може се изражавати на више начина:

- проценат иницијације узорка
- енергија удара
- релативна осјетљивост на удар
- „слика неосјетљивости”.

Одређивање процента иницијације узорка се заснива на серији експерименталних проба (10–25 проба у зависности од усвојене методе) са утегом одговарајуће тежине (1–10 kg) за сваку испитивану висину пада тега. Биљежи се број проба у којима је дошло до иницирања испитиване материје и израчунава процентуални износ проба код којих је дошло до иницијације узорка према изразу:

$$I = \frac{N_{inicirano}}{N_{ukupno}} \times 100 \quad (8)$$

$N_{inicirano}$  – број проба код којих је дошло до иницијације узорка,

$N_{укупно}$  – укупан број изведених проба.

Процедура испитивања се проводи на начин тако да се прво дефинише висина са које се испушта тег (стандардно се узима вриједност од 25 cm) а затим врши серија проба са утегом највеће тежине (10 kg). Када израчунати проценат иницијације израчунат за дату висину и дату тежину утега износи  $\geq 96\%$ , процедура мјерења се наставља са утегом мање масе.

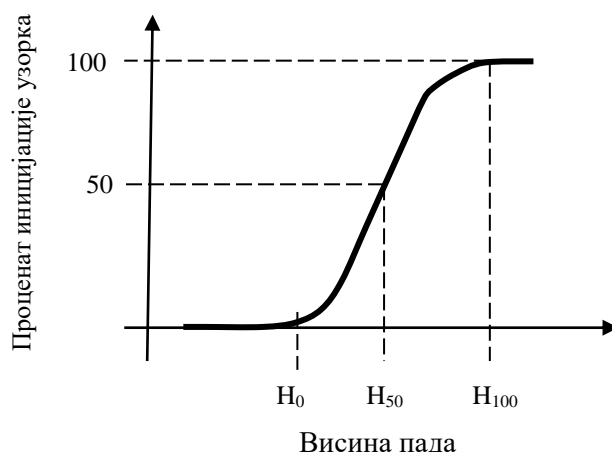
Приказ резултата осјетљивости на удар испитиване материје помоћу процента иницијације узорка за поједине експлозивне материје је приказано у табели 41.

Табела број 41. Осјетљивост на удар појединих експлозивних материја [96]

Ниво осјетљивости	Енергетска материја	Процент иницијације са утегом од 10 kg и висина пада 25 cm
Високоосјетљив	Нитроглицерин, пентрит	100
Повећана осјетљивост	Хексоген, октоген	72–80
Средња осјетљивост	Тетрил	44–52
Ниска осјетљивост	Тринитротолуен	4–8
Неосјетљив	Амонијум-нитрат	0

Такође се на основу сличне експерименталне процедуре (шест проба за сваку висину пада тега константне масе) врши графички приказ зависности између процента иницирања узорка и висине пада тега константне масе. Графички приказ се изводи помоћу тзв. криве осјетљивости на удар (слика 76). На основу експерименталних резултата, осјетљивост се приказује као вриједности:

- $H_0$  – максимална висина пада тега при чему у 0% проба долази до иницирања експлозије;
- $H_{50}$  – висина пада тега при чему у 50% проба долази до иницирања експлозије;
- $H_{100}$  – минимална висина пада тега при чему у 100% проба долази до иницирања експлозије.



Слика број 76. Крива осјетљивости на удар ( $H_0$  – максимална висина пада тега при чему у 0% проба долази до иницирања експлозије;  $H_{50}$  – висина пада тега при чему у 50% проба долази до иницирања експлозије;  $H_{100}$  – минимална висина пада тега при чему у 100% проба долази до иницирања експлозије)

Осјетљивост на удар се такође може изразити помоћу тзв. енергије удара при којој се дешава иницијација од 50% испитиваног узорка. Вриједности се изражавају у њутн-метрима ( $Nm$ )<sup>186</sup> или џулима ( $J$ )<sup>187</sup>. Израчунавање се врши помоћу израза:

$$E_I = M_W \times H \times g, \quad (9)$$

$E_I$  – енергија удара;

$M_W$  – маса падајућег тега;

$H$  – висина пада тега;

$G$  – гравитационо убрзање (константа,  $9,81 \text{ ms}^{-2}$ ).

Осјетљивост на удар експлозивних материја изражена помоћу енергије удара приказана је у табели 42.

Табела број 42. Вриједности осјетљивости на удар експлозивних материја изражених помоћу енергије удара. [13,96]

<sup>186</sup> Њутн-метар је мјерна јединица момента силе у СИ систему.

<sup>187</sup> Џул је СИ јединица за енергију и рад ( $1J=1Nm$ ).

	Супстанца	Осјетљивост на удар ( $Nm$ )
Примарни експлозивни	Тетразен	1–2
	Живин фулминат	1–2
	Оловни стифнат	2,5–5
	Оловни азид	2,5–4
	Диазодинитрофенол, <i>DDNP</i>	1,5
Секундарни експлозивни	<i>PETN</i>	3
	Октоген ( <i>HMX</i> )	7,4
	Хексоген ( <i>RDX</i> )	7,5
	Хексаниростилбен ( <i>HNS</i> )	5
	Нитроглицерин	0,2
	Тетрил	3
	Нитроцелулоза (13,4% азота)	3
	Пикринска киселина	7,4
	Тринитротолуен ( <i>TNT</i> )	15
	Тринитробензен ( <i>TNB</i> )	7,4
	Нитрогванидин	>49
	<i>TATB</i>	50
	Нитрогликол	0,2
	<i>CL-20</i>	4
	<i>HNS</i>	5
	<i>TATB</i>	50
<i>TACOT</i>	69	
Терцијарни експлозивни	Амонијум-нитрат ( <i>AN</i> )	50
	Амонијум-перхлорат ( <i>AP</i> )	15–25
	Амонијум-динитрамид ( <i>ADN</i> )	3–5
	Хидразинијум-нитроформат ( <i>HNF</i> )	2–5

Релативна осјетљивост на удар представља ниво осјетљивости у односу на референтну експлозивну материју (тринитротолуен, *TNT*). Израчунава се помоћу израза:

$$O_R = \frac{E_I(X)}{E_I(TNT)} \times 100 \quad (10)$$

$O_R$  – релативна осјетљивост на удар

$E_I(X)$  – енергија удара за испитивану супстанцу

$E_I(TNT)$  – енергија удара за тринитротолуен

Један од начина изражавања вриједности осјетљивости на удар за испитивану материју је тзв. „слика неосјетљивости” (енг. *Figure of Insensitiveness, F of I*). Испитивање се врши помоћу уређаја са падајућим тековима на начин да се прашкасти узорак испитиване материје излаже удару падајућег тега веће масе (5 kg) са различитих висина. Евидентирају се пробе приликом којих долази до иницирања и рачунају се проценти за сваку висину пада тега. Резултати процената иницирања за сваку висину пада тега се подвргавају Брустоновој (енг. *Bruceton*) анализи кориштењем тзв. методе степеница (енг. *Staircase method*)<sup>188</sup> помоћу које се одређује средња висина удара тега са вјероватноћом од 50% иницирања испитиване супстанце. Осјетљивост на удар, кориштењем „слике неосјетљивости” представља однос средње висине са вјероватноћом од 50% иницирања испитиване материје и средње висине са вјероватноћом од 50% за супстанцу која се користи као стандард (вриједности за тетрил износе 70 а за хексоген 80) те се рачуна према изразу:

$$F \text{ of } I = \left( \frac{\text{средња висина пада за узорак}}{\text{средња висина пада за стандард}} \right) \times F \text{ of } I \text{ стандарда} \quad (11)$$

Осјетљивост на удар енергетских материја се на основу „слике осјетљивости” класификују на веома осјетљиве (*very sensitive*), осјетљиве (*sensitive*) и релативно осјетљиве (*comparatively sensitive*). Критеријум осјетљивости на удар на основу „слике осјетљивости” је приказан у табели 43.

Табела број 43. Класификација осјетљивости на удар помоћу „слике осјетљивости”

<sup>188</sup> Метода статистичке анализе која се заснива на иницијацији у првој фази испитивања а затим повећању или смањењу интензитета иницирања у зависности од резултата након првог иницирања.

Вриједности <i>F of I</i>	Веома осјетљиви $\leq 50$	Осјетљиви 50–100	Релативно осјетљиви $\geq 100$
Енергетске материје	Живин фулминат		
	Тетразен		Пикринска киселина
	Оловни азид	Хексоген	Тринитротолуен
	Оловни стифнат	Октоген	ТАТВ
	Сребрни азид	Тетрил	Нитрогванидин
	Нитроглицерин		
	Нитроцелулоза		
	РЕТН		

У табели 44 су приказане вриједности осјетљивости на удар различитих енергетских материја помоћу „слике осјетљивости”

Табела број 44. „Слика осјетљивости” за различите енергетске материје

	Супстанца	Слика осјетљивости	Класификација
Примарни експлозивни	Тетразен	13	Веома осјетљив
	Живин фулминат	10	Веома осјетљив
	Оловни стифнат	12*	Веома осјетљив
	Оловни азид	20**	Веома осјетљив
Секундарни експлозивни	РЕТН	51	Осјетљив
	Октоген (лат. НМХ)	56	Осјетљив
	Хексоген (лат. RDX)	80	Осјетљив
	Црни барут	90	Осјетљив
	Нитроглицерин	30	Осјетљив
	Тетрил	86	Осјетљив
	Нитроцелулоза (13,4% азота)	23	Осјетљив
	Пикринска киселина	120	Релативно осјетљив
	Тринитротолуен (лат. TNT)	152	Релативно осјетљив

Нитрогванидин	>200	Релативно осјетљив
ТАТВ	>100	Релативно осјетљив

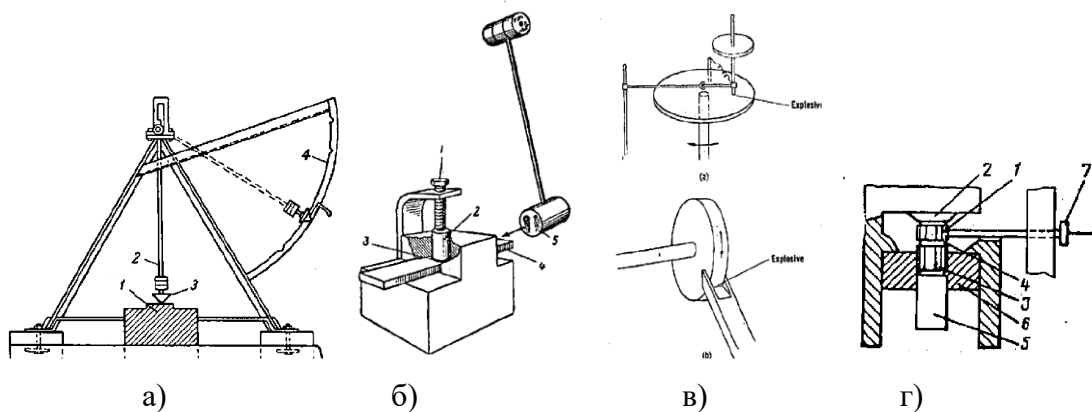
\* – тежина утега 5 kg; количина узорка 30 mg; \*\* – тежина утега 2 kg; количина узорка 30 mg

Усљед међусобног трења честица материје као и трења између честица енергетских материја и различитих материјала са којима су честице у контакту, могуће је иницирање енергетских материја и одвијање експлозивних процеса. Такође, када различити вањски механички удари (импулси) дјелују на површину енергетске материје под одређеним углом, може се сматрати да једним дијелом на евентуалну појаву иницирања и експлозивног процеса, осим механичког удара, утиче и трење.<sup>189</sup> Одређивање осјетљивости на трење врши се помоћу уређаја различите конструкције при чему се разликују двије групе уређаја у зависности од мјерних јединица у којима се исказују вриједности резултата мјерења.

У прву групу уређаја се сврставају уређаји чији се резултати мјерења приказују у мјерним јединицама за притисак (паскал,  $Pa$ ). Другу групу уређаја представљају уређаји помоћу којих се вриједности резултата испитивања изражавају у мјерној јединици њутн ( $N$ ).

У претходном временском периоду, конструисани су уређаји различитих конструкција за одређивање осјетљивости на трење чији се резултати изражавају у паскалима. Принцип рада се заснива на дјеловању одговарајуће вањске силе на механички елемент који се налази у контакту са испитиваном супстанцом а која се налази распоређена на носачу узорка (слика 77). Вриједност примијењене вањске сила се изражава у еквивалентним вриједностима притиска између механичког елемента и испитиване материје. Једна од карактеристика ових уређаја јесте да се носач узорка или механички елемент (у зависности од конструкције) креће у једном правцу.

<sup>189</sup> Сила која се противи клизању једног тијела уз друго док се међусобно тијела притишћу назива се трење. Разликује се трење мировања (статичко трење) и трење кретања (кинематичко трење) које може бити трење клизања, трење котрљања и отпор флуида кретању. Трење кретања претвара кинетичку енергију у топлоту. Статичко трење спречава кретање и једнаке је вриједности а супротног смјера суме осталих сила које изазивају кретање. Величина силе трења изражава се у њутнима, не зависи директно од величине контактне површине већ само од хемијског састава и храпавости контактних површина. Оно је посљедица хемијског међудјеловања (електричних сила) материјала који су у контакту.

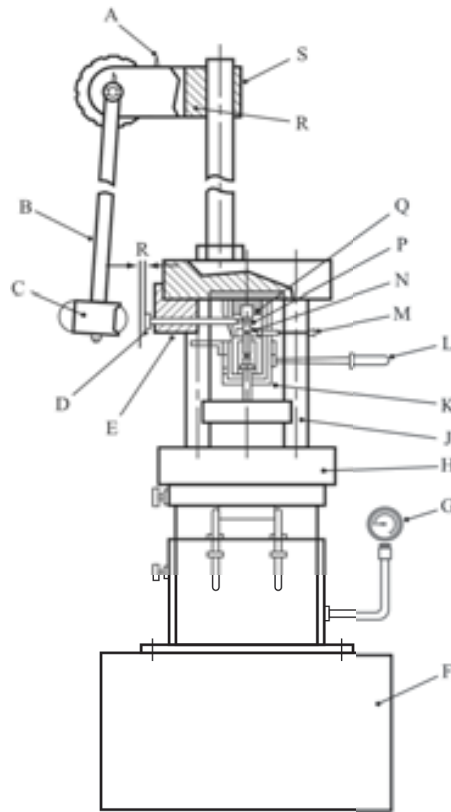


Слика број 77. а) Трење помоћу клатна; б) Бовденов фрикциони уређај; в) уређај за течне и чврсте експлозивне материје; г) Бовден-Козлов фрикциони уређај [90]

У савремене уређаје чији се рад заснива на принципу дјеловања вањског импулса при чему се резултати мјерења приказују у јединицама за притисак (паскалима) сврстава се уређај за одређивање осјетљивости на трење помоћу клатна (енг. *Pendulum friction apparatus*).

Уређај за испитивање осјетљивости енергетских материја на трење помоћу клатна је конструисан помоћу механичког клатна<sup>190</sup> које обезбјеђује одговарајућу силу притиска неротирајућег диска на испитивани материјал. Интензитет силе притиска на неротирајући диск се одређује помоћу положаја клатна. Током контакта са испитиваном супстанцом (25–30 милиграма) која је равномјерно распоређена на носачу узорка израђеном од челика врши се помјерање носача у једном правцу које изазива трење између испитиване супстанце и неротирајућег диска (слика 78). Испитивања се проводе у серијама од 25 тестова при чему се у првом кораку одређује максимални притисак ротирајућег диска на испитивану супстанцу при којем не долази до експлозије у свих 25 тестова. На овај начин одређен притисак представља доњу границу осјетљивости на трење. Ако се у 25 испитивања не добије експлозија при притиску од 1200 МПа, доња граница осјетљивости на трење се изражава као „1200 МПа или више”. Ако се добије једна или више експлозија у 25 испитивања при притиску од 30 МПа, доња осјетљивост на трење се изражава као „мање од 30 МПа”.

<sup>190</sup> Клатно је физичко тијело које се њише око равнотежног положаја.



*A) окидач; (B) полуга клатна; (C) тег клатна; (D) ударни клин; (E) водич за ударну иглу; (F) база; (G) манометар; (H) хидраулична преса; (J) ослонац апарата; (K) тело апарата; (L) ручка за спуштање навлаке склопа ваљка; (M) гурач склопа ваљка; (N) навлака; (P) ваљак; (Q) комора; (R) држач клатна; (S) ослонац држача клатна.*

*Слика број 78. Шематски приказ уређаја за одређивање осјетљивости на трење помоћу клатна (Pendulum friction apparatus) [89]*

У Приручнику за тестове и критеријуме (који су израдиле Уједињене нације) [89] представљени су критеријуми испитивања и начин оцјењивања резултата теста за одређивање осјетљивости на трење помоћу уређаја са клатном<sup>191</sup>.

Процјена резултата теста се врши на основу:

<sup>191</sup> „Приручник за испитивања и критеријуме” садржи критеријуме, методе испитивања и поступке који ће се користити за класификацију опасних материја према одредбама „Препорука Уједињених нација о транспорту опасних материја, Модел прописа”, као и хемикалија. Представљање физичких опасности према „Глобално хармонизованом систему класификације и обележавања хемикалија (ГХС)”. Стога, такође, допуњује националне или међународне прописе који су изведени из Модела прописа или ГХС-а.

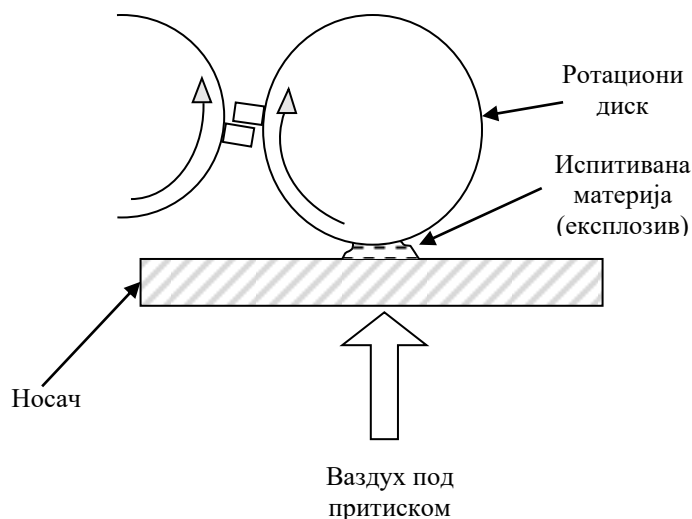
- да ли је дошло до „експлозије” приликом било ког испитивања (серије 25 тестова);
- максимални притисак при којем се не одиграва експлозија у било ком од 25 испитивања.

Резултат испитивања се сматра позитивним (+) ако је доња граница осјетљивости на трење мања од 200 *MPa* и супстанца се сматра нестабилним експлозивом у облику у којем је испитана. Резултат испитивања се сматра негативним (-) ако је доња граница осјетљивости на трење већа или једнака 200 *MPa*.

*Табела број 45. Резултати испитивања појединих експлозивних материја помоћу теста за одређивање осјетљивости на трење помоћу уређаја са клатном [89]*

Супстанца	Доња граница осјетљивости (МПа)	Резултат
Амонијум-нитрат	1200	-
Оловни азид	30	+
PETN/сухи	150	+
PETN/парафин (95/5)	350	-
PETN/TNT (90/10)	350	-
PETN/вода (75/25)	200	-
Пикринска киселина	450	-
RDX/сухи	200	-
RDX/вода (85/15)	350	-
TATB	900	-
TNT	600	-

Такође, на сличном принципу функционисања са различитим конструктивним рјешењем изведен је тзв. ротациони уређај за одређивање осјетљивости на трење (енг. *Rotary friction apparatus*) (слика 79) [97].



Слика број 79. Шематски приказ начина функционисања ротационог уређаја за одређивње осјетљивости на трење.

Резултати експерименталних мјерења се приказују као тзв. „слика трења” (енг. *Figure of Friction, F of F*) при чему се хексоген користи као стандардна материја (вриједност за хексоген износи 3). Слика трења представља однос између брзина кружног кретања диска приликом којих долази до иницирања испитиване и стандардне супстанце.

$$F \text{ of } F = (\text{брзина кружног кретања диска за узорак} / \text{брзина кружног кретања диска за стандард}) \times F \text{ of } F \text{ стандарда} \quad (12)$$

На слици 80 је приказан комерцијални ротациони уређај за одређивање осјетљивости на трење.



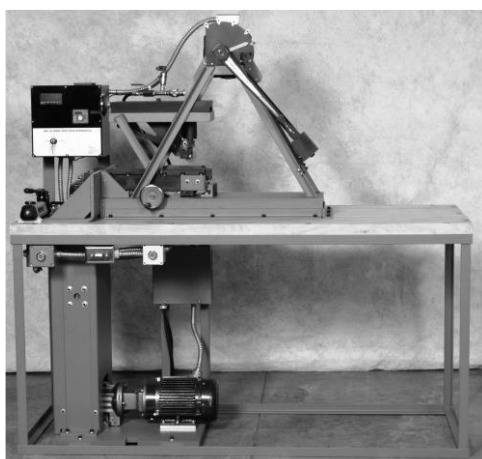
Слика број 80. Комерцијални ротациони уређај за испитивање осјетљивости на трење [98]

Осјетљивост неких експлозивних материја изражених помоћу слике трења приказана је у табели 46.

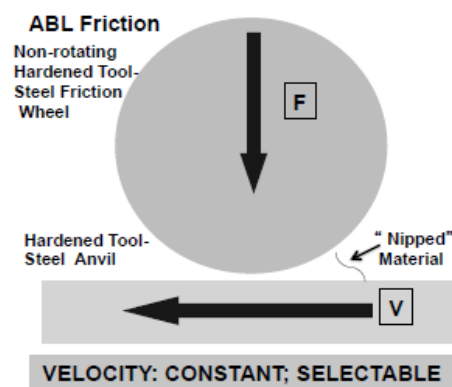
Табела број 46. „Слика трења” за различите енергетске материје

Супстанца	Слика трења ( $F$ of $F$ )
Оловни азид	0,84
<i>PETN</i>	1,3
Октоген ( <i>HMX</i> )	1,5
Хексоген ( <i>RDX</i> )	3
Тетрил	4,5
Тринитротолуен ( <i>TNT</i> )	5,8

У САД се претежно користи АБЛ уређај<sup>192</sup> за одређивање осјетљивости на трење. Функционисање АБЛ уређаја се заснива на вертикалној сили компресије, помоћу неротирајућег цилиндра, која дјелује окомито на плочу која се помјера у хоризонталном правцу. Између клизне плоче и неротирајућег цилиндра се налази испитивана супстанца. Метода за одређивање осјетљивости на трење помоћу АБЛ уређаја се примјењује на чврсте, получврсте и прашкасте супстанце.



а)



б)

<sup>192</sup> АБЛ (енг. *ABL*) уређај је развијен 1960. године у индустријском комплексу под називом Алегани балистички лабораторији, САД (енг. *Allegany Ballistics Laboratory*) који запошљава око 1000 радника и простире се на 6,59 км<sup>2</sup>.

Слика број 81. АБЛ уређај за испитивање осјетљивости на трење: а) слика уређаја; б) принцип рада (*Non-rotating Hardened Tool Steel Friction Wheel* - неротирајући фриксиони точак од каљеног алатног челика; *Hardened Tool Steel Anvil* - наковањ од каљеног алатног челика;  $F$  – сила; „*Nipped material*” – „урезан” материјал;  $V$  – смјер кретања наковња; *Velocity: Constant; Selectable* – брзина: константна; може се изабрати) [99]

У зависности од брзине кретања клизне плоче врши се оптерећење неротирајућег цилиндра. За брзину кретања клизне плоче  $2,4 \text{ m/s}$  оптерећење плоче износи 250 њутна а за брзину кретања плоче  $1,2 \text{ m/s}$  оптерећење плоче износи 445 њутна.

Позитиван (+) резултат теста се сматра када се одигра најмање једна реакција у серији од шест проба при оптерећењу од 250 њутна за дату брзину кретања клизне плоче ( $2,4 \text{ m/s}$ ) или 445 њутна ( $1,2 \text{ m/s}$ ) и мање и тада се супстанца сматра нестабилним експлозивом у облику у којем је тестиран. У супротном случају, резултат се сматра негативним (-).

Табела број 47. Осјетљивости на трење појединих енергетских материја одређена АБЛ методом [89]

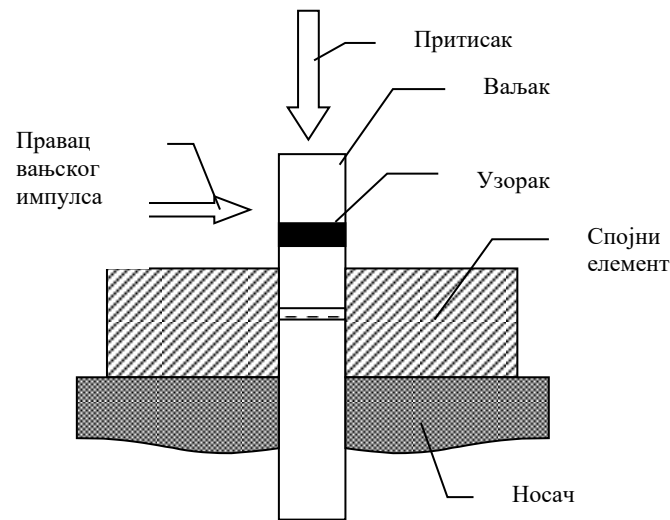
Супстанца <sup>а</sup>	Резултат
Хексоген <i>RDX</i>	-
Пластични експлозив <i>PBXN-8</i>	-
Пластични експлозив <i>PBXN-10</i>	-
Смјеса <i>Al/TNT</i> (80/20)	-
<i>PETN</i> сухи <sup>б</sup>	+

<sup>а</sup> резултати су добијени при условима: брзина кретања клизне плоче  $2,5 \text{ m/s}$ ; релативна влажност 10–30%; температура 16–24°C; <sup>б</sup> резултати су добијени при условима: брзина кретања клизне плоче  $2,5 \text{ m/s}$  и  $1,2 \text{ m/s}$

Уређај чији принцип рада је идентичан са АБЛ уређајем се користи у Руској Федерацији<sup>193</sup> (слика 80). Испитивања се врше путем извођења серија тестова (25

<sup>193</sup> Уређај је конструисан у Високој техничкој школи у Кјубишеву који се налази у саставу Политехничког универзитета у Самари, Руска Федерација.

тестова) за сваки одређени притисак при чему се дефинише притисак при којем не долази до иницирања експлозива ни у једном тесту и притисак на коме се одиграва иницирање узорка у 50% тестова. За разлику од АБЛ уређаја, код овог уређаја носач узорка је стационаран док се сила притиска обезбјеђује дјеловањем на механички елемент који се креће усљед дјеловања вањског импулса.



Слика број 82. Шематски приказ уређаја за испитивање фрикционе осјетљивости развијен у Руској Федерацији [95]

У табели 48 су приказани упоредни резултати испитивања осјетљивости на трење различитих супстанци помоћу АБЛ и БАМ уређаја кориштењем модификоване Брустон методе и методе прага иницијалног нивоа (енг. *threshold initiation level, TIL*) [100].

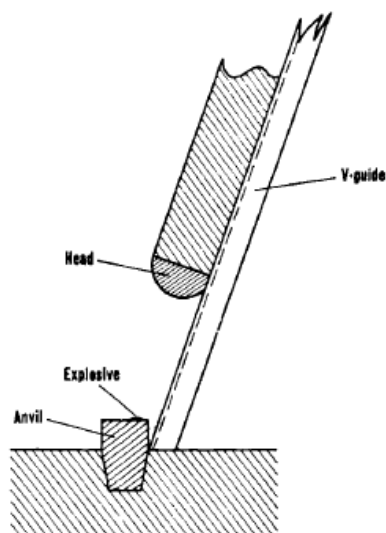
Табела број 48. Резултати испитивања осјетљивости на трење помоћу БАМ и АБЛ уређаја [100]

Материјал <sup>а</sup>	Физичка форма <sup>б</sup>	АБЛ уређај		БАМ уређај	
		ТИЛ метода (MPa)	Брустон метода Φ <sub>50</sub> (MPa)	ТИЛ метода /ЊУТН/	Брустон метода Φ <sub>50</sub> /ЊУТН/
KClO <sub>4</sub> /Al	Суши прах	<0,31	0,45	161,8	262,8
KClO <sub>4</sub> /C <sup>ч</sup>	Суши прах	0,87	2,04	>360	НД

<i>KClO<sub>4</sub></i> /додекан	Влажни прах	2,51	5,04	323,6	>360
<i>KClO<sub>3</sub></i> /додекан	Влажни прах	1,03	3,53	161,8	262,8
<i>KClO<sub>3</sub></i> /шећер <sup>д</sup>	Влажни прах	0,31	0,39	22,6	43,1
<i>KClO<sub>3</sub></i> /шећер <sup>е</sup>	Влажни прах	0,95	1,14	31,4	35,3
<i>NaClO<sub>3</sub></i> /шећер <sup>д</sup>	Влажни прах	1,65	3,18	43,1	154,9
<i>АН</i> <sup>ф</sup>	Бијели прах	2,76	НД	360	>360
Црни барут	Црни прах	НД	2,28	136,3	>360
<i>АН</i> /црни барут	Сиви прах	1,63	1,20	119,6	124,5
<i>УНu</i> /Al <sup>г</sup>	Влажни прах	1,60	3,93	>360	НД
<i>УНu</i> /Al/S	Влажни прах	1,60	2,69	>360	НД
<i>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></i> /кумин <sup>х, и</sup>	Вискозна паста	>7,0	НД	84,3	109,8
<i>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></i> /нитрометан <sup>ј</sup>	Мјешавина са водом	>7,0	НД	>360	НД
<i>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></i> /брашно <sup>х</sup>	Љепљива паста	>7,0	НД	111,8	НД
<i>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></i> /глицерол <sup>х</sup>	Мјешавина са водом	>7,0	НД	115,7	171,6
<i>НМХ</i>	Прах	0,41	0,87	84,3	138,3
<i>РДХ</i>	Прах	0,48-0,74	0,95-1,53	111,8- 148,1	171,6-272,6
<i>РЕТН</i>	Прах	0,15	0,39	42,2	67,7

<sup>а</sup> – мјешавина или чисти материјал; <sup>б</sup> – физичка форма; <sup>и</sup> – активни угаљ; <sup>д</sup> – фракција 100 *mesh-a*; <sup>е</sup> – комерцијални узорак; <sup>ф</sup> – амонијум-нитрат; <sup>г</sup> – уреа нитрат; <sup>х</sup> – 70% водоник пероксид; <sup>и</sup> – лат. *Cuminum cuminum*; <sup>ј</sup> – 90% водоник пероксид; НД – није детектовано

За испитивање осјетљивости на трење користи се и тзв. „торпедо” фрикциони тест (eng. *Torpedo friction test*) за чије провођење се користи уређај приказан на слици 83.



Слика број 83. Шема уређаја за провођење тзв. „торпедо” фрикционог теста [90]

Помоћу клизне шине са водилицом, под углом од  $70^{\circ}$  или  $80^{\circ}$  се са одређене висине спушта ударни клин у облику торпеда тежине 0,5–5 килограма који долази у контакт са испитиваним материјалом. За сваку висину врши се двадесет узастопних испитивања те се одређује минимална и максимална критична висина (висине код којих није долазило до иницирања испитиване материје, 0/20 – нула пута иницијација за 20 појединачних проба). Ову методу карактерише истовремено испитивање осјетљивости на механички удар и трење при чему се израженији утицај односи на трење. У табели 49 су приказане минималне и максималне критичне висине за поједине експлозивне материје.

Табела број 49. Вриједности фрикционе осјетљивости изражене помоћу „торпедо” фрикционог теста

Супстанца	Осјетљивост на трење /1 kg, $80^{\circ}$ / cm
<i>RDX/TNT</i>	40–45
<i>PETN</i>	35–40
Желигнит (енг. Gelnite) <sup>194</sup>	40–60

<sup>194</sup> Експлозивни материјал који садржи колодион (запаљиви сирупастни раствор пироксилина у етеру и алкохолу) памук (нитроцелулоза), растворен у нитроглицерину или нитроглицолу и помијешан са дрвеном пулпом (целулозним влакнима из дрвета) и шалитром (натријум-нитрат или калијум-нитрат).

Хексоген (RDX)	10–20
Тринитротолуен (TNT)	80–120
Амонијев желинит (енг. ammon gelignite)	40–60
Нитроглицерин у праху	>150
Тринитротолуен у праху	100–120

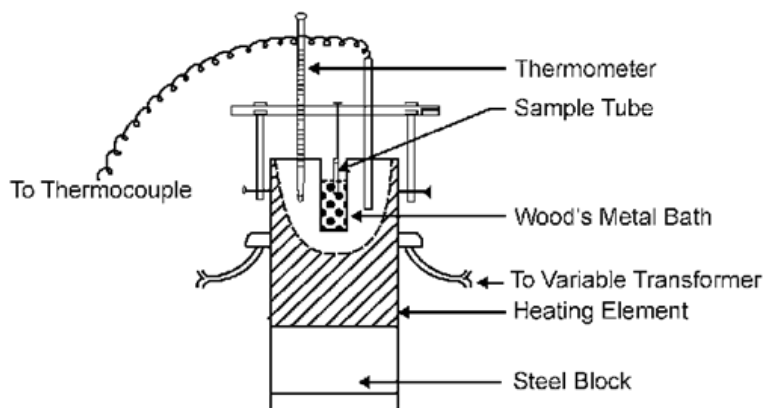
Утицај топлоте на енергетске материје у зависности од врсте извора топлоте, односно, осјетљивост енергетских материја на топлотни импулс (топлоту) манифестује се на два начина. Када топлотни извор остварује утицај путем пламена и сл. долази до локалног загријавања у контактної зони (дио материје која се налази у директном контакту са пламеном) и иницирања процеса декомпозиције (детонације или горења) те даље ширење иницираног процеса које карактерише самоодрживи карактер.

У условима у којима се врши хомогено загријавање по цијелој маси испитиване енергетске материје одиграва се процес иницирања и распада (декомпозиције) усљед нарушавања топлотне равнотеже под утицајем спољашњег топлотног импулса. У циљу упоредног поређења, вриједности осјетљивости на топлоту различитих енергетских материја врши се испитивањем:

- индукционог периода (експлозивно кашњење) (енг. *Explosion delay, E<sub>D</sub>*)
- температуре експлозије (температура на којој се врши иницирање и процес декомпозиције) (енг. *Temperature explosion, E<sub>T</sub>*)
- енергије активације – потребна количина енергије за активацију супстанце (енг. *activation energy, E<sub>A</sub>*)
- термалне анализе.

Различите енергетске материје приликом загријавања на одређеној константној температури показују различити временски период од момента загријавања до момента иницирања. Тај временски период се назива индукциони период или експлозивно кашњење чије вриједности се налазе у распону од неколико сати до неколико милисекунди у зависности од испитиване материје.

Вриједности температуре приликом које долази до процеса декомпозиције назива се температура експлозије. Одређивање температуре експлозије врши се помоћу методе коју су развили Коп и сарадници (енг. *Copp et. al*)<sup>195</sup> [99]. На слици 84 је приказан уређај за одређивање температуре експлозије и индукционог периода.



Слика број 84. Уређај за одређивање температуре експлозије и експлозивног кашњења (*To Thermocouple* – до термоелемента; *Thermometer* – термометар; *Sample Tube* – туба са узорком; *Wood's Metal Bath* – метални купељ са пилевином; *To Variable Transformer Heating Element* – до промјенљивог трансформатора загријавајућег елемента; *Steel Block* – челични блок)

Потребна количина енергије за активацију испитиване супстанце (енергија активације) израчунава се на основу односа између апсолутне температуре воденог купатила и вриједности експерименталних резултата индукционог периода помоћу израза:

$$E_D = A e^{E_a/RT} \quad (13)$$

$E_D$  – индукциони период

$E_a$  – енергија активације

$R$  – универзална гасна константа

$T$  – апсолутна температура воденог купатила

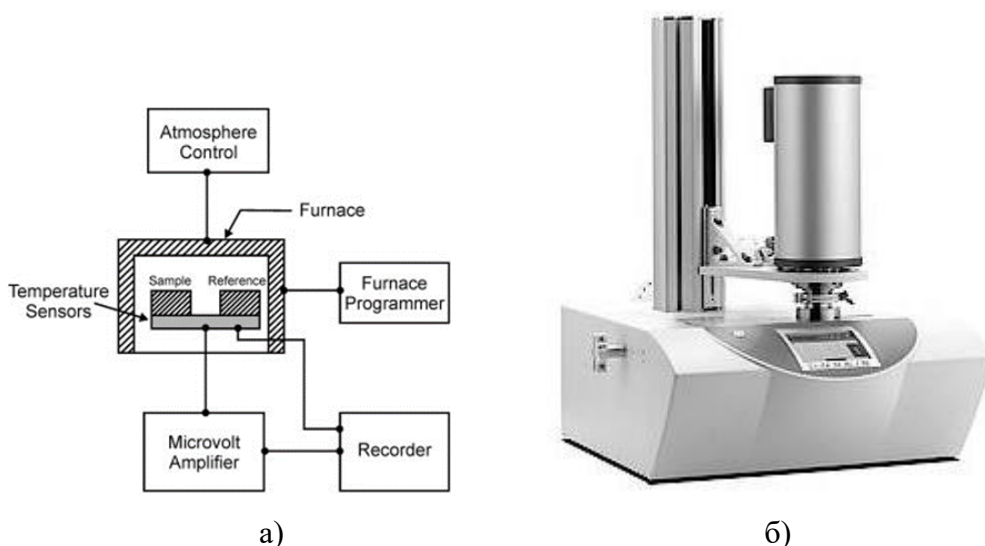
$A$  – фактор у зависности од експлозива.

<sup>195</sup> Узорак (20 милиграма) се помоћу тестне епрувете и воденог купатила загријава на почетној температури од 300<sup>0</sup> С. Стандардизовано вријеме задржавања на датој температури износи 10 или 5 секунди и врши се осматрање узорка. Корак промјене температуре износи 10<sup>0</sup>С. Истовремено се мјери вриједност индукционог времена од момента урањања тестне епрувете у водено купатило на температури при којој се одиграва процес декомпозиције до момента декомпозиције.

У новије вријеме, све већа пажња се посвећује анализи термичких карактеристика енергетских материја помоћу термалне анализе умјесто претходно наведених параметара. Термална анализа представља групу техничких аналитичких техника које се заснивају на испитивању термичких карактеристика испитиване супстанце у функцији температуре или времена. У аналитичке технике термичке анализе сврставају се:

- диференцијална термална анализа (енг. *Differential thermal analysis, DTA*)
- термогравиметријска анализа (енг. *Thermogravimetric analysis, TGA*)
- диференцијална скенирајућа калориметрија (енг. *Differential Scanning Calorimetry, DSC*)
- симултана термална анализа (енг. *Simultaneous thermal analysis, STA*).

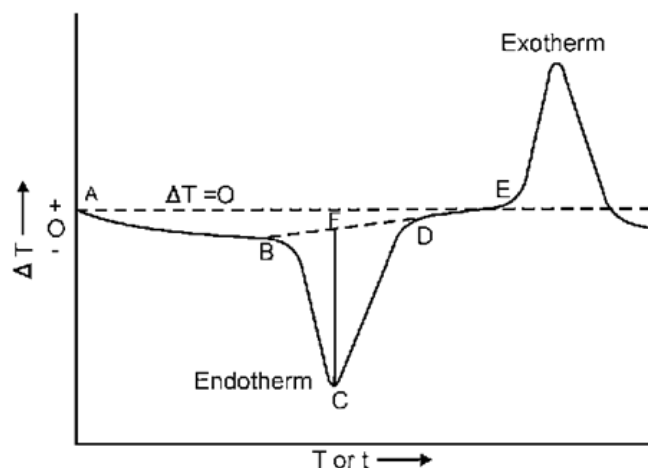
Приликом извођења методе диференцијалне термалне анализе, врши се загријавање или хлађење узорка испитиване супстанце и термички инертне материје при чему се биљежи вриједност пораста, односно, смањења температуре узорка у функцији промјене температуре или тока времена а што одговара емисији или апсорпцији топлоте за дату испитивану материју у функцији температуре или времена. Уређај за провођење диференцијалне термалне анализе је приказан на слици 84.



Слика број 85. Уређај за диференцијалну термалну анализу: а) шематски приказ (*Atmosphere control* – контролисана атмосфера; *Temperature Sensors* – температурни сензор; *Furnace* –

peћ; Furnace Programmer - програмер пећи; Sample - узорак; Reference – референтни материјал; Microvolt Amplifier – микроволтно појачало; Recorder - снимач ) б) визуелни изглед

Резултати експерименталних испитивања се приказују графичким путем помоћу криве под називом термограм.



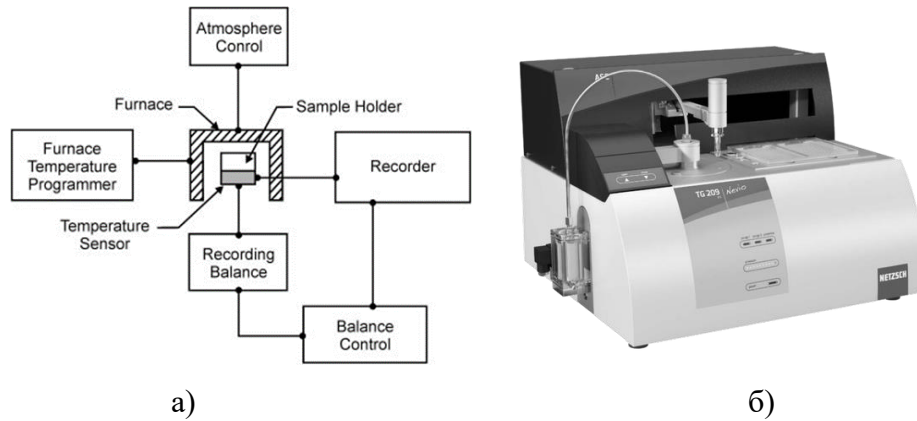
Слика број 86. Типична крива диференцијалне термалне анализе (термограм)( $\Delta T$  – промјена температуре;  $T$  or  $t$  – температура или вријеме; Endotherm – ендотермна реакција; Exotherm – егзотермна реакција)

Диференцијална термална анализа се користи за различите аспекте термичких карактеристика испитиваних материја:

- компатибилност експлозивних материја и полимера
- топлотну стабилност различитих органских једињења
- топлотну декомпозицију експлозивних материја
- кинетику топлотне декомпозиције појединих експлозивних материја.

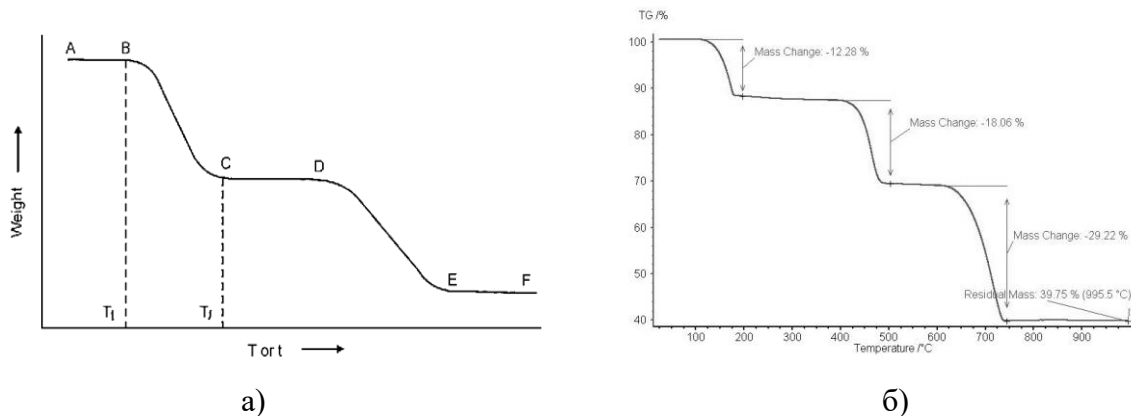
Термогравиметријска анализа се заснива на мјерењу промјене тежине испитиваног узорка прије и после загријавања. Разликују се статичка и динамичка термогравиметријска анализа. Посматрање тежине узорка на константној температури у функцији времена назива се статичка термогравиметријска метода, а, ако се врши посматрање тежина узорка при промјени температуре, тада се ради о динамичкој

термогравиметријској методи. Уређај за термогравиметријску анализу је приказан на слици 87.



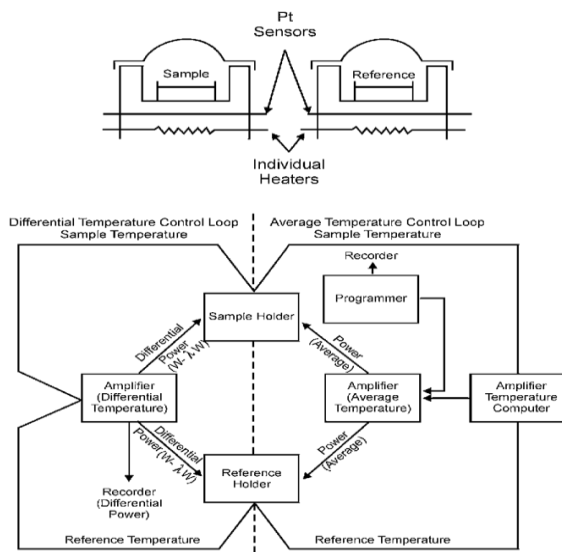
Слика број 87. Уређај за термогравиметријску анализу: а) шематски приказ (*Atmosphere control* – контролисана атмосфера; *Temperature Sensors* – температурни сензор; *Furnace* – пећ; *Furnace Temperature Programmer* - температурни програмер пећи; *Temperature Sensor* – температурни сензор; *Recording Balance* – снимач баланса; *Sample Holder* – носач узорка; *Balance Control* – контрола баланса; *Recorder* - снимач ) б) визуелни изглед

Експериментални резултати испитивања су приказани као промјена вриједности масе узорка у зависности од времена загријавања при константној температури (статичка термогравиметријска анализа) или промјена масе узорка у функцији промјене температуре (динамичка термогравиметријска анализа). Крива која приказује наведене зависности назива се термогравиметријска крива.



Слика број 88. Приказ експерименталних резултата добијених: а) статичком термогравиметријском анализом; б) динамичком термогравиметријском анализом

Експериментална испитивања помоћу диференцијалне скенирајуће калориметрије се заснива на мјерењу потребне топлотне енергије за успостављање нулте разлике између температуре испитиваног узорка и референтног материјала у функцији температуре или времена. Излазни сигнал се мјери као топлотни капацитет (топлотни флукс) у зависности од времена или температуре (слика 88).

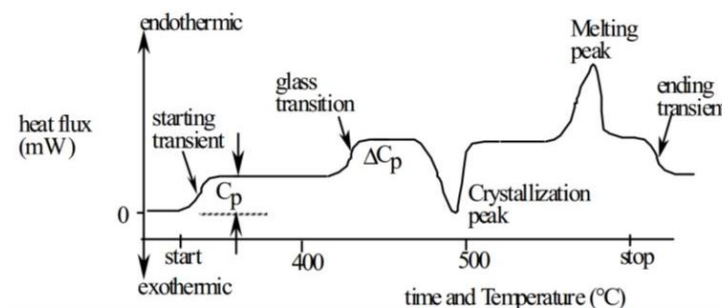


а)

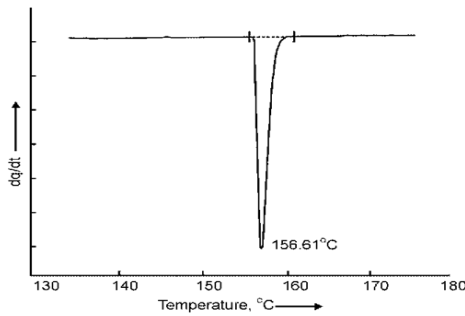


б)

Слика број 89. А) шема уређаја за диференцијалну скенирајућу калориметрију; б) визуелни изглед уређаја за диференцијалну скенирајућу калориметрију



а)



б)

Слика број 90. А) графички приказ криве помоћу скенирајуће диференцијалне калориметрије за метал-индијум (референтни материјал) (*heta flux* – топлотни флуks; *time and Temperature* – вријеме и температура; *endothermic* - ендотермни; *exothermic* - екзотермни; *starting transient* – старт транзиције; *glass transition* – транзиција у стакласту форму; *crystallization peak* – кристализациони пик; *melting peak* – пик топљења; *ending transient* – завршетак транзиције) б) графички приказ зависности топлотног флуksа од температуре

За провођење испитивања тзв. дуготрајне топлотне стабилности (енг. *long-term thermal stability*) енергетских материја а посебно примарних експлозива користи се тзв. Кнеисл тест (енг. *Kneisl-Test*)<sup>196</sup>.

Симултана термална анализа подразумијева комбиновање диференцијалне термалне методе, термогравиметријске методе и методе диференцијалне скенирајуће калориметрије помоћу једног уређаја.

Резултати термалне анализе за поједине енергетске материје су приказани у табели 50.

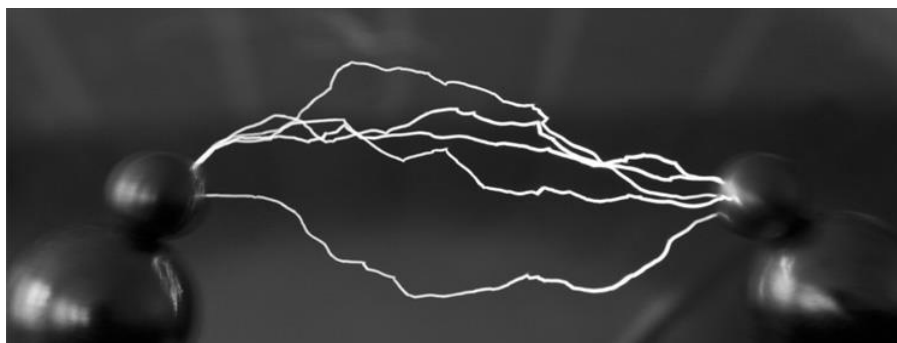
Табела број 50. Резултати термалне анализе за поједине експлозивне материје

Експлозив	Тачка топљења °C	Температура иницирања °C	Екзотермна температура °C
2,4,6 – TNT	81	295 – 300	250
Амонијум-пикрат	280 (декомпозиција)	313	280

<sup>196</sup> Кнеисл тест (енг. *Kneisl-Test*) се проводи на начина да се испитивани узорак (100 милиграма) затвори у стаклену ампулу и изложи извору топлоте (на температури термичке стабилности). Након датог времена ампула се отвара, продукти загријавања се подвргавају даљим аналитичким техникама. Ако губитак масе узорка не прелази 2% сматра се да је потврђена температура термичке стабилности за испитивани материјал.

Тетрил	129	201–212	162
<i>RDX</i>	205	229	215
$\beta$ - <i>HMX</i>	275	279–281	260
<i>PETN</i>	140	203	160
Нитрогванидин	264	210–240	168
Аминијум-нитрат	169	> 360	Ендотерман
<i>TNAZ</i>	<100	–	253
<i>CL – 20</i>	–	–	225
<i>ADN</i>	91.5–93.5	167–174	184
<i>HNF</i>	115–124	115–120	–

Електростатичка осјетљивост се дефинише као минимална количина енергије електростатичког пражњења (електричне искре)<sup>197</sup> која иницира процес декомпозиције енергетске материје [101].



Слика број 91. Електростатичко пражњење

Није извршена стандардизација методе одређивања електростатичке осјетљивости енергетских материја. Најчешће примјењиване методе одређивања електростатичке осјетљивости су [102]:

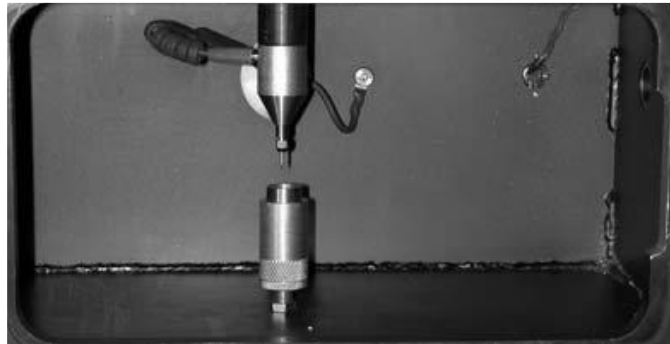
- метода константног размака (енг. *fixed gap method*)

<sup>197</sup> Електростатичко пражњење представља нагли проток електричне енергије (једносмјерне) између два објекта на којима се налазе различита наелектрисања статичког електрицитета. Најчешћи облик електростатичког пражњења (ЕСД) је варница, која се јавља када јачина статичког електричног поља пређе приближно 4–30 кВ/цм (тј. јачину диелектричног поља ваздуха).

- метода покретне електроде (енг. *approaching electrode method*).

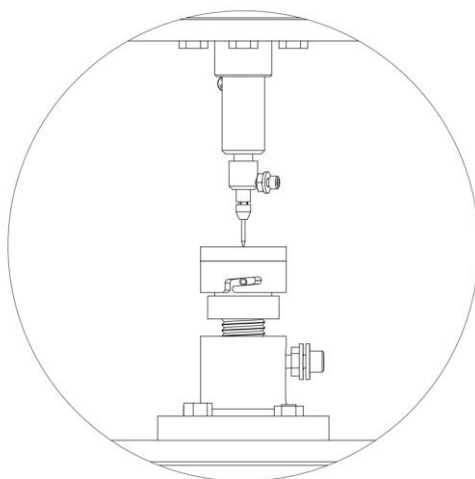
Метода константног размака се изводи помоћу двије електроде константног размака при чему је једна електрода у контакту са испитиваном супстанцом. Друга електрода у облику игле која се користи за електростатичко пражњење поставља се изнад испитиваног узорка на одређеној удаљености. Као извор електростатичке енергије користи се одговарајући кондензатор при чему се количина ослобођене електростатичке енергије контролише промјеном напона и капацитивности кондензатора.

Један од уређаја који се користе приликом извођења методе константног размака јесте „пуцајући” тест систем модел 931 (енг. *model 931 Firing test system, FTS*). Уређај генерише импULSE пражњења кондензатора при чему се употребљава за одређивање прага енергије потребне за паљење испитиване супстанце [103].



Слика број 92. Приказ положаја електрода приликом извођења електростатичког пражњења [103]

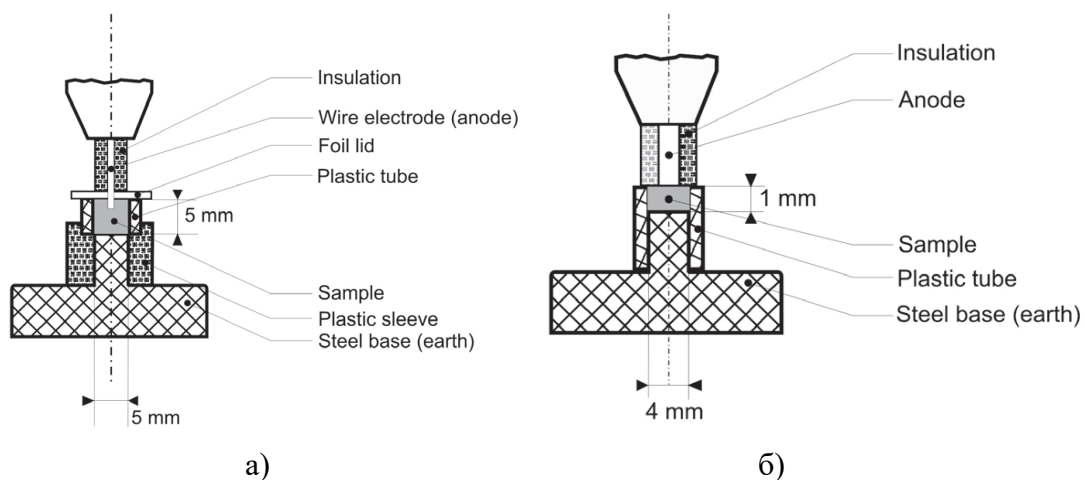
Уређај који функционише на сличном принципу је конструисала Алегани балистичка лабораторија (енг. *Allegany Ballistics Laboratory (ABL) ESD machine*) [104].



Слика број 93. Шематски приказ АБЛ ЕДС уређаја [104]

АБЛ ЕДС уређај је намијењен за одређивање електростатичке осјетљивости за чврсте, получврсте, прашкасте и течне узорке при чему маса испитиваног узорка износи 20 mg.

У последње вријеме развијена су два типа уређаја под називом *RDAD* и *ESZ KTTV*. Резултати *RDAD* инструмента показују задовољавајућу корелацију са резултатима добијеним другим методама одређивања електростатичке осјетљивости. Недостатак овог инструмента се огледа у неадекватности одређивања наведене осјетљивости пиротехничких материја. Из тог разлога је развијен нови инструмент, означен као *ESZ KTTV* [105].



Слика број 94. Шематски приказ: а) RDAD уређаја (Insulation - изолација; Wire electrode (anode) – електродна жица (анода) ; Foil lid – поклопац од фолије; Plastic tube – пластична туба; Sample - узорак; Plastic sleeve – пластични рукав; Steel base (earth) – челична база (земља)) б) ESZ KTTV уређаја (Insulation - изолација; anode – анода; Plastic tube – пластична туба; Sample - узорак; Steel base (earth) – челична база (земља)) [105]

Упоредне вриједности електростатичке осјетљивости одређене помоћу RDAD уређаја и ESZ KTTV уређаја приказане су у табели 51.

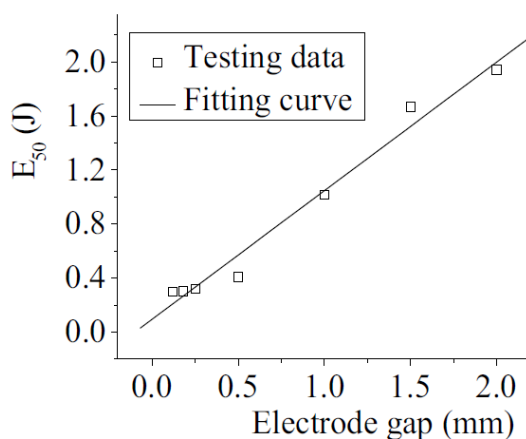
Табела број 51. Упоредне вриједности електростатичке осјетљивости одређене помоћу RDAD уређаја и ESZ KTTV уређаја за поједине енергетске материје [105]

Хемијски назив	Ознака	Енергија електричне варнице потребне за 50% вјероватноће иницијације добијене инструментом	
		RDAD	ESZ KTTV
		(J)	(mJ)
1,3-Dinitrobenzene	1,3-DNB	3.15	256.7±14.4
1,4-Dinitrobenzene	1,4-DNB	18.38	403.3±14.4
1,3,5-Trinitrobenzene	TNB	6.31	108.2± 7.8
2,2',4,4',6,6'-Hexanitro-1,1'-biphenyl	HNB	5.03	286.7±26.7
2,4,6,2',4',6',2'',4'',6''-Nonanitro-[1,1',3',1'']terphenyl	NONA	16.44	158.2± 7.8
1,8-Dinitronaphthalene	1,8-DNN	13.99	238.2± 9.9
1,5-Dinitronaphthalene	1,5-DNN	11.20	180.0±10.9
1,4,5-Trinitronaphthalene	TNN	10.97	210.0±13.3
1,4,5,8-Tetranitronaphthalene	TENN	8.26	95.0± 8.3
5,7-Dinitro-1-(2',4',6'-trinitrophenyl)-1H-1,2,3-benzotriazole	BTX	6.50	135.0± 8.3
2,4,6-Tris(2,4,6-trinitrophenyl)-[1,3,5]triazine	TPT	10.61	283.3±27.2
2-Methyl-1,3,5-trinitrobenzene	TNT	6.85	111.8±12.9

2,4,6-Trimethyl-1,3,5-trinitrobenzene	<i>TNMs</i>	8.98	292.7±17.0
2-Amino-1,3,5-trinitrobenzene	<i>PAM</i>	6.85	156.7± 7.2
2,4-Diamino-1,3,5-trinitrobenzene	<i>DATB</i>	10.97	175.0 ± 8.3
2,4,6-Triamino-1,3,5-trinitrobenzene	<i>TATB</i>	17.75	293.3±14.4
2-Hydroxy-1,3,5-trinitrobenzene	<i>PA</i>	9.98	115.5± 6.8
2,4-Dihydroxy-1,3,5-trinitrobenzene	<i>TNR</i>	12.30	230.0±30.0
2-Methoxy-1,3,5-trinitrobenzene	<i>TNA</i>	28.59	436.0±29.6
1-Chloro-2,4,6-trinitrobenzene	<i>CTB</i>	6.71	101.0± 7.7
1,3-Dichloro-2,4,6-trinitrobenzene	<i>DCTB</i>	2.55	31.5± 2.8
(E)-Bis(2,4,6-trinitrophenyl)diazene	<i>HNAB</i>	8.20	112.0± 8.6
(E)-Bis(3-methyl-2,4,6-trinitrophenyl)- diazene	<i>DMHNAB</i>	13.37	118.2± 7.8

Метода покретне електроде се изводи помоћу двије електроде од којих је једна електрода покретна (могуће је мијењати удаљеност покретне електроде од испитиване материје) док је вриједност енергије електростатичког пражњења константна. Изводи се серија мјерења за сваку удаљеност при чему се одређује осјетљивост ( $EDS_{50}$ ) за 50% вјероватноће паљења и израчуната је према Брустоновој методи [106].

Резултати експерименталних испитивања се могу приказати графички, помоћу криве која представља зависност енергије активације изражене у џулима од међусобне удаљености електрода.



Слика број 95. Графички приказ експерименталних резултата зависности енергије активације од међусобне удаљености електрода (*Testing data – резултати тестирања; Fitting curve – фитована крива; electrode gap – размак електрода*) [106]

Развој неосјетљивих експлозивних материја су интензивирала испитивања утицаја ударног таласа (енг. *Shock wave*) различитог интензитета на осјетљивост високоенергетских материја. Са становишта инжењерства, осјетљивост на шок се може дефинисати као вриједност притиска ударног таласа који изазива детонацију материје на коју дјелује у 50% тестова [107]. На основу експерименталних и теоријских истраживања уочено је да је за сваку експлозивну материју карактеристичан тзв. критични иницијацијски притисак ( $P^*$ ) и критична иницијацијска густина ( $\rho^*$ ) (за *TNT*  $P^* \approx 12 \text{ GPa}$ ,  $\rho^* \approx 1,4 \text{ g/cm}^3$ ). Ако су почетне вриједности притиска ударног таласа веће од  $P^*$  и густина енергетске материје на коју дјелује ударни талас веће од  $\rho^*$  механизам декомпозиције енергетске материје се одвија путем хомогеног механизма. При нижим вриједностима почетног притиска од  $P^*$  декомпозиција енергетске материје се одвија путем механизма „врљних тачака” (или може бити заустављена) [108].

Развијено је више различитих метода испитивања осјетљивости на шок. У оквиру Лавренс Ливермур националне лабораторије, САД (енг. *Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL*) кориштен је сет различитих метода [109]:

- *GAP* тест
- критична енергија
- *LVD* скрининг тест
- иницијални притисак (шока).

*GAP* тест („размак тест”) представља методу испитивања осјетљивости на шок у којој се користе различита стандардна детонациона пуњења („извор” ударног таласа) и дистанцери (еластични елементи који физички одвајају стандардна детонациона пуњења и испитивану материју) различитих димензија израђени од различитих материјала. Критеријум за оцјењивање *GAP* теста представља иницирање 50% проба за дату конфигурацију. У зависности од истраживачке организације, развијени су следећи *GAP* тестови [109]:

- Морнарички центар за површинско наоружање (енг. *Naval Surface Weapons Center*) – гап тест мале скале (енг. *NSVC smal scale gape test, SSGT*)
- Лос Аламос национална лабораторија (енг. *Los Alamos National Laboratory*) – гап тест мале скале (енг. *LANL smal scale gape test, SSGT*)
- Лос Аламос национална лабораторија (енг. *Los Alamos National Laboratory*) – гап тест велике скале (енг. *LANL large scale gape test, LSGT*)
- Пантекс погон (енг. *Pantex plant*) – гап тест (енг. *PX gap test*)
- Станфорд истраживачки институт (енг. *Stanford Research Institute*) – гап тест за течне високоенергетске материје (енг. *SRI gap test for liquid HE*).

Метода критичне енергије подразумејева одређивање критичне енергије у зависности од енергетског тока ударног таласа. Критична енергија представља јединствену карактеристику за испитивану експлозивну материју и зависи од притиска и времена трајања ударног таласа. Одређује се на основу емпиријског израза:

$$E_S = tP^2/\rho U_S \quad (14)$$

$E_S$  – критична енергија ( $cal/m^2$ ,  $J/m^2$ )

$t$  – вријеме трајања ударног таласа ( $\mu s$ )

$P$  – притисак ударног таласа ( $GPa$ )

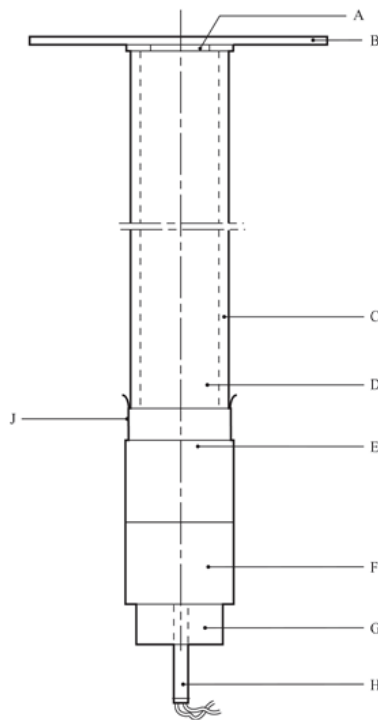
$\rho$  – густина испитиване експлозивне материје ( $g/cm^3$ )

$U_S$  – брзина ударног таласа ( $km/s$ )

Скрининг тест ниске брзине детонације (енг. *LVD, low velocity detonation screening test*) се користи за испитивање течних експлозивних материја. Течни експлозив се нанесе у танком слоју на алуминијумску фолију, постави на испитну плочу и активира стандардним експлозивним пуњењем (20–100% РЕТН). Уочене деформације испитне плоче представљају критериј за резултате теста [109].

Тест иницијалног притиска показује резултате у виду опсега вриједности притиска ударног таласа при којем долази до иницирања испитиване материје.

Према Приручнику за тестове и критеријуме (који су израдиле Уједињене нације) препоручени тест за испитивање осјетљивости на шок представља тзв. *UN gap test* [89]. Тест се проводи помоћу уређаја који се састоји од челичне бешавне цијеве дужине 400 mm у коју се поставља испитивана супстанца. На доњем крају цијеве се налази стандардно експлозивно пуњење (160 g смјесе *RDX*/восак; (95/5) или смјеса *PETN/TNT* са најмање 50% *PETN*-а). Између стандардног експлозивног пуњења и испитиване супстанце се налази дистанцер (одстојник) израђен од полиметил метакрилата (енг. *polymethyl methacrylate, PMMA*). На горњем крају цијеве налази се испитна плоча.



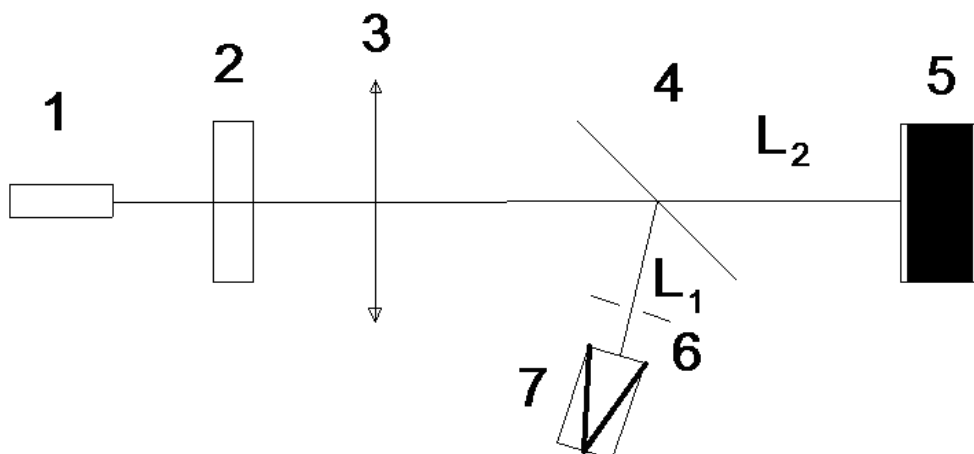
Слика број 96. Шема уређаја за извођење *UN gap testa*: A) одстојник; B) испитна плоча; C) челична цијев; D) испитивана супстанца; E) *PMMA* одстојник; F) стандардно експлозивно пуњење; G) носач детонатора; H) детонатор; J) пластична мембрана [89]

Одређивање резултата испитивања се врши на основу врсте фрагментације цијеве или на основу тога да ли је на испитној плочи настао отвор. Резултат теста се означава позитивним (+) и сматра се да је супстанца осјетљива на шок ако је цијев потпуно фрагментирана или испитна плоча показује отвор. У случају да се не испуњавају наведени критерији, резултат се означава негативно (-) и сматра се да супстанца није осјетљива на шок.

Табела број 52. Примјер резултата испитивања осјетљивости на шок појединих енергетских материја помоћу *UN gap testa* [89]

Супстанца	Густина $kg/m^3$	Дужина фрагментације ( <i>cm</i> )	Испитна плоча	Резултат
Амонијум-нитрат (гранулација 200 $\mu m$ )	540	40	Пробушена	+
Амонијум-нитрат/гориво уље 94/6	880	40	Пробушена	+
Амонијум-перхлорат (гранулација 200 $\mu m$ )	1190	0	Није оштећена	-
Нитрометан	1130	0	Није оштећена	-
<i>PETN</i> /лактоза, 20/80	880	40	Пробушена	+
<i>TNT</i> (ливени)	1510	20	Није оштећена	-
<i>TNT</i> (форма листића)	710	40	Пробушена	+

Потреба за изналажењем новог начина иницирања експлозивних материја ради повећања физичких и техничких потенцијала самих експлозивних материја, као и подизање нивоа безбједности приликом употребе, довело је до интензивних истраживања у области примјене ласерског импулса за иницирање експлозивних материја а, самим тим, појавила се и потреба за одређивањем осјетљивости енергетских материја на ласерски зрак [110]. Осјетљивост енергетских материја на ласерско зрачење се дефинише као густина енергије ласерског зрачења којој одговара 50% вјероватноћа иницирања експлозивне материје. У првом кораку се проводи серија прелиминарних тестова помоћу којих се одређује опсег густине енергије који одговара области енергије при којем долази до највјероватније иницијације испитиване материје. Сљедећи корак представља серија од 25 до 30 тестова са ласерским зрацима чија вриједност енергија се налази у претходно наведеној области. Резултати тестова се представљају у хистограму који, након обраде, представља зависност иницирања енергетске материје од густине енергије ласера [111].



Слика број 97. Шема уређаја за испитивање осјетљивости на ласерско зрачење: 1) оптички квантни генератор; 2) свјетлосни филтер; 3) сочиво; 4) раздјелник таласа; 5) испитивани узорак; 6) дијафрагма; 7) калориметар [111]

### 3. 1. 4. Топлота формирања

Карактеристика под називом топлота формирања представља једну од фундаменталних карактеристика енергетских материја која се користи приликом изучавања и вредновања енергетских материја. Топлота формирања једињења ( $H_f$ ) се дефинише као количина топлоте која се развија или апсорбује када се из стандардних стања формира 1 мол<sup>198</sup> једињења.

Табела број 53. Вриједности топлоте формирања за поједине примарне, секундарне и терцијарне експлозивне материје

Експлозивна материја	Топлота формирања	
	kJ/kg	kJ/mol
Оловни азид	+1612	+469
Живин фулминат	+1354	+386
Оловни стифнат-монохидрат	-1747	-855
Диазодинитрофенол <i>DDNP</i>	+989	+207

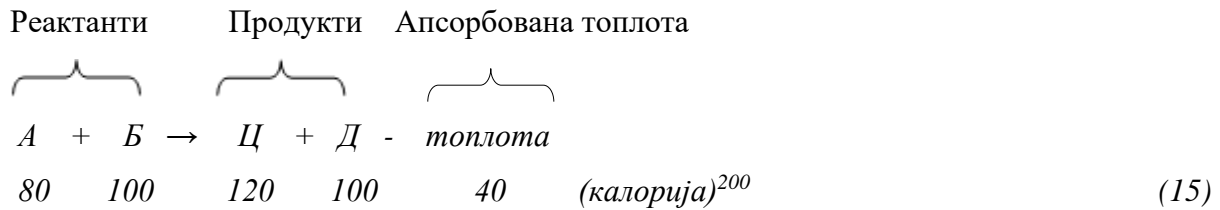
<sup>198</sup> Мол је мјерна јединица за количину твари која се користи у хемији за изражавање количине хемијске супстанце, дефинисане као количина неке супстанце која садржи тачно одређени број елементарних јединки те супстанце (нпр. атома, молекула, јона, електрона) онолико колики је број атома у 12 грама чистог угљиковог изотопа <sup>12</sup>C, тј. угљика са релативном атомском масом 12.

<i>TNT</i>	-115	-26
Пикринска киселина	-978	-224
<i>TNB</i>	-135	-28.7
Нитроглицерин	-1674	-380
<i>EGDN</i>	-1704	-259
<i>DEGDN</i>	-2120	-415.7
<i>TEGDN</i>	-2506	-601.7
<i>PETN</i>	-1703	-538
Тетрил	+118	+34
Нитрогванидин	-913	-95
<i>RDX</i>	+279	+62
<i>HMX</i>	+253	+75
<i>HNIW or CL - 20</i>	+1006	+460
<i>TATB</i>	-597	-154
<i>HNS</i>	+128	+58
<i>TACOT</i>	+4103	+1592.8
Амонијум-нитрат	-4428	-355
Амонијум-перхлорат	-2412	-283
Амонијум-динитрамид	-1087	-148
<i>HNF</i>	-393	-72

Енергетска материја садржи топлоту стварања која представља нето разлику између енергетске материје и њених елемената од којих је енергетска материја сачињена (који се конвенционално узимају као нула) а што представља топлотни садржај (енталпију). Приликом одигравања хемијске реакције између полазних компоненти (реактанти у реакцији) долази до настајања нових једињења (продукти реакције) при чему долази до настајања нових једињења (продукти реакције). Сам процес хемијске реакције може бити праћен или апсорпцијом (упијањем)<sup>199</sup> топлоте или десорпцијом (ослобађањем) топлоте. Реакције приликом којих долази до апсорпције топлоте називају се ендотермне реакције док се реакције приликом којих се ослобађа топлота називају екзотермне реакције.

<sup>199</sup> Апсорпција је физички или хемијски процес при коме атоми, молекули, јони улазе у масу апсорпционе материје. Под апсорпцијом енергије сматра се „упијање“ енергије.

- Ендотермна реакција (долази до апсорпције топлоте)



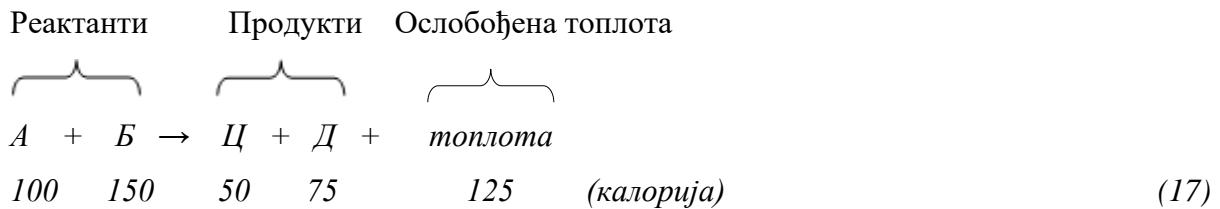
$$\Delta H = H_{(\text{ПРОДУКАТА})} - H_{(\text{РЕАКТАНАТА})} \quad (16)$$

$$= (120 + 100) - (80 + 100) = 40$$

$$\Delta H = + 40 \text{ kal}$$

Реактанти + енергија апсорбована од стране реактаната → продукти

- Егзотермна реакција (долази до ослобађања топлоте)



$$\Delta H = H_{(\text{ПРОДУКАТА})} - H_{(\text{РЕАКТАНАТА})} \quad (18)$$

$$= (50 + 75) - (100 + 150) = - 125$$

$$\Delta H = - 125 \text{ kal}$$

Реактанти → продукти + енергија ослобођена од стране реактаната

Приликом одигравања процеса декомпозиције енергетских материја, разлика између нето збира топлота формирања (садржаја топлоте) продуката хемијске реакције и нето збира реактаната у хемијској реакцији (енергетске материје) назива се топлота реакције

---

<sup>200</sup> Количина енергије или топлоте потребне да подигне температуру 1 грама воде за 1 степен целзијуса (4184 џула)

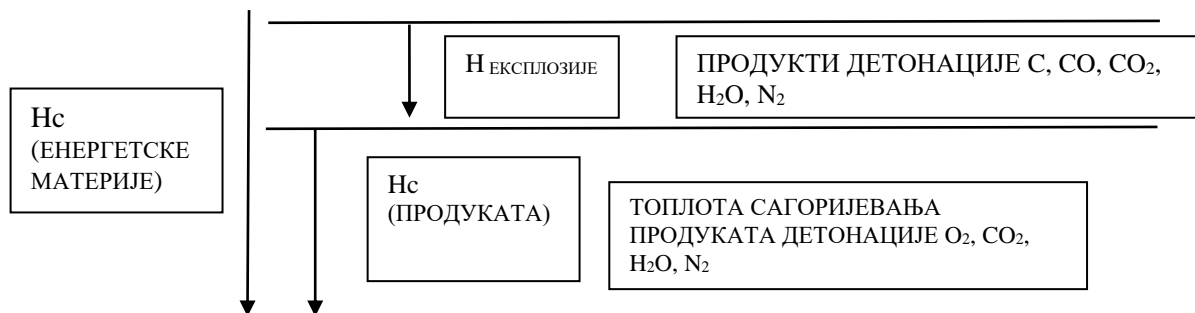
(енг. *heat of reaction*). Када у хемијској реакцији учествује кисеоник (процес оксидације) тада се топлота реакције назива топлота сагоријевања (енг. *heat of combustion*). Енергија ослобођена приликом декомпозиције енергетских материја путем процеса горења (дефлаграције) назива се топлота дефлаграције (енг. *heat of deflagration*), односно, када се енергија ослобађа процесом детонација, тада се назива топлота детонације (енг. *heat of detonation, kJ/mol*) или топлота експлозије (енг. *heat of explosion, kJ/kg*). За енергетске материје које показују позитивну вриједност топлоте стварања или малу негативну вриједност може се претпоставити да посједу, потенцијално, могућност максималног ослобађања топлоте приликом процеса декомпозиције.

### 3. 1. 5. Топлота експлозије и количина гасовитих продуката

Енергија ослобођена током процеса декомпозиције енергетских материја (детонација, дефлаграција, горење) манифестује се у виду топлотне енергије с обзиром на то да су наведени процеси егзотермне реакције оксидације. Ослобођена количина топлоте у адијабатским условима (када не долази до размјене топлоте са околином, односно, занемарљива количина топлоте се размјењује) назива се топлота експлозије ( $Q$ ) и представља важан индикатор радне способности енергетске материје. Уобичајено је да се за примарне и секундарне експлозиве топлота експлозије изражава као топлота експлозије при константној запремини ( $Q_V$ ) док се за пропеланте (ракетна горива) користи израз топлота експлозије при константном притиску ( $Q_P$ ). Топлота експлозије представља разлику између топлоте стварања енергетске материје и топлоте стварања продуката реакције декомпозиције енергетске материје. Израчунавање топлоте експлозије може се извршити помоћу израчунавања топлоте стварања енергетске материје путем познавања вриједности енергије везе за сваку појединачну везу која је присутна у структури енергетске материје и доступних литературних података топлоте стварања за настале продукте реакције. Топлота експлозије ( $H_{\text{EKSPLOZIJE}}$ ) се такође може одредити помоћу стандардних калориметријских метода кориштењем израза:

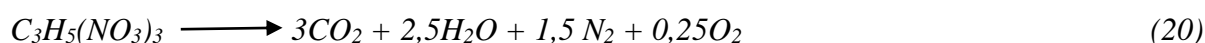
$$H_{\text{EKSPLOZIJE}} = H_C (\text{ЕНЕРГЕТСКЕ МАТЕРИЈЕ}) - H_C (\text{ПРОДУКАТА}) \quad (19)$$

при чему се измјери топлота сагоријевања енергетске материје ( $H_{C(\text{ЕНЕРГЕТСКЕ МАТЕРИЈЕ})}$ ) а вриједности топлоте сагоријевања продуката ( $H_{C(\text{ПРОДУКАТА})}$ ) су дати у стручној литератури.



Слика број 98. Шематски приказ одређивања топлоте експлозије

За одређивање топлоте експлозије, као и запремине продуката реакције насталих током декомпозиције енергетске материје, потребно је познавати гасовите продукте настале у процесу декомпозиције. На основу познавања гасовитих продуката декомпозиције, вриједности запремине продуката реакције указују на тзв. радну способност енергетске материје те се могу одредити рачунским путем. Метода рачунског одређивања запремине насталих продуката декомпозиције је приказана на примјеру детонације нитроглицерина (секундарног експлозива). Хемијска реакција декомпозиције (детонације) 1 мола нитроглицерина је приказана изразом:



при чему се нитроглицерин разлаже на 3 мола угљен-диоксида ( $CO_2$ ), 2,5 мола воде ( $H_2O$ ), 1,5 мола азота ( $N_2$ ) и 0,25 мола кисеоника ( $O_2$ ), (укупно  $3+2,5+1,5+0,25=7,25$  мола гасовитих продуката). Према Авогадровом закону<sup>201</sup>, запремина 1 мола било ког гаса износи 22,4 литре на стандардној температури ( $0^\circ C$  или 273,15 келвина) и стандардном притиску (1 атмосфера, 1000 милибара). На основу претходног, из 1 мола нитроглицерина (моларна маса<sup>202</sup> нитроглицерина износи 227,0865 грама) настаје 7,25

<sup>201</sup> У једнаким волуменима свих плинова при истим условима температуре и притиска налази се једнак број честица (молекула);  $pV = n RT$  (p-притисак; V-запремина; n-број мола; R-универзална гасна константа, 8,314 J/molK; T-температура).

<sup>202</sup> Моларна маса је маса једног мола хемијског елемента или хемијског једињења.

молова гасовитих продуката односно  $7,25 \times 22,4 = 162,4$  литре (162,4 дециметра кубна, 0,1624 метра кубна) гаса у стандардним условима. С обзиром на то да на запремину насталог гаса утичу температура и притисак, запремина насталих гасова на атмосферском притиску (1 атмосфера) и температури од  $20^{\circ}\text{C}$  (293,15 келвина) износи:

$7,25 \times 22,4 \times (293,15/273,15) = 174,29$  литра (дециметра кубна) по једном молу, односно, од 227,0865 грама нитроглицерина приликом детонације настаје  $0,1743 \text{ m}^3$  гасовитих продуката.

У табели 54 су приказане вриједности запремине ослобођеног гаса приликом детонације појединих експлозивних материја.

Табела број 54. Запремине ослобођеног гаса приликом детонације појединих експлозивних материја

Експлозивна материја	Запремина ослобођеног гаса	
	<i>l/kg</i>	<i>m<sup>3</sup>/kg</i>
Нитроглицерин	740	0,74
<i>PETN</i>	780	0,78
Хексоген	908	0,908
Октоген	908	0,908
Нитрогванидин	1077	0,1077
Пикринска киселина	831	0,831
Хексанитростилбен	747	0,747
Тринитротолуен	740	0,74

### 3. 2. Карактеристике примарних, секундарних и терцијарних експлозива

Узимајући у обзир намјену и механизам одвијања декомпозиције високоенергетских материја а на основи класификације према природи декомпозиције, поједине карактеристике примарних, секундарних и терцијарних експлозива (високоенергетских материја) специфичне су у односу на поједине карактеристике осталих група

високоенергетских материја (пропеланти, пиротехничке материје). У специфичне карактеристике примарних, секундарних и терцијарних експлозива уобрајају се:

- брзина детонације (енг. *velocity of detonation*)
- детонацијски притисак (енг. *detonation pressure*)
- експлозивна моћ и снага (енг. *explosive power or strength*)
- бризантност (енг. *brisance*).

### 3. 2. 1. Брзина детонације

У складу са теоријским поставкама механизма одвијања процеса детонације<sup>203</sup>, термин брзина детонације представља брзину кретања детонационог таласа кроз масу експлозивне материје. Уз услов максималне густоће и значајно већег пречника у односу на критични пречник експлозивног пуњења<sup>204</sup> експлозивне материје, брзина детонације представља карактеристику за сваку поједину експлозивну материју. Одређивање вриједности брзине детонације се врши рачунским и експерименталним методама.

Предложено је више различитих емпиријских израза за израчунавање брзине детонације високоенергетских материја међу којима су:

- Ротстејн и Петерсон метод (енг. *Rothstein and Peterson method*)
- Камлет-Јакобс метод (енг. *Kamlet-Jacob method, KJ method*)
- Стинов метод (*Stine method*).

Ротстејн и Петерсон [112] су успоставили линеарну зависност између брзине детонације на теоријској максималној густоћи и фактора  $F$  који је искључиво у функционалној зависности од хемијског састава и структуре енергетске материје.

---

<sup>203</sup> Теоретско објашњење механизма експлозивног процеса, детонације је дат у поглављу Експлозициони процеси.

<sup>204</sup> Пречник експлозивног пуњења представља физички услов за одигравање процеса детонације. Минимални пречник експлозивног пуњења представља вриједност пречника експлозивног пуњења при чему за мање вриједности пречника није могуће иницирати процес детонације и назива се критични пречник. Са повећањем пречника пуњења, брзина детонације расте све док не достигне максималну вриједност. За свако даље повећање пречника не долази до повећања брзине детонације. Пречник код којег долази до максималне вриједности брзине детонације назива се гранични пречник а брзина детонације се назива идеална брзина.

Зависност брзине детонације и фактора  $\Phi$  је приказана сљедећим емпиријским изразом:

$$F = 0,55D + 0,26 \quad (21)$$

$F$  – фактор који зависи од хемијског састава и структуре

$D$  – брзина детонације

Израчунавање фактора  $F$  се врши помоћу израза:

$$F = 100([n(O) + n(N) - (n(H)/2n(O)) + (A/3) - (n(B)/1,75) - (n(C)/2,5) - (n(D)/4) - n(E)/5])/MW) - G \quad (22)$$

при чему је:

$F$  – фактор  $\Phi$

$MW$  – молекулска маса

$n(O)$  – број атома кисеоника

$n(N)$  – број атома азота

$n(H)$  – број атома водоника

$A$  – константа, за ароматске експлозиве има вриједност 1 а за остале 0

$n(B)$  – број атома кисеоника у сувишку у односу на број атома кисеоника потребних за формирање угљен-диоксида и воде<sup>205</sup>

$n(C)$  – број атома кисеоника везаних двоструком везом са атомом угљика

$n(D)$  – број атома кисеоника везаних директно једноструком везом са атомом угљика у вези  $C-O-R$  гдје је  $R = H, NH_4$  или  $C$

$n(E)$  – број нитратних група (у облику нитратних естера или нитратних соли)

$G$  – константа, за течне експлозиве износи 0,4, за чврсте експлозиве 0

На основу претпоставке да приликом детонације појединих<sup>206</sup> експлозивних материја настале продукте претежно чине угљен-диоксид ( $CO_2$ ) и угљик ( $C$ ) а у мањем обиму

---

<sup>205</sup> Примјер реакције детонације нитроглицерина  $C_3H_5(NO_3)_3 \rightarrow 3CO_2 + 2,5H_2O + 1,5 N_2 + 0,25O_2$ , за стварање угљен-диоксида и воде потребно је 6+2,5 атома кисеоника, у експлозивној материји је присутно 9 атома кисеоника, сувишак износи 0,5 атома.

угљен-моноксид (CO), Камлет и Јакобс су предложили израз за израчунавање брзине детонације [19]:

$$D = A[HM^{1/2}(-\Delta X_{\delta})^{1/2}]^{1/2} (1+B\rho_0) \quad (23)$$

$D$  – брзина детонације

$A$  – константа вриједности 1,01

$H$  – број молова гасовитих продуката по граму експлозива

$M$  – средња вриједност молекулских тежина гасова

$B$  – константа вриједности 1,30

$\rho_0$  – густина нереагованог експлозива у граму/центиметру кубном

$\Delta X_{\delta}$  – топлота експлозије (детонације) изражена у калоријама по граму.

Према Стиновом методу [19], одређивање брзине детонације на основу атомског састава чистих и експлозивних смјеша, густине експлозивне материје и топлоте формирања се врши кориштењем израза:

$$D = 3,69 + (-13,85a + 3,95b + 37,74c + 68,11d + 0,6917 \Delta X_{\phi})(\rho/M) \quad (24)$$

уз услов да експлозивна материја има хемијски састав дат изразом  $C_aH_bN_cO_d$  при чему је:

$\rho$  – густина експлозивне материје  $g/cm^3$

$M$  – молекуларна маса

$\Delta X_{\phi}$  – топлота формирања,  $kcal/mol$

Из наведених израза уочљиво је да број присутних атома кисеоника има значајну улогу у процесу детонације, односно, да је карактеристика баланса кисеоника у корелацији са брзином детонације. Уопштено, брзина детонације се повећава када се баланс кисеоника приближава вриједности нула.

---

<sup>206</sup> Експлозивне материје са хемијским саставом CHNO (угљик, водоник, азот, кисеоник)

Експерименталне технике одређивања вриједности брзине детонације се заснивају на мјерењу временског интервала потребног да детонациони талас пређе познату удаљеност.

Подјела метода се врши на механичке, електричне, оптичке и радиографске<sup>207</sup> методе. Међу опште прихваћене експерименталне технике одређивања брзине детонације убрајају се:

- пин осцилографска техника (енг. *Pin Oscillographic Technique, POT*) (електрична метода)
- Дотрихова метода (енг. *Dautriche Method*) (механичка метода).

Пин осцилографска техника се заснива на кориштењу различитих јонизационих или електричних сонди<sup>208</sup> (слика 99) као сензора за детекцију времена доласка детонационог таласа у унапријед дефинисаним тачкама као и за мјерење времена ширења између познатих тачака уз кориштење осцилоскопа<sup>209</sup>. Основне компоненте ове технике су [13]:

- сонде
- реакциона посуда која садржи отпорну капацитивну ( $R-C$ ) мрежу са напајањем
- брзи осцилоскоп са плотером (уређај за исцртавање).

Сонде које се користе у пин осцилографској техници су „пин” типа пречника 1 *mm*. Карактерише их отпорност на високе температуре и притиске. Најчешће употребљаване сонде у електричним методама су:

- позициони давачи

---

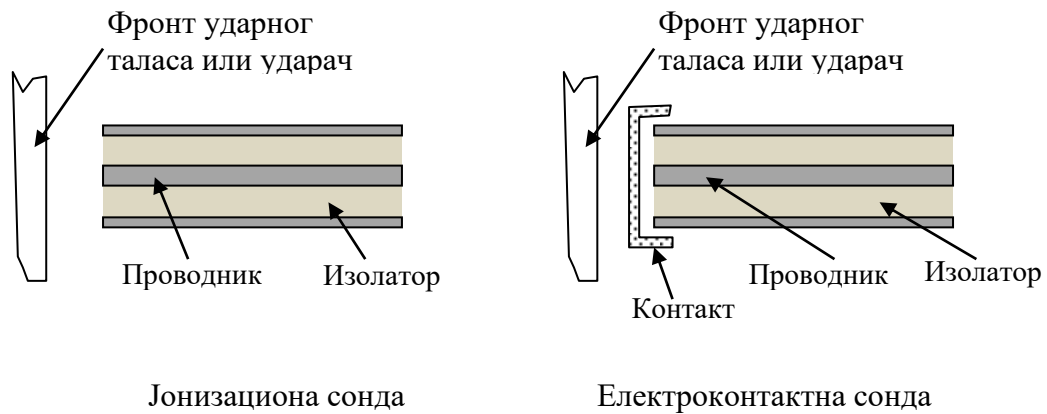
<sup>207</sup> Радиографија је техника фотографисања помоћу рендгенских зрака, гама зрака, неутрона или наелектрисаних честица. Када сноп радијације прође кроз хетерогени објекат, диференцијално се апсорбује зависно од дебљине, густине и хемијског састава озраченог објекта.

<sup>208</sup> Уређаји који услед динамичког притиска детонационог таласа продукују електрични импулс

<sup>209</sup> Осцилоскоп је уређај који служи за приказивање промјене електричног напона у неком временском периоду. На свом екрану приказује стваран облик напона који се мијења у времену, тако да се могу извести мјерења и поређења са другим таласним облицима.

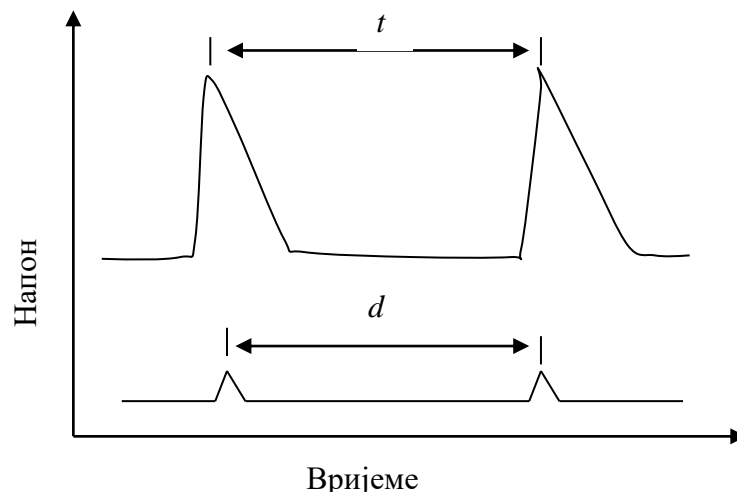
- прекидачког типа.

Позициони давачи продукују електрични сигнал када на осјетљиви дио сонде ударни (детонациони) талас или ударац испољи утицај. Соне прекидачког типа (јонизационе или електроконтактне) неопходно је повезати на спољашњи извор побуде [113].



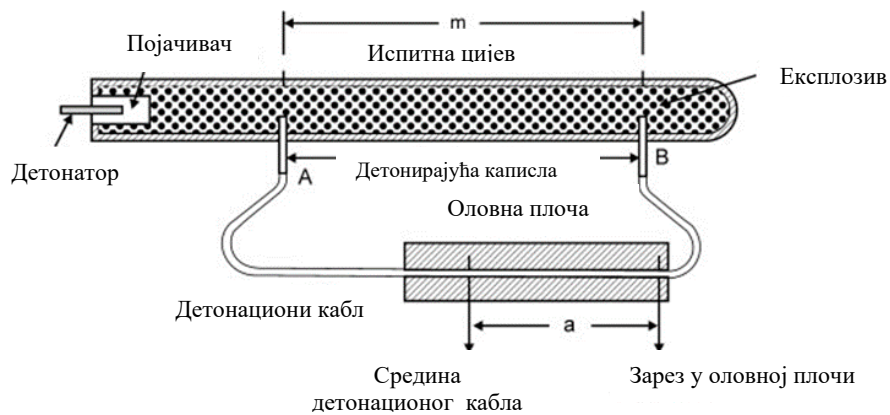
Слика број 99. Шематски приказ јонизационе и електроконтактне сонде које се употребљавају у пин осцилографској техници мјерења брзине детонације [113]

Резултати мјерења помоћу пиносцилографске технике се приказују графички помоћу осцилограма.



Слика број 100. Типични осцилограм приликом одређивања брзине детонације

Дотрихова метода представља једноставну и мање захтјевну технику мјерења брзине детонације која се заснива на чињеници да процеси који посједују различите линеарне брзине ширења за исто вријеме пређу различите удаљености. Ова метода показује стандардну грешку 4–5% и претежно се користи за цивилне експлозиве. Уређај за провођење Дотрихове методе је приказан на слици 101.



Слика број 101. Шема уређаја за провођење Дотрихове методе мјерења брзине детонације [13]

Иницирањем детонатора покреће се детонациони талас испитиване експлозивне материје који се креће дуж испитне цијеви. Доласком до детонирајуће каписле (А) која је спојена детонационим каблом за које је позната вриједност детонационе брзине са другом детонационом капислом Б, активира је при чему се новонастали детонациони талас креће према оловној плочи. Даљим кретањем детонационог таласа испитиване материје долази до активирања детонаторске каписле Б чији се детонациони талас такође креће према оловној плочи али супротног смјера у односу на детонациони талас каписле А. На мјесту судара два детонациона таласа у оловној плочи настаје зарез. На основу математичких израза за пређени пут и сређивањем израза, изведен је израз помоћу којег се врши одређивање брзине детонације:

$$D_{\text{УЗОРКА}} = D_{\text{ДЕТОНАЦИОНОГ КАБЛА}} \times (m / 2a) \quad (25)$$

$D_{\text{УЗОРКА}}$  – брзина детонације испитиваног узорка

$D_{\text{ДЕТОНАЦИОНОГ КАБЛА}}$  – брзина детонационог таласа за детонациони кабл (позната вриједност)

$m$  – дужина размака између позиција на којима се налазе детонаторске каписле

$a$  – дужина између средине детонационог кабла и насталог зареза.

У табели 55 су приказане вриједности брзине детонације за поједине примарне, секундарне, терцијарне експлозиве.

Табела број 55. Вриједности брзине детонације појединих експлозивних материја [13,19,20]

Експлозивна материја	Брзина	Експлозивна материја	Брзина
	детонације		детонације
	m/s		m/s
<i>TNT</i> ( $\rho = 1,64 \text{ g/cm}^3$ )	6950	<i>PBX 9502</i> ( $\rho = 1,895 \text{ g/cm}^3$ )	7706
<i>TNT</i> ( $\rho = 1,53 \text{ g/cm}^3$ )	6810	<i>PBX 9501</i> ( $\rho = 1,832 \text{ g/cm}^3$ )	8802
<i>TNT</i> ( $\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3$ )	5000	<i>PAThX-1</i> ( $\rho = 1,944 \text{ g/cm}^3$ )	9370
<i>RDX</i> ( $\rho = 1,80 \text{ g/cm}^3$ )	8750	<i>PAThX-2</i> ( $\rho = 1,923 \text{ g/cm}^3$ )	9220
<i>RDX</i> ( $\rho = 1,66 \text{ g/cm}^3$ )	8240	<i>PAThX-3</i> ( $\rho = 1,958 \text{ g/cm}^3$ )	9500
<i>RDX</i> ( $\rho = 1,20 \text{ g/cm}^3$ )	6770	<i>PAX-2A</i> ( $\rho = 1,773 \text{ g/cm}^3$ )	8420
<i>RDX</i> ( $\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3$ )	6100	<i>LX-14</i> ( $\rho = 1,835 \text{ g/cm}^3$ )	8800
<i>PETN</i> ( $\rho = 1,76 \text{ g/cm}^3$ )	8270	<i>HMX</i> ( $\rho = 1,89 \text{ g/cm}^3$ )	8690
<i>PETN</i> ( $\rho = 1,60 \text{ g/cm}^3$ )	7750	<i>HMX/TATB</i> ( $\rho = 1,9 \text{ g/cm}^3$ )	8100
<i>PETN</i> ( $\rho = 1,50 \text{ g/cm}^3$ )	7480	<i>HMX/NTO</i> ( $\rho = 1,89 \text{ g/cm}^3$ )	8360
<i>PETN</i> ( $\rho = 1,26 \text{ g/cm}^3$ )	6590	<i>HNB</i> ( $\rho = 2,00 \text{ g/cm}^3$ )	9400
<i>TATB</i> ( $\rho = 1,94 \text{ g/cm}^3$ )	8000	<i>CL-20</i> ( $\rho = 2,00 \text{ g/cm}^3$ )	9400
<i>TACOT</i> ( $\rho = 1,85 \text{ g/cm}^3$ )	7250	<i>ONC</i> ( $\rho = 2,1 \text{ g/cm}^3$ )	10100
<i>PYX</i> ( $\rho = 1,75 \text{ g/cm}^3$ )	7450	<i>TETRYL</i> ( $\rho = 1,53 \text{ g/cm}^3$ )	7075
<i>BTDAONAB</i> ( $\rho = 1,97 \text{ g/cm}^3$ )	8321	<i>NITROGYCERIN</i> ( $\rho = 1,6 \text{ g/cm}^3$ )	7700
<i>ANTA</i> ( $\rho = 1,82 \text{ g/cm}^3$ )	8460	<i>Mercury fulminate</i> ( $\rho = 3,96 \text{ g/cm}^3$ ) <sup>1</sup>	4740
<i>DANTNP</i> ( $\rho = 1,84 \text{ g/cm}^3$ )	8120	<i>Pb azide</i> ( $\rho = 3,8 \text{ g/cm}^3$ ) <sup>1</sup>	4500
<i>PADNT</i> ( $\rho = 1,85 \text{ g/cm}^3$ )	6628	<i>DDNP</i> ( $\rho = 1,58 \text{ g/cm}^3$ )	6900

<sup>1</sup> – насипна густина

### 3. 2. 2. Детонацијски притисак

Максимални динамички притисак на фронталном дијелу детонационог таласа који се креће кроз масу енергетске материје назива се детонацијски притисак (енг. *detonation pressure*). Помоћу експерименталних резултата, утврђена је линеарна зависност између брзине детонације (детонационог таласа) и детонацијског притиска и представљена је помоћу израза:

$$DP (p_{CJ}) = 93,3D - 456 \quad (26)$$

$DP$  – детонацијски притисак или Чепмен-Жугеов притисак (енг. *Chapman-Jouget pressure, p<sub>CJ</sub>*),

$D$  – брзина детонације.

Кук је предложио једноставан емпиријски израз за практичну примјену када се не захтијева високи ниво тачности:

$$p_{CJ} = 1/4D^2 \quad (27)$$

$\rho$  – густина пуњења ( $\text{g/cm}^3$ )

$D$  – брзина детонације ( $\text{m/s}$ ).

Имајући у виду да се процес детонације одиграва при веома високим притисцима (2–50  $\text{GPa}$ ,  $10^5$  атмосфера), гасовити продукти детонације у знатној мјери одступају од понашања идеалних гасова<sup>210</sup>. Кориштење Ван дер Валсовог израза<sup>211</sup> је у мањој мјери смањило одступање понашања гасовитих продуката, односно, није задовољило одговарајући ниво слагања теоријских и експерименталних резултата.

---

<sup>210</sup> Гасови који се понашају у складу са Авогадровим законом се сматрају идеалним гасовима.

<sup>211</sup> Закон кореспондентних стања тврди да сви флуиди чији се притисак, температура и запремина мјере у редукованим величинама имају исту једначину стања и исти фактор компресибилности, гдје се редуковане величине добијају дијелењем величине са њеном вриједношћу у критичној тачки.

Вршени су различити покушаји изналажења одговарајућег емпиријског израза, међу којим се налази и метода Бекер-Кистиаковски-Вилсон (енг. *Becker-Kistiakowsky-Wilson Method, BKW*), а на основу којег је могуће тачније описати понашање гасовитих продуката детонације. *BKW* метод укључује притисак, температуру, унутрашњу енергију, густину и брзину детонације.

$$DP = nRT\rho(1+xe^{\beta x}) \quad (28)$$

$$x = b\rho\kappa T^{-\alpha} \quad (29)$$

$DP$  – детонациони притисак

$n$  – број молова супстанце

$R$  – универзална гасна константа

$T$  – температура

$\rho$  – густина материје

$\alpha$  – константа вриједности 0,25

$\beta$  – константа вриједности 0,3

$\kappa$  – заједничка константа

$b$  – коволумен гаса

За одређивање детонационог притиска методом *BKW* користе се два сета података, један сет са подацима за експлозивне материје са позитивним билансом кисеоника и други сет података за експлозивне материје са негативним билансом кисеоника. Ова метода се користи као основа за израду различитих софтверских програма за израчунавање карактеристика експлозивне материје (енг. *RUBYCODE, STRETCH BKW, TIGERCODE, LOTUSES*).

Међусобна зависност брзине детонационог таласа и притиска детонационог таласа је приказана помоћу израза:

$$DP(p_{cJ}) = (\rho D^2)/(\gamma+1) \quad (30)$$

$\rho$  – густина експлозивне материје

$D$  – брзина детонационог таласа

$\gamma$  – политропни експонент за продукте детонације (за експлозивне материје  $\approx 3$ ).

Када се врше испитивања која захтијевају високи ниво тачности, вриједности детонационог притиска се одређују тзв. методом неусклађене импеданце. Техника испитивања се спроводи на начин да се детонација експлозива врши у контакту са водом те се након мјерења пренесене брзине детонације на воду врши прорачун детонационог притиска испитиваног експлозива помоћу израза:

$$DP(p_{CJ}) = [P_v(\rho_v U_{sv} + \rho_x D)] / (2\rho_v U_{pv}) \quad (31)$$

$DP(p_{CJ})$  – детонациони притисак

$P_v$  – пренесени притисак ударног таласа на воду

$\rho_v$  – густина воде

$U_{sv}$  – пренесена брзина ударног таласа на воду

$\rho_x$  – густина експлозива

$D$  – брзина детонационог таласа

$U_{pv}$  – брзина честица у води

при чему је:

$$P_v = \rho_v U_{sv} U_{pv} \quad (32)$$

Вриједности  $U_{sv}$  се одређују експерименталним путем помоћу тзв. акваријумске технике при чему се вриједности  $U_{pv}$  израчунавају помоћу израза:

$$U_{sv} = a + bU_{pv} \quad (33)$$

$a$  – 1,51  $mm\mu s^{-1}$

$b$  – 1,85.

Табела број 56. Вриједности детонацијског притиска појединих експлозивних материја

[13, 19, 20]

Експлозивна материја	Детонацијски		Експлозивна материја	Детонацијски	
	притисак			притисак	
	kbar		kbar		
<i>TNT</i> ( $\rho = 1,64 \text{ g/cm}^3$ )	210		<i>PETN</i> ( $\rho = 1,60 \text{ g/cm}^3$ )	266	
<i>TNT</i> ( $\rho = 1,53 \text{ g/cm}^3$ )	171		<i>PETN</i> ( $\rho = 1,50 \text{ g/cm}^3$ )	240	
<i>TNT</i> ( $\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3$ )	67		<i>PETN</i> ( $\rho = 1,26 \text{ g/cm}^3$ )	160	
<i>RDX</i> ( $\rho = 1,80 \text{ g/cm}^3$ )	347		<i>HMX</i> ( $\rho = 1,89 \text{ g/cm}^3$ )	390	
<i>RDX</i> ( $\rho = 1,66 \text{ g/cm}^3$ )	293		<i>HNB</i> ( $\rho = 2,00 \text{ g/cm}^3$ )	406	
<i>RDX</i> ( $\rho = 1,20 \text{ g/cm}^3$ )	152		<i>CL-20</i> ( $\rho = 2,00 \text{ g/cm}^3$ )	420	
<i>RDX</i> ( $\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3$ )	107		<i>ONC</i> ( $\rho = 2,1 \text{ g/cm}^3$ )	500	
<i>PETN</i> ( $\rho = 1,76 \text{ g/cm}^3$ )	315				

Експлозивна моћ или снага експлозива представља мјеру способности вршења корисног рада. Такође се користи и термин потенцијал експлозива који представља укупну количину топлоте експлозије и запремине гасовитих продуката за дату количину експлозивне материје. Топлота експлозије и запремина ослобођених гасовитих продуката се одређује према претходно наведеним методама. Експлозивна моћ или снага се израчунава из израза:

$$\text{експлозивна снага} = \text{топлота експлозије} \times \text{запремина гасовитих продуката} \quad (34)$$

Ради међусобног поређења експлозивне снаге експлозивних материја, користи се тзв. индекс снаге који се израчунава на основу израза:

$$\text{индекс снаге} = (\text{експлозивна снага} / \text{експлозивна снага пикринске киселине}) \times 100 \quad (35)$$

при чему се као референтни експлозив користи пикринска киселина чија топлота експлозије износи  $3250 \text{ kJ/g}$  а запремина гасова  $0,831 \text{ dm}^3$ .

Табела број 57. Индекс снаге за различите енергетске материје (стандард пикринска киселина)

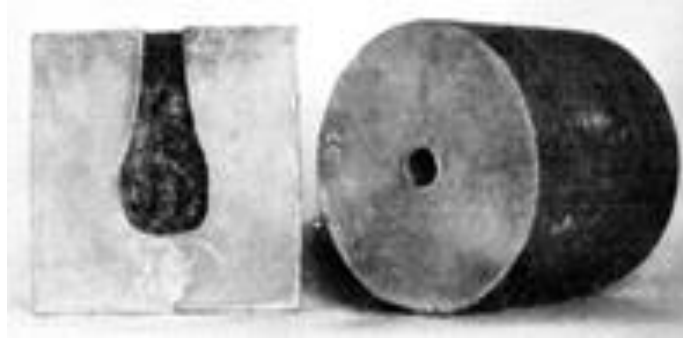
Назив	Индекс снаге %
-------	----------------

Оловни азид	13
Живин фулминат	14
Оловни трирезотцинат монохидрат	21
TNT	118
Пикринска киселина	100
Нитроглицерин	170
Нитрогликол	182
PETN	167
Тетрил	132
Нитрогванидин	99
RDX	169
HMX	169
DATB	132
TATB	101
Хексанитростилбен	109

Експерименталне методе које се користе за одређивање вриједности експлозивне снаге или јачине су:

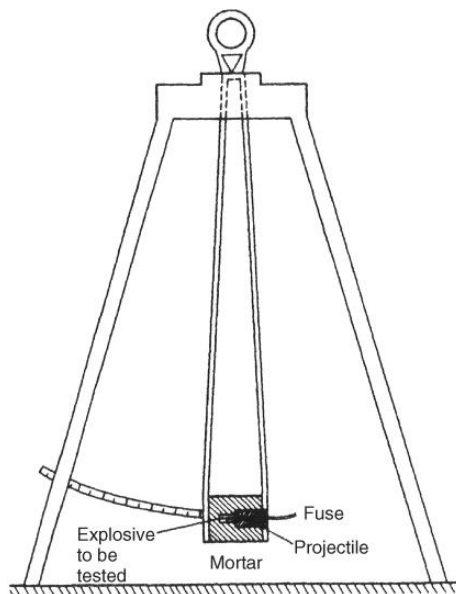
- Траузлов тест (*Траузал*) или тест са оловним блоком
- тест са балистичким минобацачем (*ballistic mortar test*).

Мјерење експлозивне снаге или јачине експлозива помоћу Траузловог теста се заснива на мјерењу повећања запремине унутар оловног блока након детонације испитиване материје. Узорак испитиваног експлозива (10 g) умотан у фолију се поставља у претходно припремљену шупљину пречника 25 mm и дубине 125 mm у оловном блоку 200 x 200 mm. Шупљина се допуни пијеском и врши се детонација узорка помоћу електричне каписле. Након детонације врши се мјерење повећања запремине шупљине. Резултат мјерења се назива Траузлов број (енг. *Trauzl number*) за дати експлозив [114].



Слика број 102. Мјерење експлозивне снаге помоћу Траузловог теста

Испитивање експлозивне снаге помоћу теста балистичког минобацача се врши кориштењем уређаја приказаног на слици 103. Унутар тзв. бацача се налази пројектил и испитивана материја која, након иницирања, ствара гасовите продукте детонације усљед чега долази до покретања пројектила са једне стране и отклона тзв. бацача чија се вриједност читава на мјерној летви.



Слика број 103. Уређај за одређивање експлозивне снаге методом балистичког минобацача

#### 3. 2. 4. Бризантност

Бризантност експлозива представља снагу потребну за разбијање, односно, брзину којом експлозив достиже максимални притисак која представља мјерило јачине

експлозива. Бризантност експлозива се разликује од укупне радне способности експлозива. На бризантност експлозивних материја утиче детонациони притисак, брзина детонационог притиска и густоћа експлозивне материје. Међусобне релације су приказане помоћу израза:

$$\text{Бризантност} = \rho D^2 \quad (36)$$

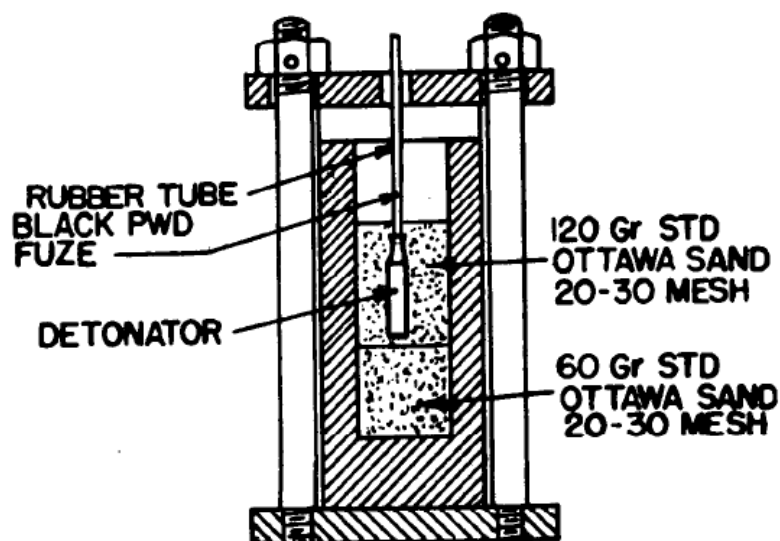
$\rho$  – густина експлозива

$D$  – брзина детонационог таласа.

Практични значај одређивања бризантности је присутан приликом дефинисања ефикасности испитиване експлозивне материје (фрагментација и слично). Одређивање и употреба резултата испитивања бризантности се претежно користи у Француској и Руској Федерацији. Између различитих метода одређивања бризантности експлозивних материја најчешће примјењиване методе су:

- тест „дробљења пијеска” (*sand crush test*)
- тест „удубљења плоча” (*plate dent test*).

Тест „дробљења пијеска” се заснива на одређивању стандардне количине пјеска који је смрвљен стандардном масом експлозива. За извођење експерименталних испитивања употребљава се уређај приказан на слици 104.



*Rubber tube* – гумена цијев; *black pwd fuze* – запаљивач од црног барута; *detonator* – детонатор са испитиваним узорком; *120 gr STD Ottawa sand 20–30 mesh* – 120 грама стандардног пијеска (тзв. отава пијесак) гранулације 20–30 меша; *60 gr STD Ottawa sand 20–30 mesh* – 60 грама стандардног пијеска (тзв. отава пијесак) гранулације 20–30 меша

Слика број 104. Уређај за одређивање бризантности методом „дробљеног пијеска” [115]

С обзиром на то да је бризантност експлозивних материја у високој корелацији са вриједностима детонационе брзине и притиска а који значајно зависе од хемијске структуре, развијени су емпиријски изрази за одређивање бризантности експлозивних материја на основу елементарног састава и молекулске структуре испитиване материје. За експлозивне материје са општом формулом елементарног састава  $C_aH_bN_cO_d$  вриједности за бризантност се одређују на основу емпиријског израза:

$$Bris_{relTNT} = 85,5 + Bris_{core} - 35,96 Bris^- + 19,69 Bris^+ \quad (37)$$

$Bris_{relTNT}$  – релативна бризантност у односу на TNT

$Bris_{core}$  – бризантност језгра које се заснива на броју атома азота и расподјели атома кисеоника између атома угљика и водоника

$Bris^-$  – корекциони фактор

$Bris^+$  – корекциони фактор

при чему се бризантност језгра ( $Bris_{core}$ ) израчунава на основу израза:

$$Bris_{core} = 4,812c + 2,556(d-a-b/2) \quad (38)$$

Вриједности корекционих фактора  $Bris^-$  и  $Bris^+$  су одређене у зависности од хемијске структуре и фрагмената експлозивних материја [115].

Табела број 58. Вриједности корекционог фактора у зависности од хемијске структуре и фрагмената [116]

---

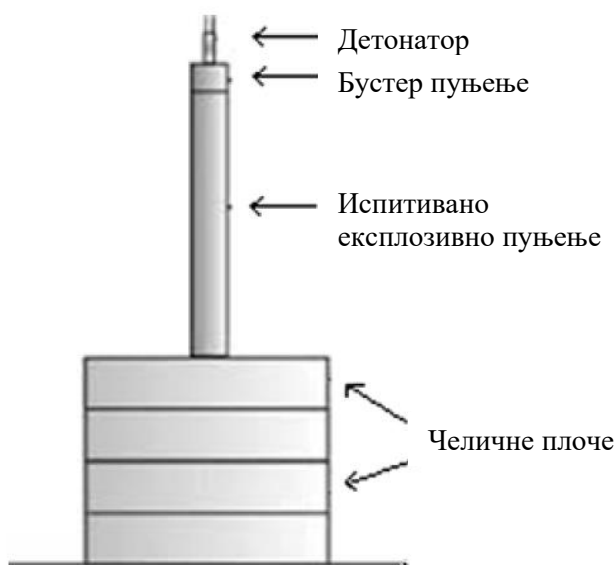
Експлозивно једињење или молекуларни фрагмент

Вриједност  $Bris^-$   
или  $Bris^+$

---

$(CH_2ONO_2)_n$ или $C(CH_2ONO_2)_n$ или $(CH_2-NNO_2)_n$ или $(-HN-NO_2)_n$ при чему је $n \leq 4$ и ароматични $-N(NO_2)-$	$Bris^+ = 1,0$
Цијанатни јон	$Bris^- = 1,0$
Само $-ONO_2$ везан са $-COO-$	$Bris^- = 2,0$
$-C-O-C-$	$Bris^- = 1,5$
Нитраминска група	$Bris^- = 1,0$

Тест удубљења плоче представља испитивање способности експлозивне материје да приликом детонације проузрокује стварање удубљења на челичној плочи или неком другом кориштенем материјалу. Уређај за провођење теста удубљења плоче се састоји од више челичних плоча кружног облика (пречник плоче  $41,3\text{ mm}$  и укупне висине  $203\text{ mm}$ ) вертикално постављене на носиву плочу. На врху челичних плоча се налази испитивани узорак експлозивне направе.



Слика број 105. Уређај за одређивање бризантности методом „удубљења плоче“ [117]

Након детонације испитиваног експлозивног пуњења врши се мјерење дубине насталог удубљења помоћу микрометра [117].

Осим експерименталних резултата, могуће је и емпиријско одређивање величине удубљења помоћу израза:

$$\%f_{brisance, plate\ dent, TNT} = 14,911\delta \quad (39)$$

$\%f_{brisance, plate\ dent, TNT}$  – релативна бризантност испитиване супстанце (вриједност у односу на бризантност пуњења TNT-а, густине  $1,63 \text{ g/cm}^3$  чија дубина удубљења износи  $6,706 \text{ mm}$ )

$\delta$  – дубина удубљења у милиметрима

Такође се на основу вриједности дубине удубљења може израчунати вриједност детонационог притиска израженог у kbar (килобар):

$$P_{detonacije} = 33,374\delta \quad (40)$$

Осим претходно наведених карактеристика примарних, секундарних и терцијарних експлозива, за материје које имају примјену у војне сврхе важну улогу имају и друге особине као што су:

- испарљивост
- токсичност
- хигроскопност
- густина
- животни вијек (функционално вријеме)
- доступност, цијена, делаборација или рециклирање
- еколошка прихватљивост.

### 3. 3. Карактеристике пропеланата

Карактеристике погонских материја се могу подијелити у двије групе карактеристика. Прву групу представљају основне карактеристике претходно описане у поглављу 3. 1. под називом Опште карактеристике. Специфична намјена и употреба погонских материја (пропеланата) условиле су и дефинисање специфичних особина ове класе енергетских материја које представљају другу групу карактеристика. За класу енергетских материја под називом пропеланти (погонске материје) разликујемо:

- специфичне карактеристике погонских материја за муницију (пропеланти за муницију)
- специфичне карактеристике за ракетне погонске материје (ракетни пропеланти).

### 3. 3. 1. Специфичне карактеристике пропеланата за муницију

Од особина пропеланата за муницију чија је основна улога покретање и кретање различитих врста пројектила у веома знатној мјери зависе карактеристике оружја, односно, борбених система у којима се пројектили употребљавају. Осим основних карактеристика (с обзиром на то да се ради о енергетским материјама), када се говори о пропелантима за муницију у важне карактеристике се убрајају:

- константна сила (енг. *Force constant*)
- коефицијент брзине горења (енг. *Burning Rate Coefficients*)
- живост (енг. *Vivacity*)
- брзина пројектила на „устима цијеви” (енг. *Muzzle Velocity*)
- ефикасност система оружја и пуњења пропеланта (енг. *Efficiencies of Gun System and Charge*).

Константна сила представља максималну количину обављеног рада помоћу јединичне масе пропеланта, односно, количини енергије ослобођене декомпозицијом јединичне масе пропеланта. Означаваче се са  $F$  и одређује се помоћу израза:

$$F = nRT_0 \quad (41)$$

$F$  – константна сила

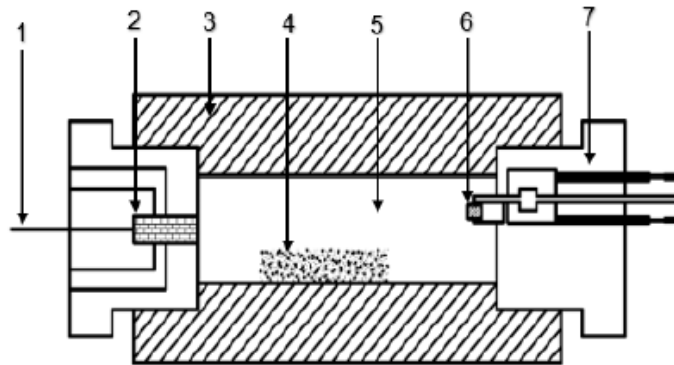
$n$  – број молова гасовитих продуката по јединици масе пропеланта

$R$  – универзална гасна константа ( $8,314 \text{ J/molK}$ )

$T$  – адијабатска температура горења приликом распада пропеланта.

За одређивање вриједности константне силе користи се метода затворене посуде (енг. *closed vessel test, CVT*). Унутар металне посуде познате запремине ( $100 \text{ cm}^3$ ) налази се испитивани узорак пропеланта (маса узорка =  $1,5 \text{ g}$ ; густина  $0,2 \text{ g/cm}^3$ ). Помоћу блока за

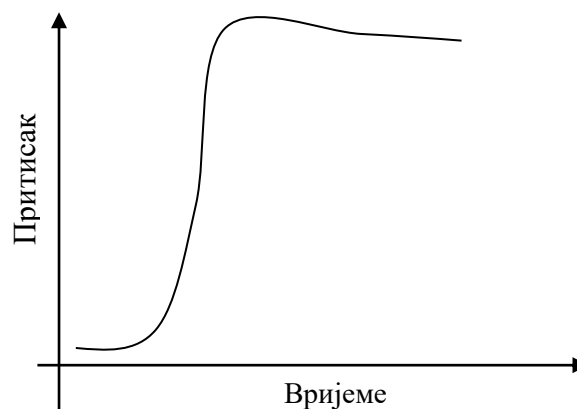
паљење врши се иницирање узорка и мјерење промјене притиска у комори (притисак гасовитих продуката сагоријевања пропеланта) у зависности од времена (од момента паљења до момента престанка процеса сагоријевања) [118].



1 – коаксијални кабл за пренос података; 2 – претварач притиска у електрични сигнал; 3 – зид металне посуде; 4 – испитивани узорак; 5 – простор унутар металне посуде; 6 – запаљивач; 7 – блок за паљење

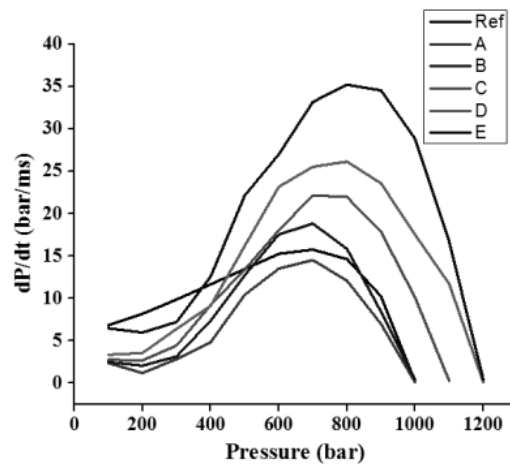
*Слика број 106. Шема уређаја за извођење методе затворене посуде за одређивање константне силе [118]*

Резултати испитивања су приказани графички, помоћу тзв. профила притиска, који представља промјену притиска у зависности од времена.



*Слика број 107. Графички приказ вриједности консантне силе (профил притиска)*

На основу профила притиска могуће је вршити посматрање и анализу брзине промјене притиска у зависности од притиска  $Dp/Dt$  (bar/ms) =  $f(P)$  (bar).



Слика број 108. Графички приказ брзине промјене притиска у зависности од вриједности притиска [118]

Ова техника се користи за контролу пропеланата током процеса производње и са становишта животног вијека на начин упоређивања резултата испитиване материје са стандардним вриједностима исте материје.

Погонски пропеланти за муницију, током процеса горења, понашају се у складу са Пиобертским законом који гласи: „Сагоревање се одвија паралелним слојевима где се површина зрна повлачи, слој по слој, нормално на површину у свакој тачки” [119]. У складу са претходно наведеним законом, брзина горења ( $r$ ) зависи од притиска ( $P$ ) на површини која гори и може се представити изразом:

$$r_B = \beta P^\alpha \quad (42)$$

$r_B$  – брзина горења (mm/s)

$\beta$  – коефицијент брзине горења (mm/s)

$\alpha$  – индекс притиска (експонент брзине горења)

$P$  – притисак (bar).

Коефицијенти  $\alpha$ ,  $\beta$  имају константне вриједности за сваку поједину формулацију пропеланата. Коефицијент  $\beta$  се назива коефицијент брзине горења. Вриједности коефицијент  $\alpha$  се креће у границама између 0,8–0,9.

Брзина сагоријевања ( $r_B$ ) контролише се различитим параметрима као што су притисак, калоријска вриједност, густина, топлотна проводљивост, почетна температура погонског горива, величина честица кристалног састојка, садржај испарљивих материја и степен гелатизације нитроцелулозе у погонском гориву итд.

У специфичне карактеристике погонских пропеланата за муницију сврстава се карактеристика под називом „живост” ( $L$ ) која представља понашање пропеланта у односу на брзину сагоријевања. „Живост” се одређује експериментално помоћу методе затворене посуде и одређује се помоћу емпиријског израза [120]:

$$L(t) = (dp(t)/dt)/(p(t)*p_m) \quad (43)$$

$L(t)$  – живост (у зависности од времена)

$dp(t)/dt$  – брзина промјена притиска

$p(t)$  – притисак у времену

$p_m$  – максимални притисак измјерен методом затворене посуде.

Једну од значајних особина различитих оружја и борбених система у смислу ефеката на циљу представља брзина пројектила на „устима цијеви” (навојна брзина) датог оружја. Брзина кретања пројектила зависи од количине пропеланта, карактеристика пропеланта, масе пројектила и дужине цијеви. Један од параметара који се користи ради упоређивања карактеристике пропеланата за муницију представља брзина којом се креће пројектил у моменту напуштања цијеви под називом брзина на „устима цијеви”. Одређивање навојне брзине пројектила се врши помоћу емпиријских израза или експерименталних података добијених помоћу хронографа<sup>212</sup>.

Ефикасност система оружја и пуњења пропеланта представља карактеристику помоћу које се одређују особине оружног система и муниције. Величина потисног притиска (зависи од карактеристика пропеланта) утиче на тражене особине оружног система и

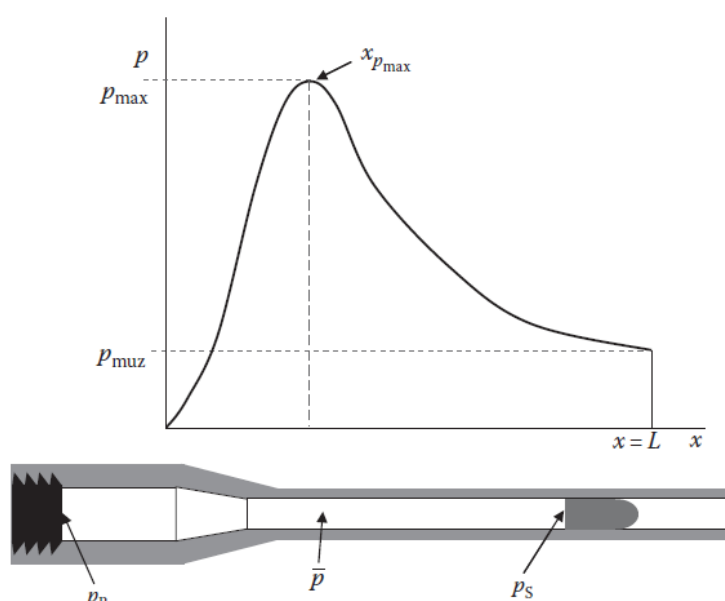
---

<sup>212</sup> Хронограф је специфичан тип сата који се користи као штоперца у комбинацији са сатом на екрану.

кориштене муниције. Промјене притиска у зависности од кретања пројектила у цијеви оружја (слика 109) зависи такође од карактеристика кориштених пропеланата.

Оцјена ефикасности система оружја и пуњења пропеланата се врши помоћу два основна параметра:

- пиезометријска ефикасност (ефикасност притиска)
- балистичка ефикасност (ефикасност енергије).



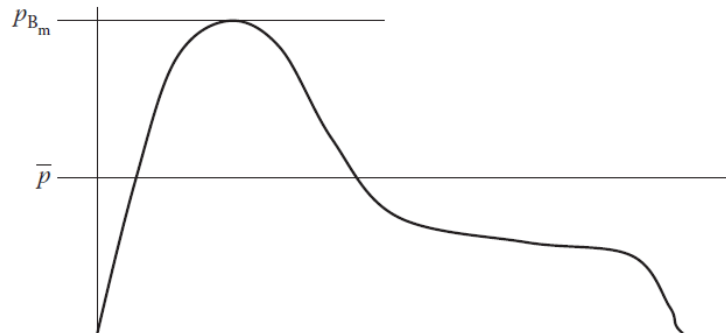
Слика број 109. Промјене притиска у зависности од кретања пројектила у цијеви оружја,  $p_{max}$  – максимални притисак у цијеви оружја;  $p_{muz}$  – притисак на „устима” цијеви оружја;  $x_{p,muz}$  – удаљеност од почетне позиције пројектила до позиције у цијеви гдје се јавља максимални притисак;  $x = L$  – удаљеност [121]

Пиезометријска ефикасност ( $\eta_P$ ) представља однос средње вриједности притиска током цијелог балистичког циклуса и максималног притиска затварача<sup>213</sup>. Вриједност пиезометријске ефикасности се одређује помоћу емпиријског израза:

$$\eta_P = (1/2)MV^2/A_S SP_{BM} \quad (44)$$

<sup>213</sup> Максимални притисак затварача је термин који се користи у унутрашњој балистици и ватреном оружју (било малокалибарском било артиљеријском) који описује количину силе коју потисни гасови врше уназад на затварач или затварач ватреног оружја или затварач када се испали пројектил.

$\eta_P$  – пиезометријска ефикасност,  
 $M$  – маса пројектила,  $kg$   
 $V$  – брзина пројектила на устима цијеве,  $ms^{-1}$   
 $A_S$  – површина попречног пресека цијеве,  $m^2$   
 $S$  – дужина путање пројектила,  $m$   
 $P_{BM}$  – максимални притисак затварача,  $Nm^{-2}$ .



Слика број 110. Графички приказ криве пиезометријске ефикасности [76]

Балистичка ефикасност се дефинише као однос укупног рада извршеног на пројектилу и укупног радног потенцијала пропеланта. Одређивање балистичке ефикасности се врши помоћу емпиријског израза [13]:

$$\eta_B = (1/2)M_E V_P / E_{in} \quad (45)$$

$\eta_B$  – балистичка ефикасност  
 $M_E$  – ефективна маса пројектила  
 $V_P$  – брзина пројектила на излазу из „уста” цијеве,  $ms^{-1}$   
 $E_{in}$  – укупна енергија садржана у пропеланту,  $J$ .

### 3. 3. 2. Специфичне карактеристике ракетних пропеланата

Кретање различитих ракетних система (ракета) се одвија помоћу млазног погона чије функционисање се заснива на принципу трећег Њутновог закона и теорије кретања, који дефинише да су силе акције и реакције једнаке и супротних смјерова. Када се из

посуде истискује флуид кроз млазницу, сила која изазива потискивање, узрокује појаву силе супротног смјера која покреће посуду. Назив ракета се односи на цијели систем док се уређај, који је дио ракетног система, у коме долази до претварања хемијске енергије у енергију кретања назива ракетни мотор. Од карактеристика пропеланата који се користе у ракетном мотору у великој мјери зависе и карактеристике ракетног система.

Осим општих карактеристика енергетских материја и с обзиром на функционалну улогу ракетних пропеланата, у специфичне карактеристике које се односе на ракетне пропеланте се сврставају:

- брзина сагоријевања (енг. *Burn Rate*)
- потисак (енг. *Thrust*)
- специфични импулс (енг. *Specific Impulse*)
- притисак коморе (енг. *Chamber Pressure*)
- карактеристична брзина (енг. *Characteristic Velocity*)
- температурна осјетљивост (енг. *Temperature Sensitivity*).

У зависности од захтијеваних карактеристика ракетног пропеланта с обзиром на намјену ракетног система, брзина сагоријевања утиче у великој мјери на ефикасност коришћеног горива. Брзина сагоријевања се дефинише као линеарна брзина регресије погонског горива, у паралелним слојевима, у правцу управном на саму површину горива, односно, као растојање које пређе фронт пламена у јединици времена окомито на слободну површину погонског зрна, на познатом притиску и температури [122].

Одређивање вриједности брзине сагоријевања врши се помоћу Виеловог закона (енг. *Vielle 's Law*)<sup>214</sup>

$$r = aP_c^n \quad (46)$$

---

<sup>214</sup> Виелов закон се назива и закон моћи, те се у исту сврху може користити Мураоуров закон о линеарној брзини горења чврстих пропеланата

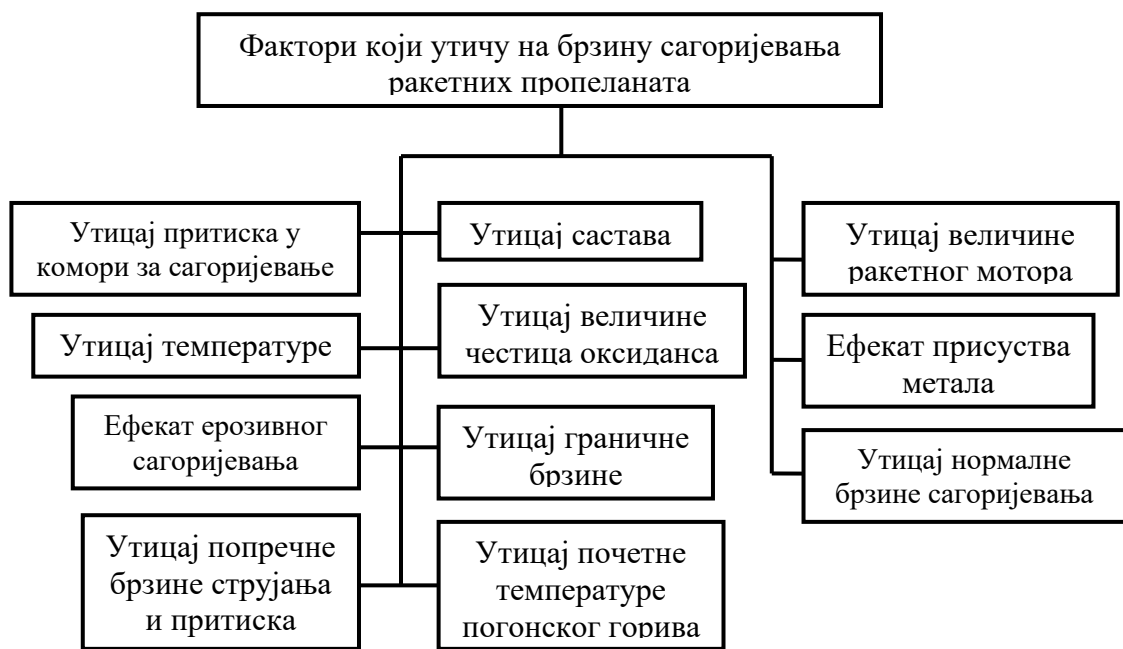
$r$  – брзина сагоријевања која углавном зависи од притиска у комори и почетне температуре погонског горива

$a$  – коефицијент који зависи од почетне температуре погонског горива и креће се од 0,05 до 0,002

$P_c$  – притисак коморе

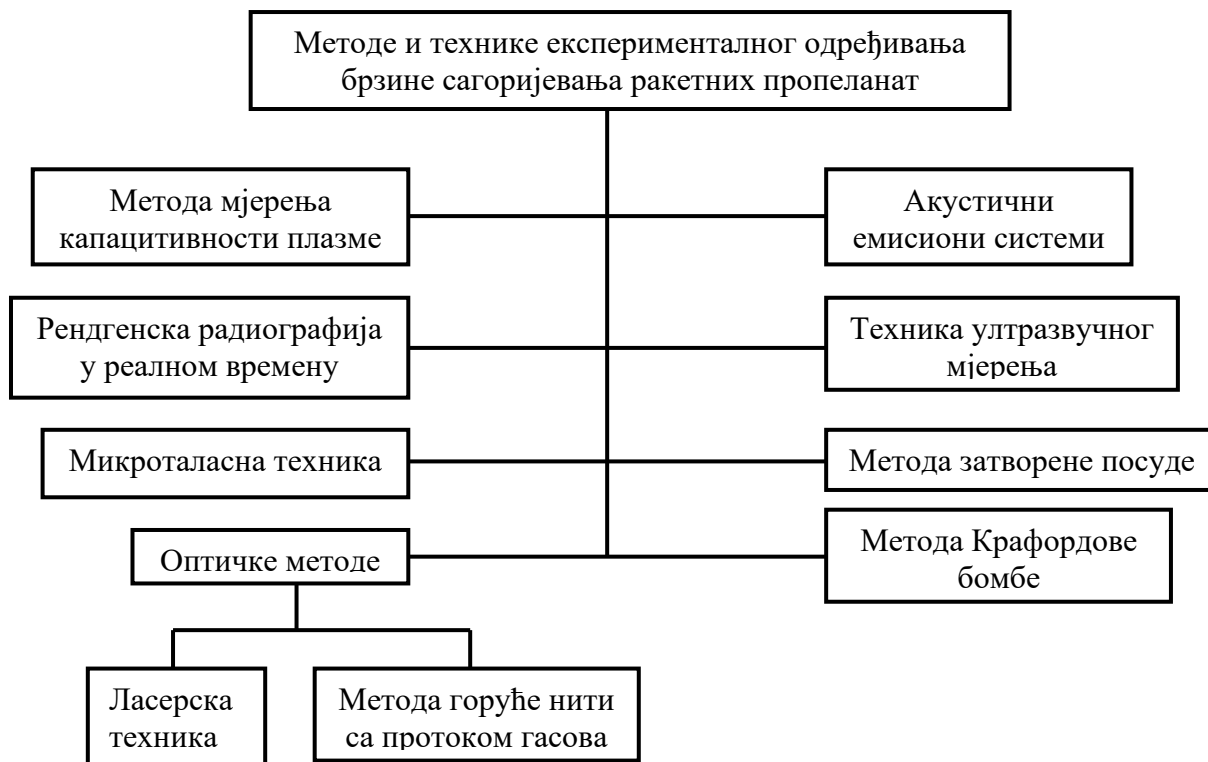
$n$  – индекс притиска или експонент (у функцији формулације погонског горива).

На слици 111 су приказани фактори који утичу на брзину сагоријевања ракетних пропеланата [122].



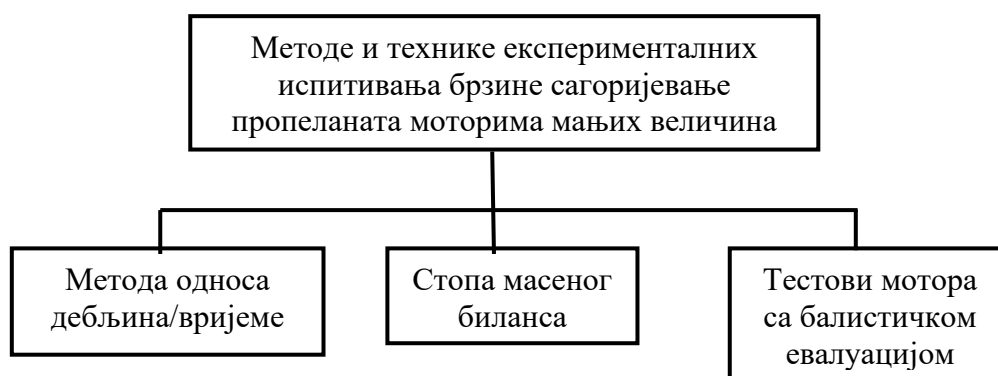
Слика број 111. Фактори који утичу на брзину сагоријевања ракетних пропеланата [122]

Користи се више различитих метода и техника за експериментално одређивање брзине сагоријевања.



Слика број 112. Експерименталне технике и методе одређивања брзине сагоријевања ракетних пропеланата

Такође се примјењују одређене технике за испитивања брзине сагоријевања помоћу мотора мањих геометријских величина (енг. *Subscale Motors*).



Слика број 113. Технике и методе за испитивање брзине сагоријевања ракетних пропеланата помоћу мотора мањих величина [122]

Истицање гасовитих продуката сагоријевања ракетних пропеланата проузрокује тзв. реакциону силу ( $F$ ) која се назива „потисак”. Вриједност потиска се изражава помоћу израза:

$$F = \dot{m}V_e + A_e(P_e - P_a) \quad (47)$$

$F$  – потисак

$\dot{m}$  – масени проток у јединици времена

$V_e$  – брзина гасова на излазу из млазнице

$A_e$  – излазна површина млазнице

$P_e$  – притисак гасова на излазу из млазнице

$P_a$  – околни атмосферски притисак.

Специфични импулс ( $I_{sp}$ ) представља вриједност потиска по јединици масе ракетног горива (пропеланта) представљено изразом:

$$I_{sp} = F / \dot{m} \quad (48)$$

Специфични импулс представља најзначајнију карактеристику пропеланата и имајући у виду потребу за одређивањем количине потребног горива те да су пропеланти у уској зависности од хемијских параметара, израчунавање специфичног импулса се врши помоћу израза:

$$I_{sp} = K \sqrt{nT_c} = K_I \sqrt{\frac{T_c}{M}} \quad (49)$$

$I_{sp}$  – специфични импулс

$K, K_I$  - константе

$n$  – број молова гаса насталих по јединици масе пропелента

$T_c$  – температура пламена

$M$  – средња молекуларна маса гасовитих продуката сагоријевања.

На вриједност специфичног импулса такође утиче брзина истискивања гасова, а што је приказано изразом:

$$I_{sp} = C^*(C_F/g) \quad (50)$$

$C$  – коефицијент чија вриједност зависи од хемијске формулације пропеланта и не зависи од типа мотора кориштеног за сагоријевање

$C_F$  – коефицијент потиска (однос потиска према производу притиска у комори за сагоријевање и површине грла млазнице), зависи од дизајна млазнице

$g$  – гравитациона сила.

Специфични импулс се обично одређује мјерењем укупног импулса и дијелењем са тежином пропеланта према изразу:

$$I_{sp} = \int_0^t \frac{F dt}{w} \quad (51)$$

$w$ - маса погонског горива.

Притисак коморе ( $P_C$ ) представља силу, насталу услед притиска гасовитих продуката, која дјелује по јединици површине ракетног мотора. Вриједности притиска коморе се налазе у интервалу од 70 до 140  $kg/cm$ . Методе и технике мјерења притиска коморе се заснивају на кориштењем одговарајућих уређаја за мјерење притиска или сензора који се налазе у контакту са комором за сагоријевање.

Карактеристична брзина ( $C^*$ ) се дефинише као однос производа притиска коморе и излазне површине млазнице и масеног протока пропеланта у јединици времена.

$$C^* = P_C A_t / \dot{m} \quad (52)$$

$C^*$  – карактеристична брзина

$P_C$  – притисак коморе

$A_t$  – излазна површина млазнице

$\dot{m}$  – масени проток у јединици времена

За ракетне пропеланте вриједност карактеристичне брзине се креће у распону од 1200 до 1600  $m/s$ .

Температурна осјетљивост се анализира са становишта:

- а) почетна температурна осјетљивост брзине сагоријевања (при константном притиску)
- б) почетна температурна осјетљивост притиска у комори за сагоријевање.

Температурна осјетљивост ( $(Pr)_p$ ) јесте мјерило промјене брзине сагоријевања у односу на почетну температуру пропеланта при константном притиску. Такође је уочена промјена притиска у комори за сагоријевање усљед промјене почетне температуре пропеланта. Изведен је математички израз за одређивање температурне осјетљивости:

$$(Pr)_p = [(r_1 - r_2) / (r_1 + r_2) / 2] [100 / (T_1 - T_2)] \quad (53)$$

$(Pr)_p$  – температурна осјетљивост

$r_1$  – брзина сагоријевања на температури  $T_1$

$r_2$  – брзина сагоријевања на температури  $T_2$

$T_1$  – температура кондиционирања врућег пламена

$T_2$  – температура кондиционирања хладног пламена

Вриједности температурне осјетљивости представљају промјену брзине сагоријевања по јединичној температури и изражавају се у процентима по степену. Вриједности се крећу од 0,1 до 0,4 % по келвину [13].

### 3. 4. Карактеристике пиротехничких материја

Најчешће, пиротехничке материје су смјеше различитих супстанци у зависности од ефекта који се жели постићи приликом употребе. У зависности од намјене, у саставу пиротехничких смјеса се налазе различите материје које могу имати улогу горива, оксидационог средства, везива, материје за хлађење, успоривача, боја, интензификатора боје и убрзивача. На карактеристике пиротехничких смјеса веома значајну улогу имају карактеристике појединих компоненти које се налазе у смјеси. У карактеристике појединих компоненти које се налазе у пиротехничким смјесама се сврставају:

- густина – густина састојака пиротехничке формулације одређује густину смјеше од чега зависи могућност употребе одређене масе смјесе у дефинисаном простору
- хигроскопност – могућа апсорпције влаге (хигроскопност) може довести до стварања нереактивних једињења који мијењају карактеристике пиротехничке смјесе
- тачка топљења, тачка кључања, температура распада (декомпозиције) – тачка топљења, тачка кључања и температура распада представљају веома значајне карактеристике везане за способност паљења и брзину сагоријевања пиротехничких смјеса
- садржај кисеоника у оксидансу – садржај кисеоника у оксидансу као и лакоћа отпуштања кисеоника утичу на брзину сагоријевања и температуру продуката сагоријевања
- топлотна проводљивост горива и контејнера – на брзину сагоријевања значајан утицај показује топлотна проводљивост горива и материјала од којег је сачињен контејнер
- природа продуката сагоријевања – у зависности од жељеног крајњег ефекта користе се материје са различитом природом продуката сагоријевања
- токсичност – токсичност материја представља значајну карактеристику са становишта утицаја на здравље људи који се налазе у контакту са пиротехничким материјама.

У зависности од намјене, процјена квалитета пиротехничких смјеса се врши на основу резултата испитивања различитих карактеристика пиротехничких смјеса (слика 114).



\* – приказано у поглављу 3. 1. Основне карактеристике

Слика број 114. Специфичне карактеристике пиротехничких смјеса

### 3. 4. 1. Температура паљења

Иницирање процеса сагоријевања (паљење) и развој до самоодрживог сагоријевања је веома сложен физичко-хемијски процес, који укључује постизање стабилног стања пиротехничке смјесе све до видљивог сагоријевања (пламен) које је резултат примјене топлотне енергије. На процес паљења пиротехничких смјеса утичу различити фактори:

- топлотна својства материјала који се запаљује
- транспортна својства запаљивих гасова

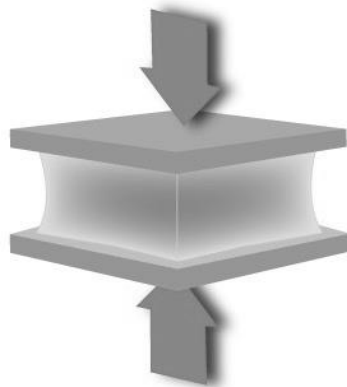
- конвективно, радијационо, кондуктивно и кондензационо гријање материјала који треба запалити
- топљење компоненти
- латентна топлота топљења
- испаравање компоненти
- латентна топлота испаравања
- потповршинске хемијске реакције које могу бити ендотермне или егзотермне
- хемијске реакције у гасној фази могу бити ендотермне или егзотермне
- вишефазни ток

а истовремено показују утицај на температуру паљења [123].

Одређивање температуре паљења испитиваних пиротехничких смјеса се врши помоћу диференцијалне термалне анализе (претходно приказане) при чему брзина промјене температуре износи  $40^{\circ}\text{C}$  /минути.

### 3. 4. 2. Механичке особине

У значајне механичке карактеристике пиротехничких смјеса сврставају се притисак на чврстоћу (енг. *compression strength*) и проценат компресије. Притисак на чврстоћу представља способност материјала да издржи оптерећења која теже смањењу величине.



Слика број 115. Шематски приказ начина рада уређаја за одређивање притиска на чврстоћу

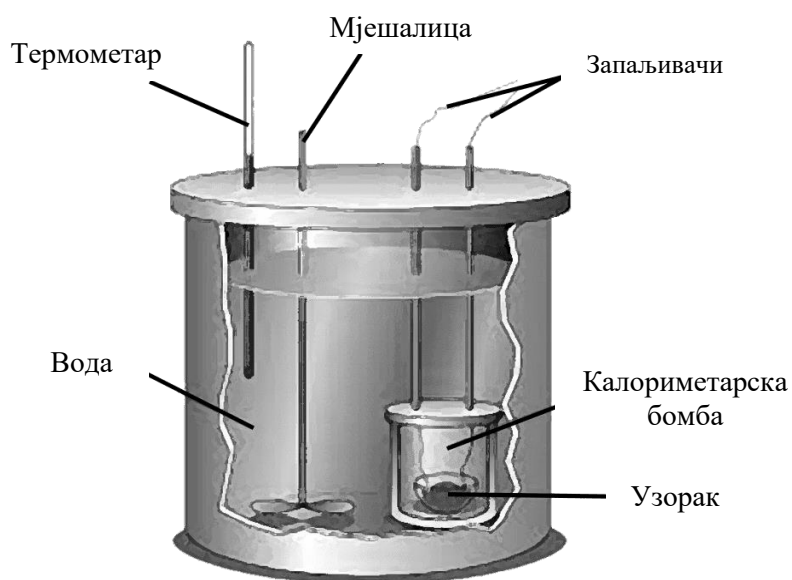
Процент компресије представља вриједност смањења почетне запремине при чему не долази до промјене физичких и хемијских карактеристика пиротехничке смјесе.

### 3. 4. 3. Апсорпција влаге

Одређивање количине апсорбоване влаге врши се излагању испитиваног узорка у средини са различитим процентом влажности (52–84%) у трајању од шест сати и рачунањем повећања масе узорка услед апсорпције влаге.

### 3. 4. 4. Топлотна снага

Топлотна снага представља количину топлоте која се ослободи приликом сагоријевања пиротехничке смјесе. Вриједност топлотне снаге се изражава у јединицама калорија (џула) по молу или калорија (џула) по граму пиротехничке смјесе. Једна калорија представља количину топлоте потребне да се температура 1 грама воде повећа за 1 степен целзијуса. Мјерење вриједности ослобођене топлоте врши се помоћу адијабатске калориметарске бомбе [124].



Слика број 116. Адијабатска калориметарска бомба

Вриједности топлотне снаге за поједине пиротехничке смјесе су приказане у табели 59.

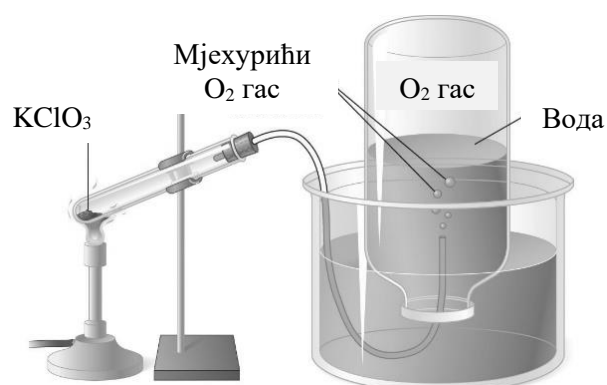
Табела број 59. Вриједности топлотне снаге за поједине пиротехничке смјесе [124]

Састав смјесе	Масени удио %	Топлотна снага <i>kcal/g</i>	Примјена
Магнезијум	50		
Натријум-нитрат	44	2,0	Свјетлећа бакља
Везиво „ <i>Laminac</i> ”	6		
Калијум-перхлорат	60	1,8	Фото-флеш
Алуминијум	40		
Бор	25		
Калијум-нитрат	75	1,6	Запаљивач
Везиво „ <i>VAAR</i> ”	+1%		
Калијум-нитрат	71	1,0	Стартер
Угаљ	29		
Црни барут	91	0,85	Бљескалица
Алуминијум	9		
Баријум-хромат	85	0,5	Успоривач
Бор	15		
Силикон	25		
Црвени оловни оксид	50	0,28	„Прва” ватра
Титанијум	25		
Тунгстен	50		
Баријум-хромат	40	0,23	Успоривач
Калијум-перхлорат	10		

### 3. 4. 5. Запремина гасова

Једна од често захтијеваних карактеристика пиротехничке материје представља способност настајања и ширења веће количине гасовитих продуката насталих у процесу горења (дефлаграције). Вриједности количине ослобођених гасовитих продуката сагоријевања представљају важну карактеристику пиротехничких смјеса.

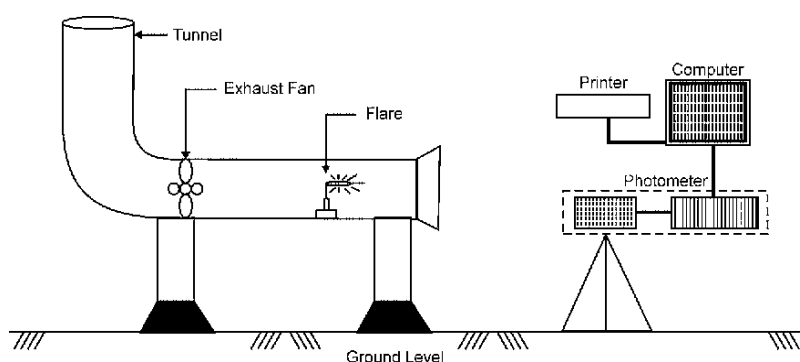
Мјерење запремине насталих гасовитих продуката се врши на основу запремине истиснуте воде.



Слика број 117. Шематски приказ принципа мјерења запремине ослобођених гасова

### 3. 4. 6. Јачина освјетљења

Емитована свјетлост приликом сагоријевања пиротехничких смјеса представља електромагнетно зрачење различитих таласних дужина које се налазе унутар спектра електромагнетног зрачења. Када се говори о свјетлости, највећи дио електромагнетног зрачења карактеришу таласне дужине видљивог дијела спектра електромагнетног зрачења (400–700 нанометара). Интензитет електромагнетног зрачења у видљивом дијелу спектра, односно, јачина свјетлости изражава се у јединицама кандела. Шема уређаја за мјерење интензитета освјетљења је приказан на слици 118.



Слика број 118. Шема уређаја за мјерење интензитета освјетљења [13]

Унутар тунела који је опремљен вентилатором поставља се узорак за који се врши испитивање вриједности интензитета освјетљења. Испитивани узорак се иницира и током сагоријевања продукује свјетлост (електромагнетне таласе из видљивог дијела спектра електромагнетног зрачења). На правцу кретања свјетлости налази се фото-метар, уређај који претвара интензитет електромагнетног таласа (свјетлости) у дигитални сигнал који се даље обрађује на рачунару.

### **3. 4. 7. Интензитет инфрацрвеног зрачења**

Количина оптичке снаге која се емитује из извора по јединици чврсте масе материје назива се интензитет инфрацрвеног зрачења. Изражава се у ватима по стерadianу и представља производ интензитета зрачења и времена горења по граму пиротехничке формулације. Уређај који се користи за мјерење интензитета инфрацрвеног зрачења назива се радио-метар. Радио-метар може да функционише у два режима рада:

- спектрални режим
- радиометријски режим.

### **3. 4. 8. Брзина сагоријевања**

Брзина сагоријевања пиротехничких материја има значајну улогу посматрано са становишта одговарајуће примјене, односно, жељеног ефекта. Представља показатељ нивоа функционалног дјеловања пиротехничких материја. У процесу сагоријевања пиротехничких материја брзина сагоријевања се дефинише као тзв. линеарна брзина сагоријевања која представља утрошену јединицу масе материје по јединици времена (грам/секунда) или удаљеност за коју је фронт пламена напредовао у јединици времена (центиметара/секунди). С обзиром на претпостављени теоријски модел процеса сагоријевања (дефлаграције)<sup>215</sup> међу најважније термодинамичке величине се сврставају:

---

<sup>215</sup> Видјети поглавље Експлозивни процеси, дефлаграција

- активациона енергија ( $E_a$ ) – минимална количина енергије потребна за иницирање пиротехничке материје
- топлота реакције ( $\Delta H_r$ ) – нето количина енергије настале током процеса сагоријевања
- повратна енергија ( $E_{fb}$ ) – дио настале енергије током процеса сагоријевања која се пренесе на сљедећи слој неизреаговане материје.

Фактори који утичу на брзину сагоријевања пиротехничких материја претежно имају утицај на претходно наведене термодинамичке величине. Међу значајније факторе који утичу на брзину сагоријевања се сврставају [125]:

- избор горива и оксиданса
- однос горива и оксиданса
- степен мијешања
- величина честица
- облик честица
- присуство адитива
- присуство катализатора
- амбијентална температура
- локални притисак
- степен затворености
- физичка форма
- степен консолидације
- геометрија
- ефекти кристалне форме
- ефекти животне средине.

Притисак околине (локални притисак) показује изражен утицај на брзину сагоријевања пиротехничких материја чији се утицај може представити помоћу израза:

$$R = R_1 P^n \quad (54)$$

$R$  – брзина сагоријевања

$R_l$  – брзина сагоријевања на површини земље

$P$  – притисак околног ваздуха у атмосфери

$n$  – индекс фракције ( $\approx 0,1$ )

при чему вриједности индекса фракције за смјесе са кашњењем износи од 0,1 до 0,7.  
[13]

### 3. 4. 9. Осматрање учинка дима

Дјелотворност димних формулација пиротехничких материја за задимљавање се одређује на основу следећих параметара:

- снага укупног затамњења (енг. *total obscuring power, TOP*)
- фактор искориштења (енг. *yield factor, Y*)
- масени коефицијент пригушења (енг. *mass extinction coefficient,  $\alpha$* ).

На основу наведених параметара врши се израчунавање ефикасности затамњења (енг. *obscuration effectiveness,  $\alpha Y\rho$* ).

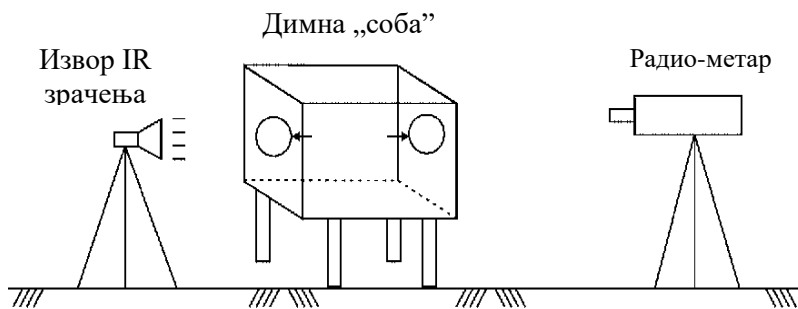
Одређивање вриједности снаге укупног затамњења се врши у лабораторијским условима и оно представља запремину насталог дима ( $m^3$ ) у односу на „стандардни” дим<sup>216</sup>. Снага укупног затамњења се изражава:

$$TOP = \text{запремина насталог дима по килограму материје} / \text{стандардни дим} \quad (55)$$

Инструментална опрема која се користи за мјерење снаге укупног затамњења приказана је на слици 119.

---

<sup>216</sup> Слој дима (м) неопходним за затамњење сијалице, снаге 40 вати



Слика број 119. Сет инструменталне опреме за мјерење снаге укупног затамњења [13]

Вриједности снаге укупног затамњења појединих пиротехничких формулација за задимљавање су дати у литератури [126].

Фактор искориштења ( $Y$ ) представља мјеру ефикасности конверзије почетне материје у затамњени ваздух и дефинисан је изразом:

$$Y = \text{маса затамњеног ваздуха} / \text{почетна маса материје} \quad (56)$$

Масени коефицијент пригушења представља мјеру ефикасности дејства дима по јединици масе материјала. Одређује се помоћу израза:

$$\alpha = - (\ln T_\lambda) / cL \quad (57)$$

$\alpha$  – масени коефицијент пригушења

$T_\lambda$  – пренос кроз облак таласне дужине и једнак је односу коначног и почетног интензитета зрачења

$c$  – масена концентрација дима

$L$  - оптичка дужина пута кроз облак дима

Израчунавање ефикасности затамњења се врши према изразу:

$$\text{ефикасност затамњења} = \alpha Y_p \quad (58)$$

$\alpha$  – масени коефицијент пригушења

$Y$  – фактор искориштења

$\rho$  – густина пиротехничке смјесе.

## 4. ЕКСПЛОЗИВНИ ПРОЦЕСИ

### 4. 1. Појам, дефиниција и подјела експлозије

Ријеч експлозија, етимолошки, води поријекло од латинске ријечи лат. *explōdere* која у преводу има вишеструка значења као што су *избацити или искључити пљеском, звиждати или експлодирати, излазак или улазак, одбацивање и неодобравање*. Савремено значење ријечи је настало касније. Тренутно се користи више различитих дефиниција појма експлозије при чему је заједничко да експлозија представља процес при коме се ослобађа велика количина енергије у кратком времену. Неке од дефиниција које су у употреби су:

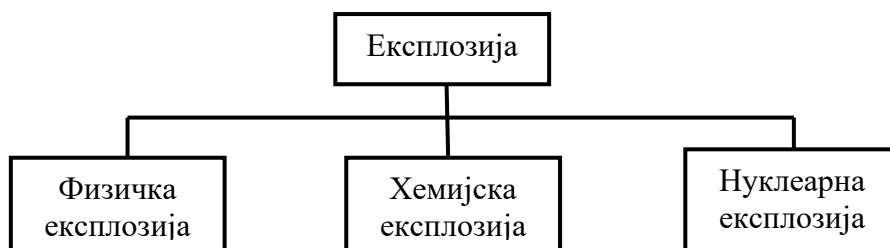
Експлозија је нагло повећање количине и ослобађање енергије на екстремни начин, обично са стварањем високих температура и ослобађањем гасова.

Експлозија се може дефинисати као процес при коме се одвија нагли преображај или ослобађање енергије. Да би се неки процес могао окарактерисати као експлозија, битан је интензитет ослобађања енергије, односно, за експлозију су битна два параметра: количина ослобођене енергије и вријеме.

Експлозија је процес брзе физичке или хемијске трансформације неке супстанце, праћен изузетно брзим преласком њене потенцијалне енергије у механички рад.

Експлозија подразумијева веома брз физички, хемијски или нуклеарни процес промјене стања неког система, праћен прелазом његове потенцијалне енергије у кинетичку енергију елементарних честица, односно, механички рад.

У односу на природу процеса, експлозије се дијеле на физичке експлозије, хемијске експлозије и нуклеарне експлозије.



Слика број 120. Класификација експлозија према природи процеса

#### 4.1.1. Физичка експлозија

Под термином физичка експлозија се сматра процес физичког превођења једног облика енергије у други, без промене хемијског састава материје (експлозија сабијеног ваздуха, експлозија парног котла, пад метеора и слично), односно, без одигравања било каквог облика хемијске реакције.

#### 4. 1. 2. Нуклеарна експлозија

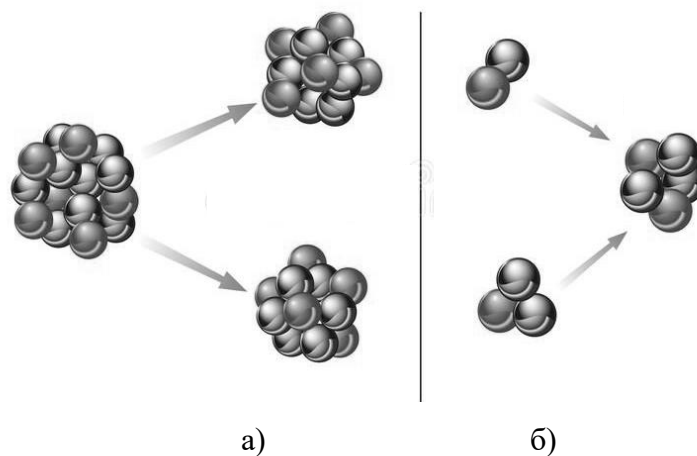
Нуклеарна експлозија је експлозија која настаје услед веома брзог ослобађања велике количине енергије путем нуклеарне реакције која се одиграва великом брзином. Нуклеарна реакција је процес у коме се два језгра атома, или језгро атома и спољна субатомска честица, сударају да би произвели један или више нових нуклида (продуката нуклеарне реакције). Нуклеарна реакција може бити нуклеарна фисија (цијепаше) или нуклеарна фузија (спајање) или вишестепена узастопна комбинација цијепаша и спајања језгара атома.

Нуклеарна фисија (лат. *Fission* – раздвајање, дијељење) јесте она врста нуклеарне реакције, која настаје кад се језгра атома неког хемијског елемента цијепаша на два фисијска продукта или фисиона фрагмента сличних маса, уз емисију једног или више неутрона, те велике количине енергије. Током процеса фисије долази до ослобађања енергије, јер је мање енергије потребно за формирање два лакша језгра него једног тежег језгра.

Нуклеарна фузија је реакција у којој се два или више атомских језгара комбинују да би се формирало једно или више различитих атомских језгара и субатомских честица

(неутрона или протона). Разлика у маси између реактаната и производа се манифестује или као ослобађање или апсорпција енергије.

Приликом одигравања нуклеарне експлозије ослобођена количина енергије се манифестује у виду ударног таласа, топлоте и радиоактивног зрачења.

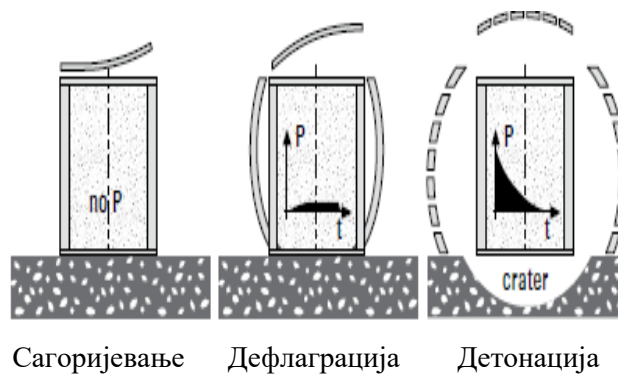


Слика број 121. Нуклеарна реакција: а) фисија; б) фузија

#### 4. 1. 3. Хемијска експлозија

Хемијска експлозија представља брз процес при коме долази до промјене хемијског састава реагујућих материја (реактаната) при чему се стварају велике количине гасовитих продуката реакције и значајно повећање температуре. Разлагање (декомпозиција) енергетских или високоенергетских материја се врши кроз процес хемијске експлозије (егзотермне реакције оксидације). Када се говори о егзотермним реакцијама (приликом одигравања реакције долази до ослобађања топлоте) термини којима се описује овакав процес су сагоријевање (енг. *combustion*), дефлаграција (енг. *deflagration*) и детонација (енг. *detonation*). У току одигравања ових процеса долази до ослобађања топлотне енергије и настанка продуката реакције. Основна разлика између енергетских материја (у смислу примарних, секундарних, терцијарних експлозива, пропеланата и пиротехничких материја) и енергената (материје које служе за производњу енергије, дрво, угаљ и слично) огледа се у брзини одвијања процеса егзотермне хемијске реакције. Енергенти су материје које се разлажу процесом сагоријевања при чему продукују топлотну енергију и продукте сагоријевања а сама

реакције је спора. С обзиром на то да је одвијање процеса (реакције) споро, не долази до настанка детонационог таласа, односно, брзина ширења топлоте<sup>217</sup> је ниска. Енергетске материје се разлажу процесом дефлаграције (убрзаног горења) и детонације (експлозије). За материје које се разлажу кроз процес дефлаграције је карактеристично да је сам процес, у ствари, процес горења при чему је брзина одигравања реакције декомпозиције виша у односу на брзину реакције сагоријевања. Такође, у одређеним условима процес дефлаграције може прећи у процес детонације док процес детонације не може прећи у процес дефлаграције. За материје које детонирају карактеристично је да се приликом одвијања ових процеса ослобађа топлотна енергија и продукти сагоријевања при чему се сама реакција одвија веома брзо услед чега настаје детонациони талас (слика 122).



Слика број 122. Приказ зависности вриједности притиска од временског тока процеса за егзотермне реакције [20]

Са слике 122 је видљиво да, приликом процеса сагоријевања, не долази до повећања притиска током протока времена за разлику од процеса дефлаграције приликом чега са протоком времена долази до повећања притиска који за неко вријеме достиже максималну вриједност који се затим константно задржава. Приликом одигравања процеса детонације у почетном моменту одигравања процеса, вриједност притиска има максималну вриједност која се са протоком времена смањује. Наведени процеси разлагања енергетских материја показују различите карактеристичне вриједности за поједине егзотермне процесе.

<sup>217</sup> Топлота се преноси путем кондукције, конвекције и радијације.

Табела број 60. Карактеристичне вриједности за процесе горења, дефлаграције и детонације приликом којих вриједност ослобођене топлоте реакције износи 1000 kcal/kg [62]

Тип реакције	Брзина реакције $m/s$	Масени проток $m^3/s$	Гасовити продукти $m^3/s$	Вријеме реакције $s/m^3$
Горење	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^{-3} - 10^{-2}$	1 – 10	$10^2 - 10^3$
Сагоријевање	$10^2$	$10^2$	$10^5$	$10^{-2}$
Детонација	$10^4$	$10^4$	$10^7$	$10^{-4}$

## 4. 2. Сагоријевање

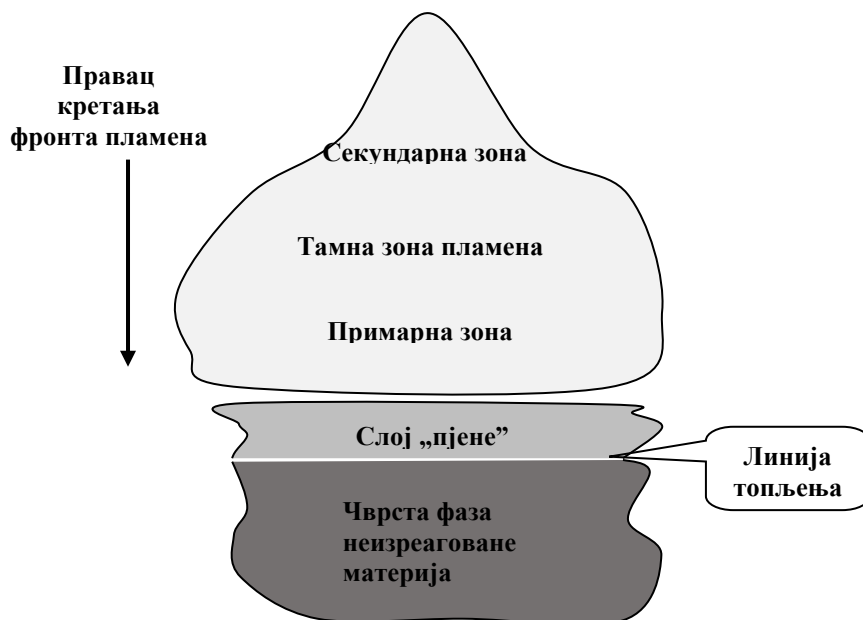
Сагоријевање или горење је хемијска реакција у којој супстанца реагује са кисеоником (у гасовитом стању) при чему долази до ослобађања енергије у виду топлоте и пламена. Одвијање процеса сагоријевања започиње процесом иницирања хемијске реакције (оксидације) током које се ослобађа одређена количина енергије у виду топлотне енергије. Настала топлотна енергија се путем конвекције, кондукције и радијације преноси на први сљедећи слој неизреагованог материјала, услед чега долази до локалног загријавања слоја. Ако је количина пренесене топлотне енергије довољна за даље покретање процеса сагоријевања, сам процес ће се наставити одвијати све док услов довољне количине пренесене топлоте буде задовољен. Брзина одвијања процеса сагоријевања је знатно мања у односу на брзину одвијања процеса дефлаграције и детонације те је неопходно присуство атмосферског кисеоника. Процес сагоријевања је карактеристичан за материје које се класификују као енергенти (дрво, угаљ и слично).

## 4. 3. Дефлаграција

Процес дефлаграције (брзог сагоријевања) представља механизам декомпозиције енергетских материја док се пренос енергије врши углавном путем кондукције<sup>218</sup> ради

<sup>218</sup> Кондукција је процес преношења топлоте при чему је тијело које се загријава у директном контакту са извором топлоте

чега су и процеси дефлаграције много спорији од процеса детонације. Уопштено посматрано, приликом одигравања процеса дефлаграције могу се уочити одређене специфичне зоне самог процеса. Посматрано у правцу супротном од правца кретања процеса дефлаграције, уочава се први слој кога сачињава нереагована енергетска материја (хомогена или хетерогена чврста фаза). Између чврстог непрореагованог дијела енергетске материје и подручја у коме се одиграва реакција налази се тзв. линија топљења на којој се одиграва процес фазне трансформације материје из чврстог у течну или гасовито стање (топљење, сублимација). У зони изнад линије топљења налази се тзв. слој „пјене” који представља слој који сачињавају једним дијелом испарене компоненте енергетске материје (без промјене хемијског састава, само физичка трансформације) а другим дијелом продукти распада дијела енергетске материје (дио физички трансформисане материје која је изреаговала у самом слоју, дошло је до промјене хемијског састава). С обзиром на то да је процес дефлаграције егзотерман процес, односно, одигравање реакција у слоју пјене је праћено ослобађањем топлотне енергије долази до даљег распада производа при чему се разликују примарна зона пламена, тамна зона пламена и секундарна зона пламена (слика 123).



Слика број 123. Графички приказ процеса дефлаграције

Потребно је напоменути да су за одигравање процеса дефлаграције потребне количине кисеоника садржане у компонентама енергетских смјеса (оксиданси) те присуство атмосферског кисеоника није неопходно.

Основне карактеристике процеса дефлаграције (брзог сагоријевања) су:

- процес сагоријевања се одвија слојевито (сагоријева слој по слој)
- изнад површине која гори разликују се различите зоне при чему вриједности температуре, притиска, концентрације и састава гасовитих продуката имају различите вриједности
- гасовити продукти процеса сагоријевања посједују високу вриједност температуре и крећу се изван површине горења
- брзина дефлаграције (брзина „разградње” површине која гори изражена у јединици мм/сек при датом притиску) има знатно мање вриједности од брзине звука (за брзину звука кроз дату материју)
- процес дефлаграције одржава се помоћу повратне топлоте од пламена до површине помоћу проводљивости, конвекције и зрачења
- брзина сагоријевања ( $r$ ) у великој мјери зависи од притиска гасова који се налазе у окружење ( $P$ ).

Брзина дефлаграције која се назива и линеарна брзина дефлаграције подразумијева брзину простирања фронта пламена кроз енергетску материју у правцу који је нормалан на фронт пламена. Према Виеловом закону, израчунавање брзине сагоријевања врши се помоћу израза:

$$r = \beta P^\alpha \quad (59)$$

$r$  – брзина сагоријевања,

$\beta$  – константа,

$P$  – притисак гасова у окружење,

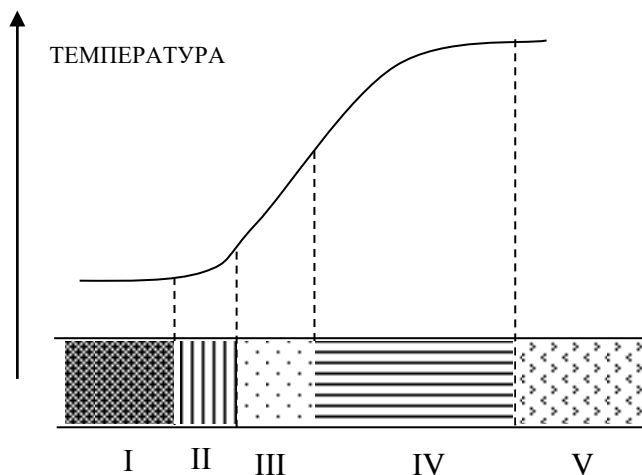
$\alpha$  – експонент притиска

Сви енергетски материјали (примарни, секундарни, терцијарни експлозивни, пропеланти, пиротехничке материје) подложни су процесу сагоријевања

(дефлаграције). За примарне, секундарне и терцијарне експлозиве, декомпозиција се углавном одиграва помоћу процеса детонације док пропеланти и пиротехничке материје претежно реагују путем процеса дефлаграције. На основу претпостављеног механизма одвијања процеса, разликују се процеси дефлаграције примарних и секундарних експлозивних материја од процеса дефлаграције пропеланата и пиротехничких материја.

#### 4. 3. 1. Дефлаграција примарних и секундарних експлозивних материја

Процес дефлаграције примарних и секундарних експлозива је могућ само под одређеним условима док процес детонације представља основни облик разлагања. Приликом иницирања примарних и секундарних експлозива помоћу топлотног импулса долази до краћег или дужег периода дефлаграције прије настанка детонационог таласа. За примарне експлозиве је карактеристично да је процес дефлаграције веома нестабилан и веома лако прелази у процес детонације за разлику од пропеланата код којих се процес дефлаграције одвија стабилно и прелазак у детонациони процес је могућ само под одређеним условима. Са становишта стабилности одвијања процеса дефлаграције, секундарне експлозивне материје се налазе између примарних експлозива и пропеланата. Могућност одвијања процеса дефлаграције примарних и секундарних експлозивних материја у највећој мјери зависи од кинетике хемијских реакција, односно, од брзине издвајања топлоте и брзине преноса топлоте из зоне реакције у масу нереаговане експлозивне материје. На слици 124 је приказана поједностављена шема дефлаграције примарних и секундарних експлозивних материја [3].



Подручје I – нереагована експлозивна материја; подручје II – загријани слој; подручје III – зона испарене материје; подручје IV – зона одигравања хемијских реакција; подручје V – зона продуката сагоријевања.

*Слика број 124. Шема процеса дефлаграције примарних и секундарних експлозива [3]*

Зона II представља танки слој експлозивне материје у којој започиње топљење и испаравање материје. Гасовита фаза испарене материје се у зони III додатно загријава а затим у зони IV долази до декомпозиције (дефлаграције) материје. Дио ослобођене енергије у зони IV се кондукцијом преноси преко зоне II и III до зоне I. Брзину процеса сагоријевања одређује брзина реакција у зони IV.

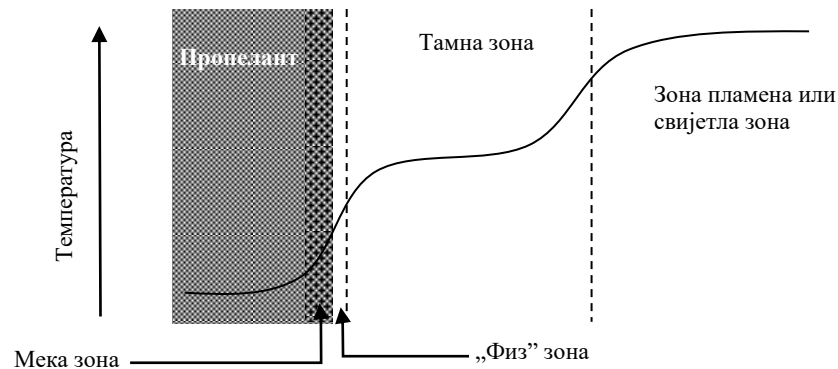
#### **4. 3. 2. Дефлаграција пропеланата и пиротехничких материја**

За разлику од примарних и секундарних експлозивних материја, основни облик декомпозиције пропеланата и пиротехничких смјеса представља процес сагоријевања (дефлаграције). Процес се одвија ламинарно, односно, слој по слој који се међусобно налазе у паралелном положају а што узрокује могућност стабилног нормалног сагоријевања при веома високим притисцима (5000–6000 бара).

За процес сагоријевања пропеланта, односно, структура пламена се разликује у зависности од хомогености пропеланта при чему се разликује структура пламена приликом сагоријевања једнокомпонентних (хомогених) пропеланата и структура пламена за композитне (хетерогене) пропеланте [3].

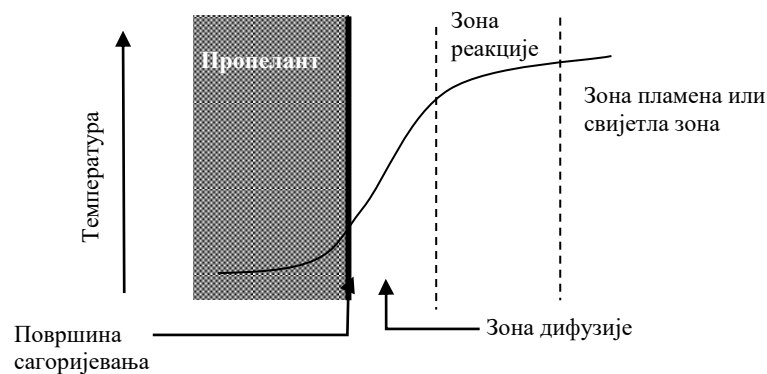
Структура пламена сагоријевања хомогених пропеланата је приказана на слици 125. Процес декомпозиције отпочиње у тзв. мекој зони (дебљина слоја износи  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  cm) при температурама око  $330^{\circ}\text{C}$  при чему долази до настанка течних и гасовитих продуката. У тзв. „физ” зони одвијају се реакције даљег распада продуката насталих сагоријевањем чврсте фазе на температурама које могу достићи и до  $1000^{\circ}\text{C}$ . У тамној зони долази до међусобног мијешања гасовитих продуката физ зоне и даљег загријавања услед присуства топлотне енергије ослобођене у свијетлој зони. У свијетлој зони, гасовити продукти, помијешани и загријани у тамној зони, достижу

температуру и до  $2300^{\circ}\text{C}$  при чему ступају у међусобне реакције и дају коначне продукте сагоријевања.



Слика број 125. Шематски приказ структуре пламена хомогеног пропеланта [3]

Приликом сагоријевања композитних пропеланата, односно, хетерогених пропеланата, и структура пламена има хетерогени карактер. У структури пламена не егзистира тзв. тамна зона већ се уочава зона дифузије која има значајан утицај на брзину сагоријевања [3].



Слика број 126. Шематски приказ структуре пламена композитног пропеланта [3]

Имајући у виду сложеност процеса сагоријевања, на брзину и карактер процеса дефлаграције (сагоријевања) значајан утицај показују следећи фактори:

- притисак
- температура
- порозност

- густина експлозивне материје
- пречник пуњења
- дебљина и особине облоге
- различити додаци.

На брзину сагоријевања експлозивних материја притисак показује веома значајан утицај. Уопштено, повећање вриједности притиска узрокује и повећање брзине процеса сагоријевања. Експерименталним истраживањима утврђена је линеарна зависност брзине сагоријевања ( $v$ ) у односу на притисак ( $p$ ), а та зависност се приказује емпиријским изразима које је предложило више истраживача.

*Табела број 61. Емпиријски изрази за одређивање зависности брзине сагоријевања од притиска за различите енергетске материје*

Енергетска материја	Емпиријски израз	Аутор
Примарни експлозиви	$v = a + bp$	Бељајев
Барути	$v = a + bpn$	Андрејев
Ракетни пропеланти	$v = apn$	Вјеј

а, б – емпиријске константе, n – експонент вриједности  $\approx 1$

Смањење притиска до неке граничне вриједности доводи до гашења процеса сагоријевања а што зависи од физичко-хемијских карактеристика експлозивне материје и механизма хемијских реакција у зони сагоријевања.

Повећање вриједности температуре на којој се одвија процес сагоријевања доводи до повећања брзине одвијања процеса сагоријевања. Утицај температуре на брзину сагоријевања се изражава путем температурног коефицијента ( $\beta$ ) који се експерименталним методама одређује за појединачну експлозивну материју.

$$\beta = 1/v[(v_1 - v_0) / (T_1 - T_0)] \quad (60)$$

$\beta$  – температурни коефицијент

$v$  – брзина сагоријевања

$v_1$  – брзина сагоријевања на температури  $T_1$

$v_0$  – брзина сагоријевања на температури  $T_0$

Температурни коефицијент такође зависи и од других фактора као што су густина, порозност и сл.

Порозност представља садржај пора, односно, садржај слободног простора у маси материје и изражава се као однос запремине пора ( $V_p$ ) и укупне запремине експлозивне материје ( $V_0$ ):

$$\psi = V_p / V_0 = 1 - (\rho_0 / \rho_m) \quad (61)$$

$\psi$  – порозност

$\rho_0$  – густина узорка

$\rho_m$  – максимална густина

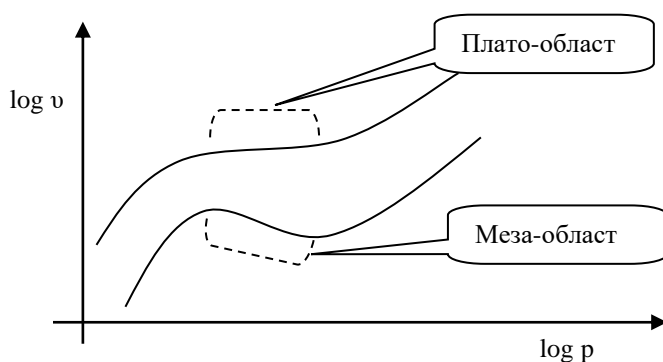
Продирањем гасова у поре материје која сагоријева долази до повећања контактне површине, односно, површине горења што може да доведе до нарушавања стабилности процеса сагоријевања.

Утицај густине на процес сагоријевања може бити различит у зависности од природе експлозивне материје. Када се ради о испарљивим (лако топивим) материјама, смањењем вриједности густине на неку граничну вриједност долази до гашења процеса сагоријевања услед повећања порозности а, самим тим, и до повећања топлотних губитака који су већи од доведене топлоте. За неиспарљиве (тешко топљиве) експлозивне материје карактеристично је да повећањем густине изнад неке граничне вриједности долази до гашења процеса сагоријевања што се објашњава повећањем проводљивости топлоте у материји са повећањем густине материје.

Равномјерно и стабилно сагоријевање експлозивних материја се одвија само уз услов да је пречник пуњења експлозивне материје већи од тзв. критичног пречника пуњења (минимална вриједност пречника пуњења). Критични пречник је карактеристика одређене експлозивне материје и зависи од њених особина, услова сагоријевања, притиска, почетне температуре, густине и сл.

На брзину процеса сагоријевања, утиче, у одређеној мјери, и материјал од кога је сачињена облога (материјал тијела у коме се налази експлозивна материја) а који се огледа у физичко-хемијским карактеристикама кориштеног материјала за израду облоге (топлотна проводљивост, могућност спречавања смањења притиска).

Контрола и управљање брзине одвијања процеса сагоријевања се врши помоћу различитих додатака који се називају балистички модификатори и нарочито је изражена важност приликом дизајнирања ракетних горива различите намјене. Помоћу балистичких модификатора постиже се тражена стабилност одвијања процеса сагоријевања. Разликују се ракетни пропеланти са тзв. плато-ефектом и ракетни пропеланти са тзв. меза-ефектом.



Слика број 127. Брзина сагоријевања пропеланата са плато-ефектом и меза-ефектом

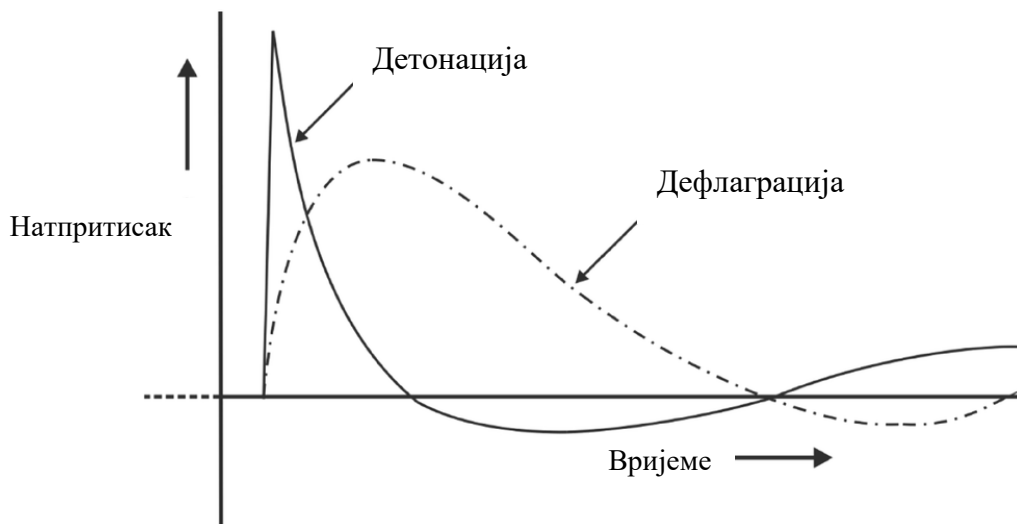
Плато-ефекат представља појаву када са промјеном притиска ( $p$ ) не долази до промјене брзине сагоријевања ( $v$ ) а мезо-ефекат представља појаву када приликом промјене притиска долази до смањења брзине процеса сагоријевања. Кориштење ових ефеката се огледа у постизању уравнотеженијег и стабилнијег рада ракетних мотора. За балистичке модификаторе користе се органске соли тешких метала (олово-стеарат, бакар-салицилат) и неоргански балистички модификатори (калцијум-карбонат, магнезијум-оксид, олово-оксид, оловне соли, бакарне соли, графит, хром-триоксид, манган-диоксид).

#### 4. 4. Дегонација

За разлику од процеса дефлаграције приликом којег долази до сагоријевања слоја по слоја а брзина сагоријевања (брзина кретања фронта површине на којој се одиграва



Имајући у виду да енергетске материје (примарни, секундарни, терцијарни експлозиви, пропеланти, пиротехничке материје) подлијежу процесима дефлаграције или детонације, односно, да се процес декомпозиције материја одвија путем процеса дефлаграције или детонације, неопходно је указати на основне разлике између ова два процеса имајући у виду начин на који се манифестују дјеловања ових процеса на околину. Такође, начин процеса декомпозиције у највећој мјери условљава практичну употребу енергетске материје, односно, подручје примјене. Са слике 129 је видљиво да су вриједности брзине и притиска реакционог фронта приликом одигравања процеса декомпозиције (дефлаграције и детонације) материје различите за наведене процесе. Параметри брзине и притиска имају значајно веће вриједности приликом дешавања процеса детонације у односу на процес дефлаграције. У табели 62 су приказане најзначајније разлике између процеса дефлаграције и детонације.



Слика број 129. Поређење вриједности притиска у зависности од протока времена за процесе детонације и дефлаграције [127]

Табела број 62. Најзначајније разлике између процеса дефлаграције и детонације

Дефлаграција	Детонација
1. Површински феномен (ширење процеса се врши сагоријевањем слоја по слоја).	1. Феномен ударног таласа (ударни талас велике брзине који пролази кроз експлозивну средину ширећи

2. Брзина дефлаграције је мања у односу на брзину звука у тој средини.	детонацију).	2. Брзина детонације је много већа од брзине звука у тој средини.
3. Продукти дефлаграције се крећу супротно од правца ширења горења.		3. Продукти детонације се крећу у правцу ширења детонације.

Да би се процес детонације, односно, феномен ударног таласа могао у потпуности приказати, потребно је увести термине као што су линеарно сагоријевање (енг. *linear burning*) и масовно сагоријевање (енг. *mass burning*). Разлике начина сагоријевања се могу приказати кроз примјер сагоријевања комада угља. Када се комад угља запали, долази до процеса сагоријевања при чему се брзина сагоријевања изражава у мм/сек а сам процес се одвија путем дефлаграције (претпоставка да брзина горења износи 1 милиметар/секунди), тада се говори о линеарном сагоријевању. Ако се комад угља исте величине преради у прах, тада настаје огроман број мањих честица. Мијешањем са ваздухом и иницирањем праха долази до одигравања детонације истовремено уз моменат паљења (иницирања). Уз претпоставку да је свака честица настала уситњавањем комада угља округлог облика са пречником од 1 микрона ( $10^{-3}$  милиметара), дошло је до значајног повећања површине исте масе угља и значајно веће брзине одигравања процеса декомпозиције (претпостављена брзина сагоријевања је 1 милиметар/секунди, што значи да ће свака честица праха сагорјети за 1 милисекунду,  $10^{-3}$  секунди). С обзиром на то да постоји огроман број таквих честица, ствара се велика количина притиска за 1 милисекунду, када се све ове честице подвргну истовремено и паљењу – сагоријевању. То резултира наглим порастом притиска при чему настанак веома високих вриједности притиска узрокује настанак ударног таласа а што резултира детонацијом. Овдје говоримо о брзини „масовног сагоријевања”, која нам даје информацију о количини материјала у грамима које ће бити утрошено по јединици времена. Брзина „масовног сагоријевања” може се изразити емпиријским изразом:

$$M = \frac{1}{4} r A \rho \quad (62)$$

$r$  – линеарна брзина сагоријевања материјала,

$A$  – површина изложена горењу

$\rho$  – густина материјала.

С обзиром на то да се процес детонације одиграва усљед утицаја детонационог таласа (ударни талас који се одиграва унутар масе експлозивних материја), потребно је приказати механизам настајања и дјеловања ударног таласа.

#### 4. 4. 1. Ударни (шок) талас

У општем случају, ударни талас представља ширење поремећаја почетног стања надзвучном брзином (брзином већом од брзине звука у датом медију, материјалу) у медију (материјалу), праћено изузетно брзим повећањем притиска, густине и температуре. Усљед ослобађања велике количине енергије у кратком времену настаје ударни талас на малом простору уз тачку гдје се одиграва ослобађање енергије. Ослобођена енергија може се појавити у различитим облицима као што су механичка (кинетичка, потенцијална), електрична, хемијска, топлотна, нуклеарна и електромагнетна енергија. Када ударни талас није подржан непрекидним уносом енергије усљед вискозности средине, долази до расипања и губитка енергије при чему прелази у звучни талас (брзине мање од брзине звука). Имајући у виду област која се разматра, приказ механизма ударног таласа се односи на ударне таласе подржане непрекидним уносом енергије.

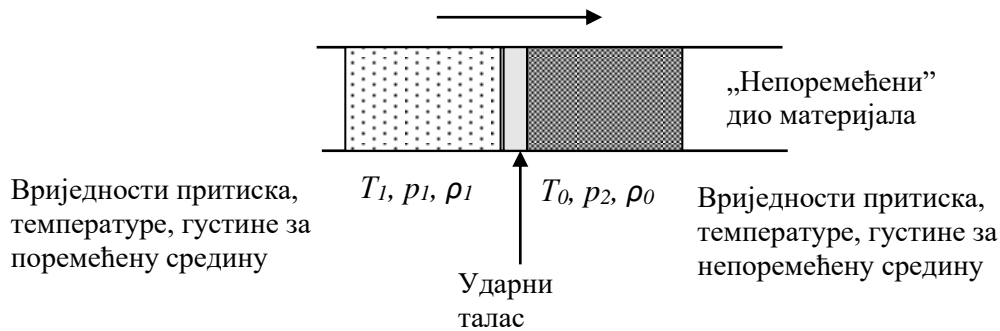
Механизам одигравања ударног таласа се може поједностављено приказати помоћу клипа у цијеви који се креће од почетне нулте брзине до неке коначне брзине константне вриједности.

Прво инфинитезимално<sup>219</sup> повећање притиска на клип резултује покретањем клипа и ширењем таласа брзином мањом од брзине звука ( $C_0$ ). Усљед инфинитезималног покретања клипа долази до компресије (сабијања) материје испред клипа што узрокује повећање густине материје а брзина таласа у гушћем медију ( $C$ ) је већа од претходне брзине  $C_0$  ( $C > C_0$ ). Разлика у брзинама таласних фронтова  $C$  и  $C_0$  ће након одређеног времена резултирати спајањем у један таласни фронт. Имајући у виду да се клип креће континуирано и да се густина медија константно повећава, сваки наредни таласни

---

<sup>219</sup> Бесконачно мали број, односно, број чија је апсолутна вриједност мања од било ког позитивног реалног броја.

фронт посједује већу брзину од претходног те ће се након неког времена спојити у један таласни фронт. Свако повећање брзине таласних фронта узрокује и повећање притиска те након спајања свих таласних фронта долази до нагле промјене притиска и температуре. Ширина зоне у којој се одиграва овај дисконтинуитет (ударни талас) износи неколико молекуларних средњих слободних путања<sup>220</sup> (енг. *molecular mean-free-path lengths*) (слика 130).



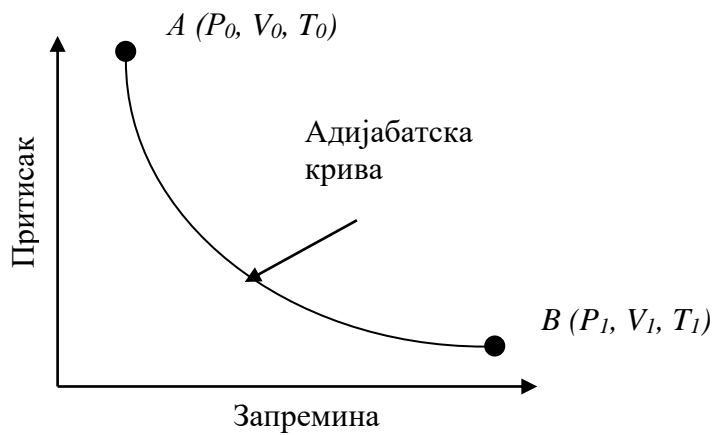
Слика број 130. Кретање ударног таласа

На основу претходно наведеног, уочљиво је да ударни талас раздваја, односно, налази се између непоремећеног и поремећеног дијела средине кроз коју се креће. Контактне површине између поремећеног и непоремећеног дијела средине и предње и задње површине ударног таласа (који посједује веома малу „ширину”) карактеришу различите вриједности температуре ( $T$ ), густине средине ( $\rho$ ) те брзине кретања таласа ( $u$ ) кроз дату средину за „поремећени” ( $T_1, \rho_1, u_1$ ) и „непоремећени” ( $T_0, \rho_0, u_0$ ) дио материје.

Математички модел који описује стање средине на коју дјелује ударни талас се заснива на примјени модела адијабатског процеса који подразумијева да у неком термодинамичком систему не долази до размјене топлоте са околином и да се промјена унутрашње енергије (смањење) врши искључиво за вршења рада тог система према околини. Графички приказ адијабатског процеса се врши у тзв. дијаграму притисак–запремина (слика 131) на коме је представљена адијабатска крива. Адијабатска крива

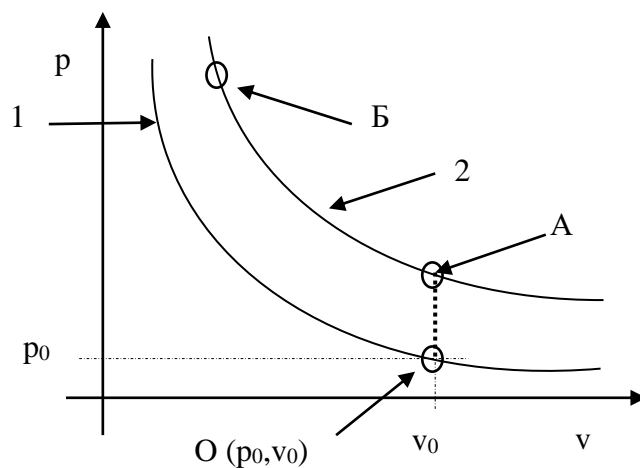
<sup>220</sup> Средња слободна путања је просјечна удаљеност коју честица пређе приликом кретања а која се креће (попут атома, молекула, фотона) између узастопних удара (судар), који мијењају њен смјер или енергију или друга својства честица.

представља могућа стања (притисак и волумен) материје, која се налази под утицајем ударног таласа, приликом промјене од почетног стања до крајњег стања.



Слика број 131. Адијабатска крива

Приликом одигравања процеса детонације, ударни талас који се формира унутар масе експлозивне материје назива се детонациони талас. За описивање стања експлозивне материје у којој се одиграва процес детонације користи се модел адијабатског процеса а који је примијењен на описивање стања средине (испред и позади детонационог таласа) кроз коју се креће ударни талас (слика 132).



Слика број 132. Хугонова крива за процес детонације

Експлозивна материја се налази у почетном стању (тачка  $O$ ,  $p_0$ ,  $v_0$ ). У случају када се не одиграва процес детонације стања материје на коју дјелује, ударни таласи се налазе на кривој број 1. У случају одигравања детонације, полазећи од почетног стања (тачка  $O$ )

у првом кораку након иницирања, долази до ослобађања енергије (права ОА) при чему је процес изохорни (запремина је константна, права ОА) а након тога се стање продуката реакције налази на кривој број 2 (долази до сабијања, до коначног стања, тачка Б, под утицајем детонационог таласа). С обзиром на то да приликом одвијања процеса детонације долази до ослобађања енергије (егзотермни процес, енергија ослобођена у виду топлоте), коначни продукти детонације посједују повишени ниво енергије у односу на почетну материју и, у складу са тим, крива 2 се налази изнад криве 1. Крива која приказује зависност притиска и запремине и представља могућа стања материје (испред и позади детонационог таласа) која се налази под утицајем ударног таласа, полазећи из истог почетног стања назива се Хугонова крива (слика 132). Примјеном модела адијабатског процеса за експлозивне материје, релација између вриједности параметара стања средине у зони испред и позади ударног таласа у процесима дефлаграције и детонације (детонациони талас) описује се помоћу тзв. Ранкин-Хугонових (енг. *Rankine-Hugoniot, RH*) услова уз испуњавање услова који произлазе из закона о одржању масе, момента и енергије:

$$\text{одржање масе: } \rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 = m \quad (63)$$

$$\text{одржање момента: } \rho_1 u_1^2 + p_1 = \rho_2 u_2^2 + p_2 \quad (64)$$

$$\text{одржање енергије: } h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (65)$$

$m$  – масени проток по јединици површине;

$\rho_1, \rho_2$  – густина средине прије и након таласа;

$u_1, u_2$  – брзина кретања средине прије и после таласа;

$p_1, p_2$  – притисак у подручју прије и после таласа;

$h_1, h_2$  – специфична енталпија у подручју прије и после таласа.

Кориштењем Ранкин-Хугонових услова и сређивањем израза дефинисан је тзв. Хугонов (енг. *Hugoniot*) израз за Хугонову криву за процес детонације (крива 2, слика 132):

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_1} \right) (p_2 - p_1) \quad (66)$$

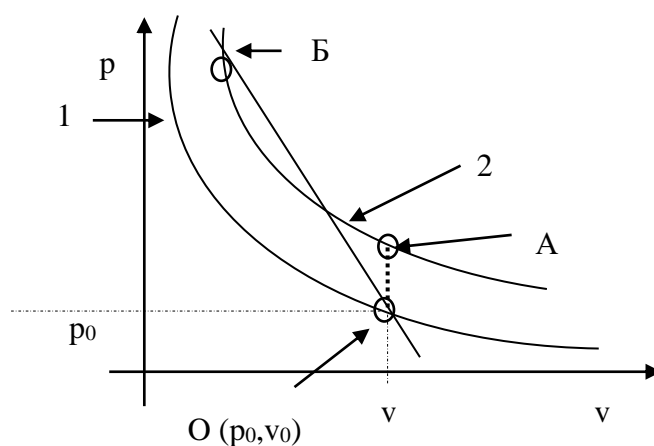
који се може превести у израз чије промјенљиве су притисак и густина:

$$q = \left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left( \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_1} \right) (p_2 - p_1) \quad (67)$$

$\gamma$  – Лапласов коефицијент<sup>221</sup>

$q$  – енергија настала експлозивним сагоревањем (прав ОА, слика 132).

У складу са одвијањем хемијских реакција и ослобађању топлоте (имајући у виду да се приликом одвијања процеса ослобађа велика количина енергије у краком времену) систем се помјера у складу са правом ОБ. Промјена стања материје приликом прелаза са адијабате експлозивне материје (крива 1) на адијабату продуката експлозије (крива 2) је строго одређена и, под условом да је брзина процеса детонације константна, ова промјена се искључиво врши у складу са правом ОБ. Разлог искључивог кретања стања система у складу са правом ОБ објашњава се условом константне брзине процеса детонације (стационарни карактер), односно, да је брзина кретања свих прелазних стања система једнака само у складу са правом ОБ (слика 133).



Слика број 133. Михељсонова крива (Рејлијева крива)

<sup>221</sup> Представља однос топлотног капацитета при константном притиску и топлотног капацитета при константној запремини.

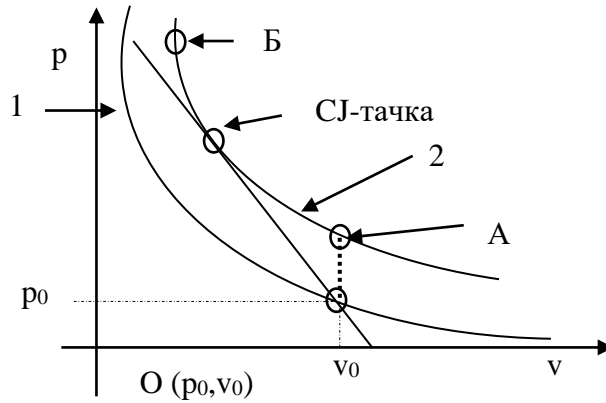
Права (истих брзина свих стања система) ОБ која спаја тачке почетног стања које се налази на адијабати експлозивне материје и коначног стања које се налази на адијабати коначних продуката назива се Михељсонова линија, односно, према западним изворима, Рејлијева (*Rayleigh line*) линија. Карактерише је негативан нагиб приликом приказивања у графикама притисак–специфична запремина. Комбиновањем израза за одржавање масе и одржавање момента настаје израз који дефинише ОБ линију:

$$-m^2 = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1}} \quad (68)$$

стални проток  $m$  и сваку вриједност  $p_1$  и  $\rho_1$  Рејлијев израз има облик:

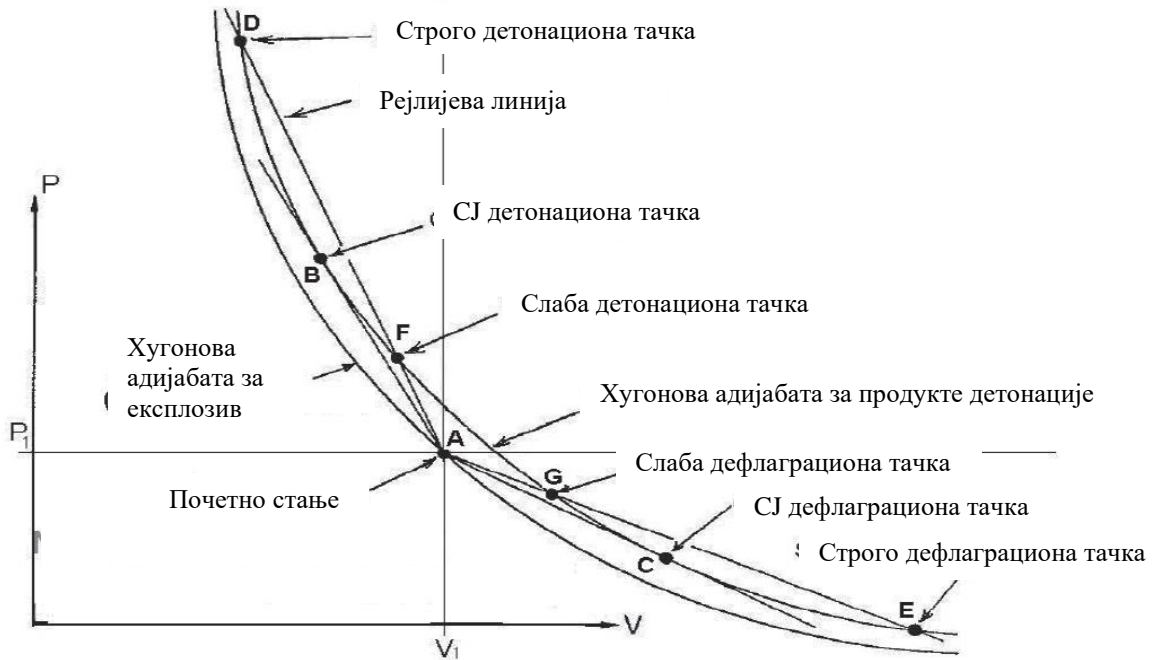
$$P = a \left( \frac{1}{\rho_2} \right) + b, \quad a = -m^2, \quad b = P_1 + m^2 \left( \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (69)$$

Такође, нагиб линије ОБ је пропорционалан брзини одвијања процеса детонације за дату експлозивну материју. На слици 133 крива ОБ пресијеца адијабату гасовитих продуката процеса детонације у двјема тачкама што имплицира да се иста брзина детонације може остварити при два различита стања експлозивне материје (која се налази у процесу детонације) на фронту детонационог таласа. Са становишта физичког тумачења процеса експлозије није могуће да се за два различита стања материје (гасовитих продуката) у процесу детонације остварује иста брзина одвијања процеса детонације (слика 133). Рјешење овог проблема су приказали Чепмен и Жуге (енг. *Chapman-Jouguet*) помоћу закључка да стању продуката детонације насталих у процесу детонације одговара само једно јединствено стање које је дефинисано као тачка Чепмен-Жуге (*point CJ*). Тачка Чепмен-Жуге је тачка у којој Михељсонова (Рејлијева) права тангира Хугонову адијабатску криву продуката детонације (слика 134).



Слика број 134. Михељсонова и Хугонова крива у складу са Чепмен-Жугеовим закључком

На графичком приказу процеса детонације помоћу Хугонове адијабате за експлозивну материју, адијабате продуката детонације и Михељсонове (Рејлијеве) праве могу се уочити тачке које дефинишу карактеристична стања а које, у суштини, представљају рјешења Ранкин-Хугонових услова (слика 135) у складу са Чепмен-Жугеовим закључком.



Слика број 135. Карактеристичне тачке Михељсонове криве [128]

Тачка А се налази на Хугоновој адијабати експлозивне материје и представља почетно стање експлозивне материје, тзв. извор Ранкин-Хугонове криве (енг. *origin of the Rankine-Hugoniot curve*). Одвијање процеса детонације карактерише стање система (параметри испред и позади фронта ударног таласа) који се креће по правој АВ при чему тачка В представља Чепмен-Жугеову тачку детонације. Аналогно претходном, у домени дефлаграције се налази СЈ тачка дефлаграције. СЈ тачке представљају најважније тачке које представљају карактеристике експлозивних материја на основу којих се уочава разлика између различитих енергетских материја. У тачки В нагиб праве АВ дефинише минималну брзину детонације која је и са становишта термодинамике највјероватнија а која се назива стационарна или нормална брзина детонације. Тачка F представља тачку тзв. слабе детонације, тачка D – тачка јаке детонације, тачка G – тачка слабе дефлаграције, тачка E – тачка јаке дефлаграције. Тачке СЈ су тачке равнотежних стања док друге карактеристичне тачке (D, F, G, E) представљају стања система који могу бити или не, односно, појављују се или не.

Истраживања везана за феномен детонације врше се примјеном различитих експерименталних и нумеричких метода. Најчешће кориштене методе су метода са коначним елементима (ФЕМ метод) (енг. *finite element method*)<sup>222</sup> и метода слободних честица (хидродинамика глатких честица)<sup>223</sup> (енг. *free particle methods (smoothed particle hydrodynamics)*) [128].

#### 4. 4. 2. Теорија детонације

Разматрања теорије процеса детонације (приказивање и моделовање) врши се помоћу двије најшире прихваћене теорије:

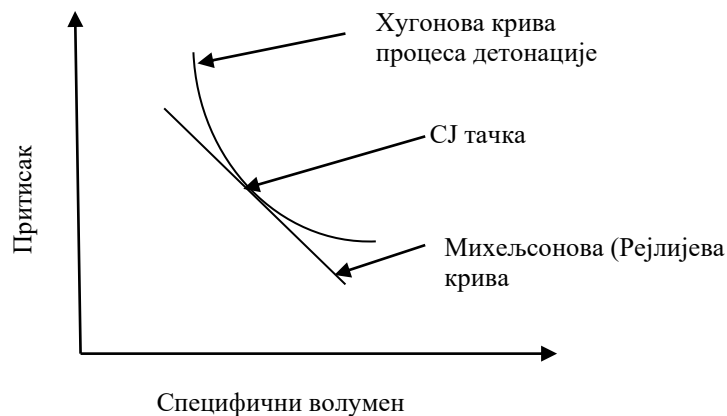
1. Чепмен-Жуге теорија (енг. *Chapman-Jouguet (C-J) theory*)
2. ЗНД теорија (енг. *Zeldovich, von Neumann and Doering (ZND) theory*)

---

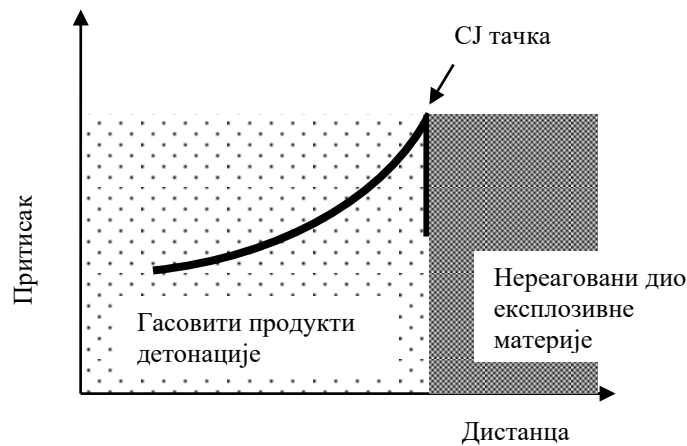
<sup>222</sup> Посебна нумеричка метода за рјешавање парцијалних диференцијалних једначина са двије или три промјенљиве за различите просторе (тј. неки гранични проблеми). Да би ријешао проблем, он дијели велики систем на мање, једноставније дијелове који се називају коначни елементи.

<sup>223</sup> Хидродинамика глатких честица (СПХ) је рачунска метода која се користи за симулацију механике континуалног медија, попут чврсте механике и протока течности.

Према теорији Чепмен-Жугеа, процес детонације карактерише ударни талас који се креће кроз експлозивну материју и под чијим утицајем долази до сабијања и загријавања материје те иницирања хемијске реакције. Процес карактерише стање равнотеже за све вријеме трајања процеса почевши од момента иницирања. Теорија се заснива на неколико претпоставки. Једна од њих је да се ударни талас креће брзином звука за дату локалну атмосферу (брзином звука за дату медиј). Брзина фронта детонационог таласа у равнотежним условима посједује најмању вриједност. Ова брзина се назива брзина детонације или Чепмен-Жугеова брзина. Стање система иза детонационог таласа карактерише тзв. Чепмен-Жугеово стање. Сви параметри овог стања задовољавају Хугонове услове. Модел Чепмен-Жугеа подразумијева да приликом одигравања процеса детонације долази до потпуног ослобађања хемијске енергије садржане у експлозивној материји [128].



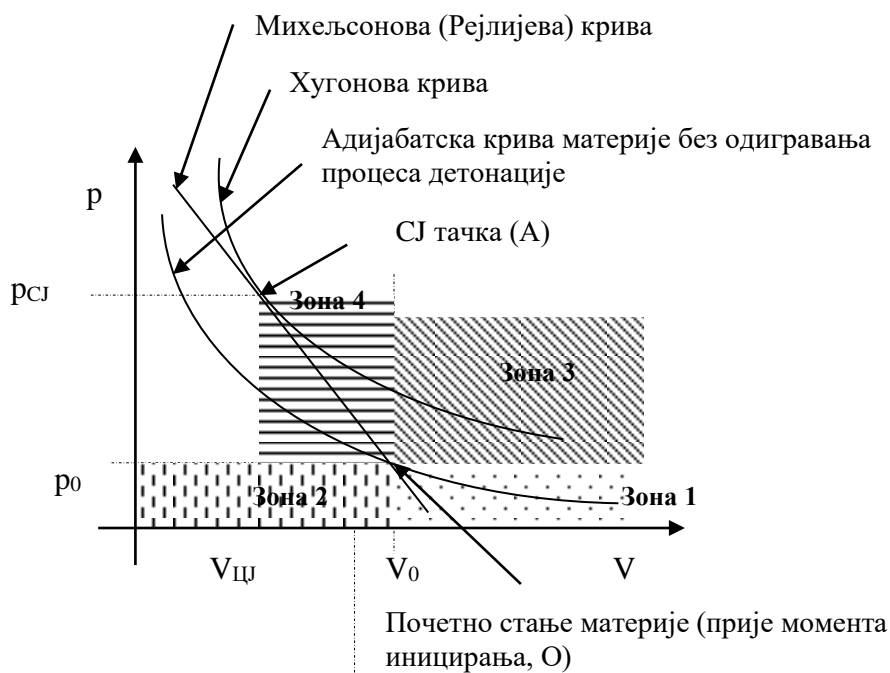
а)



б)

Слика број 136. Графички приказ промјене а) притиска и специфичног волумена; б) притиска у правцу напредовања ударног (детонационог) таласа према Чепмен-Жугеовом моделу процеса детонације

Стање у коме се налазе продукти детонације непосредно након завршетка хемијских реакција се значајно разликује од стања у коме се налази нереаговани дио експлозивне материје који се налази под утицајем ударног таласа. Видљиво је да се хемијска реакција у детонационом таласу одвија уз пад притиска и повећање запремине. У складу са Чепмен-Жугеовом теоријом, могуће је разликовати различите зоне стања експлозивне материје.



Слика број 137. Карактеристичне зоне процеса детонације

Претходно је констатовано да Хугонова крива описује мјесто свих могућих стања (помоћу притиска и волумена) насталих компресијом ударног таласа. Анализом криве може се уочити слjedeће.

- Подручје за које важе услови  $V > V_0$  и  $p < p_0$  представља зону дефлагације, односно, производи дефлагације се брзо шире и не одиграва се компресија (зона 1).

- Подручје дефинисано са  $V < V_0$  и  $p > p_0$  назива се детонациона зона (зона 4).

Карактеристична тачка зоне 4 представља тачка А (*CJ* – тачка) у којој је процес детонације стабилан, односно, детонациони талас непрекидно одржава хемијска енергија и производи експлозије. У таквом стабилном стању, процес детонације карактерише константан интензитет и брзина, односно, брзина детонационог таласа постаје једнака збиру брзине звука кроз медијум и брзине продукта детонације:

$$D_{\text{ЦД}} = C_{\text{ЦД}} + U_{\text{ЦД}} \quad (70)$$

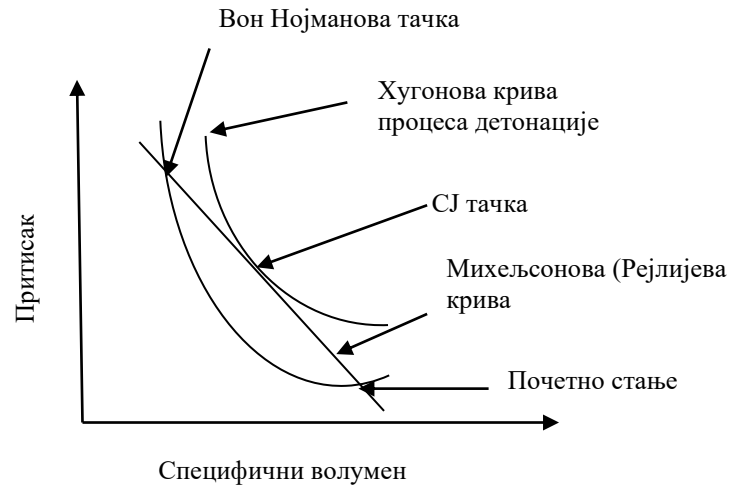
$D_{\text{ЦД}}$  – брзина детонационог таласа

$C_{\text{ЦД}}$  – брзина звука кроз медијум

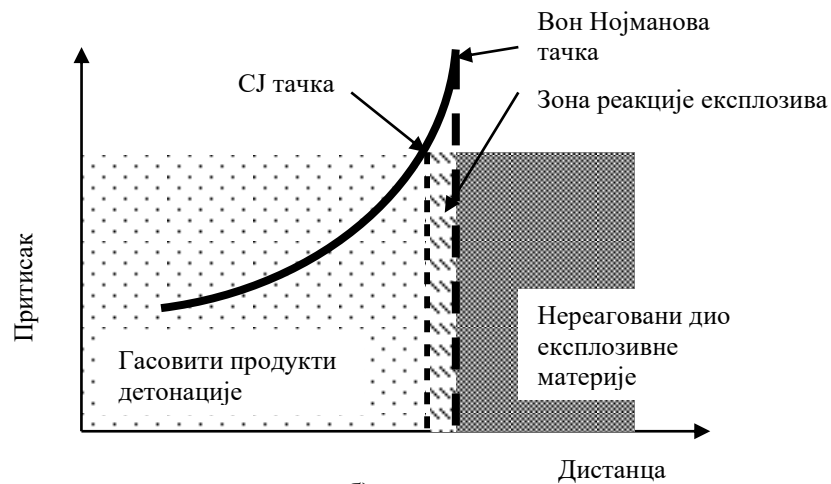
$U_{\text{ЦД}}$  – брзина продукта детонације

- Подручје означено као зона 2 (где је  $V < V_0$  и  $p < p_0$ ) и зона 3 (где  $V > V_0$  и  $p > p_0$ ) немају физички значај, јер супституција ових вриједности резултира у имагинарне вриједности за брзину ударног таласа.

*ZND* модел је развијен на основу Чепмен-Жугеовог модела при чему полази од чињенице да се кроз масу експлозивне материје креће ударни талас и врши сабијање материје. За разлику од *CJ* теорије, *ZND* теорија претпоставља да је материја сабијена на много већи притисак у односу на притисак у *CJ* тачки при чему се експлозивна материја и даље налази у нереагованом стању. Тачка до које је вршена компресија материје назива се Вон Нојманова тачка (eng. *Von Numman spike, vNS*) а вриједност притиска представља карактеристичну вриједност Вон Нојманове тачке. Према *ZND* теорији, хемијске реакције почињу у Вон Нојмановој тачки и завршавају у тачки *CJ* постижући равнотежно стање. Концепт *ZND* теорије је приказан на слици 138.



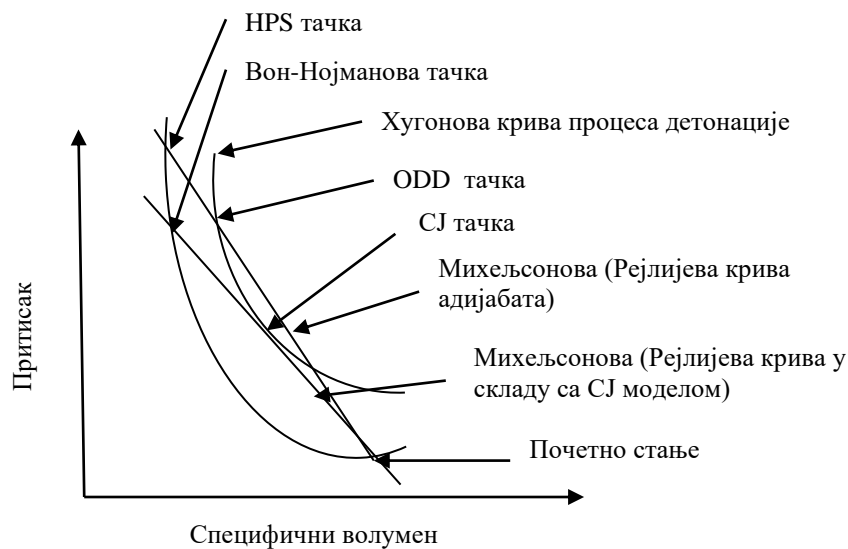
а)



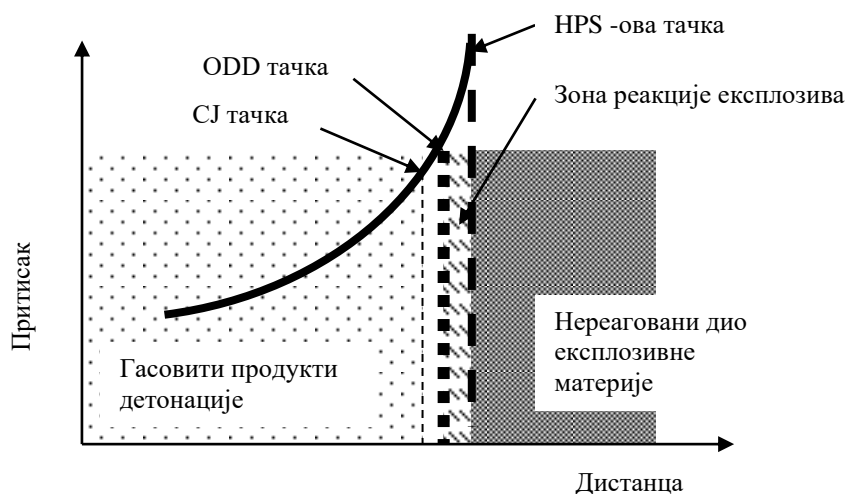
б)

Слика број 138. Графички приказ промјене а) притиска и специфичног волумена; б) притиска у правцу напредовања ударног (детонационог) таласа према ZND моделу процеса детонације

У специфичним условима (различити експлозивни итд.), детонациони талас се може јако компресовати фронтом ударног таласа без икакве реакције. Максимални притисак у експлозији, без икакве реакције, сматра се притиском који одговара Вон-Нумановој тачки ( $vNs$ ). Када је експлозив подвргнут већем притиску од притиска  $vNs$  тачке, сматра се да је изазван још један облик детонације. Такав модел детонације назива се јака детонација или пребрза детонација (енг. *strong detonation or overdriven detonation*, ODD) (слика 139).



а)



б)

Слика број 139. Графички приказ промјене а) притиска и специфичног волумена; б) притиска у правцу напредовања ударног (детонационог) таласа према ZND моделу процеса пребрзе детонације

Модел јаке детонације (ODD) предвиђа да реакција почиње под притиском на тачки високог притиска компресије (енг. *Highly compressed point, HPS*) и завршава у ODD тачки на Хугоновој кривој продуката детонације. Такође је уочљиво да CJ и ZND модел ширење детонације сматра стабилним процесом док ODD модел сматра да је

ширење детонације нестабилан процес. Брзина звука и остали параметри су већи него код *CJ* или *ZND* модела детонације.

#### **4. 3. 3. Транзиција дефлаграције у детонацију**

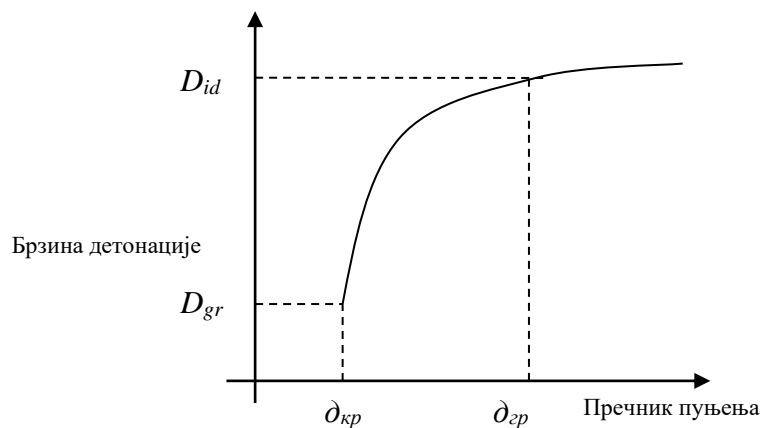
У претходним разматрањима термина линеарног сагоријевања и сагоријевања у маси дефинисане су релације које дефинишу брзину сагоријевања и количину материјала које ће бити утрошено по јединици времена. На основу наведених релација, видљиво је да, када је у процесу дефлаграције (брзог горења, линеарног сагоријевања) брзина којом се троши енергетска материја, односно, настају гасовити продукти горења, једнака или мања од неке брзине којом се настали гасовити продукти уклањају са мјеста горења, не може се очекивати стварање акумулације а, самим тим, и повећање притиска у зони непосредно уз нереаговани дио материје. Када је брзина горења већа од брзине уклањања продуката горења, у зони непосредно уз нереаговани дио материје долази до повећања укупне количине гасовитих продуката што узрокује повећање притиска у тој зони. Са повећањем притиска долази до повећања брзине линеарног сагоријевања а, самим тим, и до даљег повећања количине продуката и притиска. Када у једном моменту линеарна брзина сагоријевања пређе из фазе сагоријевања при подзвучним брзинама у фазу сагоријевања при надзвучним брзинама, долази до стварања детонационог таласа а процес дефлаграције прелази у процес детонације. Овакав прелаз из процеса дефлаграције у процес детонације се назива дефлаграциони–детонациона транзиција (енг. *Deflagration-to-Detonation Transition, DDT*). Практичан примјер *DDT*-а је понашање *TNT*-а. Када се *TNT* рашири у танком слоју и иницира помоћу црног барута долази до процеса дефлаграције (брзог сагоријевања). Ако се иста количина *TNT*-а постави у гомилу (хрпу) долази до процеса детонације. Познавање процеса *DDT*-а је веома важно поготово са становишта терцијарних експлозива у смислу складиштења, транспорта и сл.

#### **4. 3. 4. Утицај различитих параметара на процес детонације**

Имајући у виду сложеност процеса детонације, осим специфичне хемијске енергије садржане у експлозивној материји, на брзину детонационог процеса утичу и физичке карактеристике експлозивног пуњења. У ове карактеристике се убрајају:

- пречник пуњења
- хемијски састав
- густина пуњења
- облога
- гранулација
- примјесе.

Енергетске материје приликом кориштења представљају саставни дио различитих направа и система које се употребљавају у различите сврхе. У конструктивном смислу ове направе, предмети, системи и сл. су напуњени експлозивним материјама ради обезбјеђења функционалности самих направа. Једну од веома битних карактеристика које утичу на брзину одвијања процеса детонације представља тзв. пречник пуњења. Истраживања су показала да се са повећањем пречника експлозивног пуњења повећава и брзина детонације до неке граничне вриједности пречника пуњења ( $d_{gr}$ ) при чему брзина детонације постиже максималну вриједност која се назива идеална брзина детонације ( $D_{id}$ ). Такође је уочено да, ако пречник пуњења има једнаку или мању вриједност од неког минималног пречника, није могуће одвијање стабилног детонационог процеса, односно, није могуће простирање детонационог таласа без обзира на снагу почетног импулса. Минимални пречник при коме за мање вриједности пречника пуњења није могуће развијање стационарног детонационог таласа назива се критични пречник ( $d_{кр}$ ), односно, критични пречник представља најмањи пречник пуњења при којем је могуће одвијање стационарног процеса детонације при коме брзина детонације достиже минималну могућу вриједност ( $D_{gr}$ ).



Слика број 140. Зависност брзине детонације од пречника пуњења

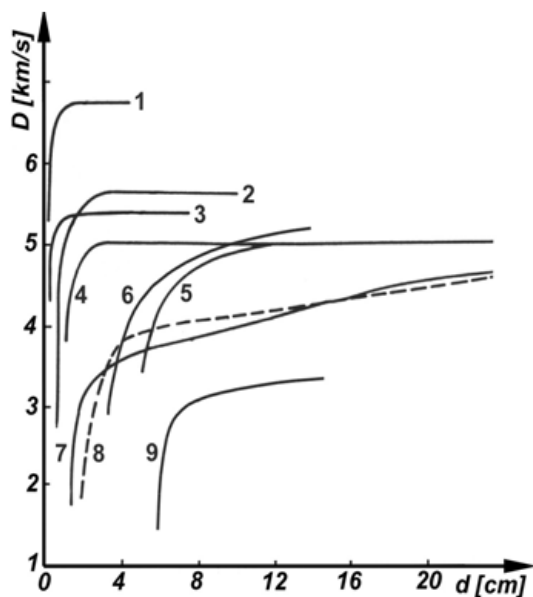
Математички опис зависности брзине детонационог процеса од пречника пуњења је приказана помоћу израза за хиперболу:

$$D = D_{id} - (D_{id} a / \delta) \quad (\text{Ејринг}) \quad (71)$$

$$D = D_{id} - (D_{id} a / \delta - \delta_{kr}) \quad (\text{Кемпбел}) \quad (72)$$

$a$  – ширина зоне хемијских реакција у детонационом таласу.

Различите експлозивне материје показују различите вриједности граничног и критичног пречника пуњења.

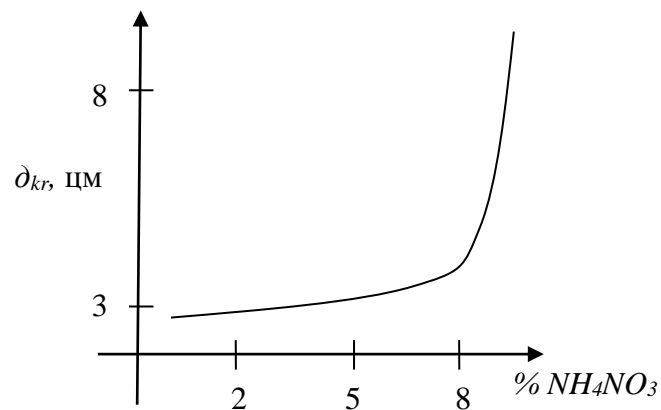


Слика број 141. Зависност брзине детонације од пречника пуњења за поједине бризантне експлозиве и баруте: 1. хексоген ( $0,15 \leq \delta \leq 0,20$ ),  $\rho_0 = 1,20$ ; 2. EDNA ( $0,30 \leq \delta \leq 0,42$ ),  $\rho_0 = 1,0$ ; 3. TEN ( $0,30 \leq \delta \leq 0,42$ ),  $\rho_0 = 0,95$ ; 4. TNT ( $0,15 \leq \delta \leq 0,20$ ),  $\rho_0 = 1,0$ ; 5. TNT ( $4 \leq \delta \leq 6$ ),  $\rho_0 = 1,0$ ; 6. NGB-081,  $\rho_0 = 0,957$ ; 7. Аматол 50/50, аминијум-нитрат ( $0,8 \leq \delta \leq 0,6$ ),  $\rho_0 = 1,0$ ; 8. TNT – натријум-нитрат (50/50), ( $0,29 \leq \delta \leq 0,58$ ),  $\rho_0 = 1,15$ ; 9. NGB-231,  $\rho_0 = 0,808$ . Густина  $\rho_0$  је изражена у  $gr/cm^3$ , а гранулација  $\delta$  у  $mm$ .

Вриједности критичног пречника зависе од различитих параметара као што су:

- хемијски састав
- температура
- величина честица
- густина
- облога.

Веома значајан утицај на вриједности критичног пречника се испољава у зависности од хемијског састава експлозивне материје. Уопштено, експлозивне материје које садрже једну хемијску супстанцу посједују значајно мање вриједности критичног пречника у односу на смјешу експлозивних супстанци. На слици 142 је приказана зависност вриједности критичног пречника за привредни експлозив аматол (смјеса амонијум-нитрата и *TNT*-а) у зависности од садржаја амонијум-нитрата.



Слика број 142. Зависност критичног пречника од садржаја амонијум-нитрата

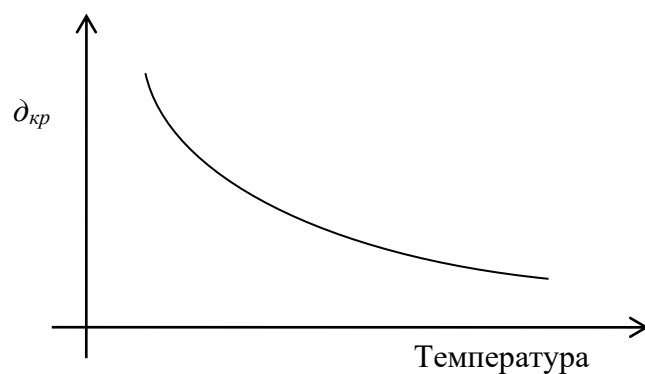
У табели 63 су приказане вриједности критичног пречника за различите експлозивне материје.

Табела број 63. Вриједности критичног пречника за различите чврсте и течне експлозивне материје

Чврсте експлозивне материје	Течне експлозивне материје
-----------------------------	----------------------------

Материја	$d_{кр}, mm$	Материја	$d_{кр}, mm$
Олово-азид	0,01– 0,02	87,5% тетранитрометан, 12,5% бензен	0,1
Пентрит	1–1,5	72% азотна киселина, 28% бензен	0,5
Хексоген	1–1,5	Нитроглицерин (300 <sup>0</sup> Ц)	2
Оловни пикрат	2–3	Нитроглицерин (600 <sup>0</sup> Ц)	1
Пикринска киселина	6	Течни тротил (81 <sup>0</sup> Ц)	62
Тротил	8–10	Течни тротил (240 <sup>0</sup> Ц)	6
Аматол (79% амонијум- нитрат, 21% ТНТ)	10–12	Тетранитрометан	16
Аматол (90% амонијум- нитрат, 10% ТНТ)	15		
Смјеша 80% амонијум- нитрат, 20% Al	12		
Амонијум-нитрат	100		

Зависност критичног пречника од почетне температуре показује да за ниже вриједности температуре експлозивне материје посједују већи критични пречник што се објашњава утицајем температуре на брзину одвијања хемијске реакције (слика 143).



Слика број 143. Зависност критичног пречника од температуре

Смањење величине честица експлозивног материјала доводи до смањења вриједности критичног пречника. Разлог оваквог понашања лежи у чињеници да смањењем величине честица долази до сужавања зоне хемијских реакција у фронту детонационог таласа.

Резултати експерименталних испитивања показују да код експлозивних материја које су сачињене од једне супстанце вриједност критичног пречника се смањује са повећањем густине за разлику од експлозивних смјеша код којих се вриједности критичног пречника повећавају са повећањем густине.

Присуство облоге доводи до смањења критичног пречника и код експлозивних материја сачињене од једне супстанце и код експлозивних смјеша.

Према теоријским поставкама теорије детонације, брзина детонације је условљена специфичном хемијском енергијом (енергијом међумолекуларних веза у супстанци). Топлота експлозије (која се ослобађа у хемијским реакцијама) зависи од хемијског састава експлозивне материје и представља једини енергетски извор за одржавање параметара детонационог таласа, односно, одигравање стационарног процеса детонације (одигравање процеса константном брзином).

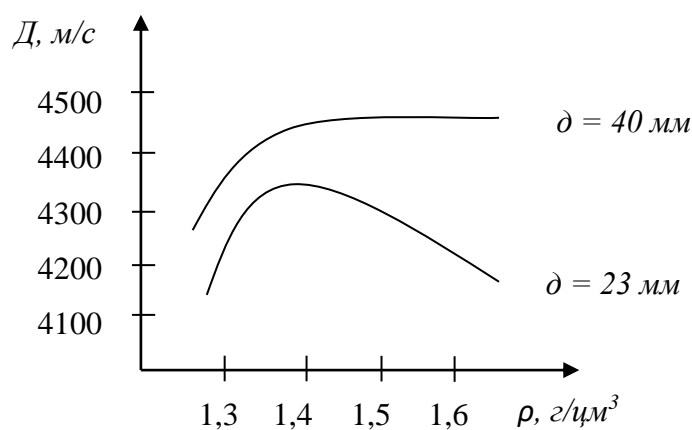
Претходно је наведено да за пречнике пуњења који имају веће вриједности од граничног пречника утицаје на брзину детонације показују топлина експлозије и густина пуњења. Зависност брзине детонације од густине пуњења за експлозивне материје и њихове смјеше које имају општу емпиријску формулу  $C_aH_bO_cN_d$  карактерише линеарна зависност која се изражава:

$$D = A + B\rho \tag{73}$$

$\rho$  – густина експлозивне материје

$A, B$  – нумерички коефицијенти.

Поједине експлозивне материје показују различито понашање у односу на претходно приказану линеарну зависност брзине детонације од густине пуњења. Експлозивне смјеше на основи амонијум-нитрата карактерише у почетном дијелу повећање брзине детонације са порастом густине пуњења (до одређене вриједности густине пуњења) а затим са даљим повећањем густине пуњења долази до наглог смањења брзине детонације или престанка одвијања процеса детонације. Слично понашање амонијум-нитрата је уочено и приликом испитивања различитих пречника пуњења (слика 144).



Слика број 144. Зависност брзине детонације од густине на два пречника пуњења (аматол 90/10)

Утицај облоге на експлозивном пуњењу се огледа у спречавању утицаја вањске средине (продирања гасова који врше разрјеђење, промјену детонационих параметара) на зону хемијских реакција у детонационом таласу. Резултати испитивања су показали да повећање дебљине облоге доприноси повећању брзине процеса детонације.

Табела број 64. Утицај дебљине облоге на брзину детонације ливеног тротила (густина 1,59 г/см<sup>3</sup>)

Пречник пуњења, mm	Дебљина челичне облоге, mm	Брзина детонације m/s
21	3	6555–6700

29	10	6700
75	14,5	6595
160	25	6690
300	50	6710

Величина честица експлозивне материје утиче на величину и број ваздушних укључака у пуњењу који показују утицај на механизам одвијања процеса детонације. Под утицајем детонационог таласа долази до ударног сабијања ваздушних укључака а последица је њихово нагло загријавање и повећање температуре те се почињу понашати као „жаришта реакција”. У табели 65 су приказане вриједности брзине детонације за различите величине зрна аматола (80% амонијум-нитрат, 20% *TNT*).

*Табела број 65. Утицај величине честице на брзину детонације аматола*

Величина честица <i>mm</i>	Брзина детонације <i>m/s</i>
0,053-0,061	4430
0,124-0,149	4150
0,297-0,350	3980
0,149-0,500	3820
0,589-0,711	3670
0,711-0,833	3380
0,833-1,001	2880
1,001-1,191	2670

Видљиво је да приликом смањења величине честица долази до повећања брзине детонације.

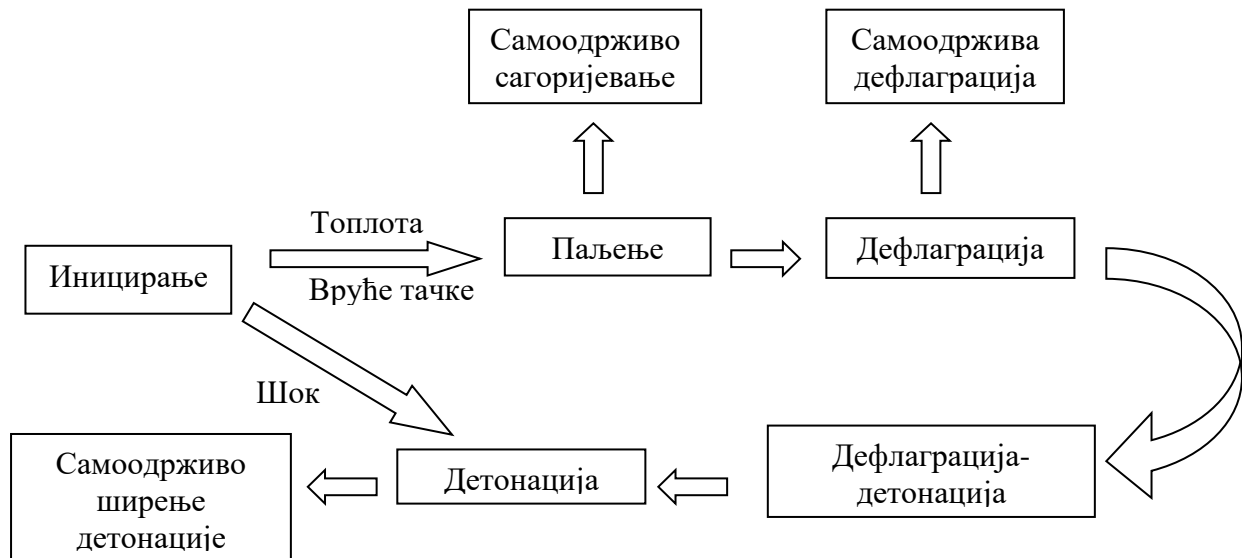
Утицај примјеса (додатака) на брзину детонационог процеса зависи од врсте и количине доданих примјеса. Инертни додаци претежно доводе до смањења брзине детонације.

## **5. ВАЖНИ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТСКИХ МАТЕРИЈА**

Имајући у виду веома широку примјену енергетских материја у различитим областима, са становишта практичне примјене неопходно је размотрити неколико важних аспеката кориштења енергетских материја као што су иницирање (покретање) експлозивних процеса, ефекти који се појављују приликом употребе експлозивних материја, као и ефекти експлозивних процеса на људе и животну средину.

### 5. 1. Иницијација (иницирање експлозивних материја)

Уопштено, процес декомпозиције енергетских материја обухвата више стадија (слика 143). Одвијање процеса зависи од великог броја фактора као што су физичко-хемијске карактеристике енергетске материје, услова под којим се врши процес декомпозиције, конструктивна изведба уређаја у којим се користе енергетске материје и сл.



Слика 145. Приказ кретања процеса од момента иницирања до одвијања самоодрживог процеса

Иницијација енергетских материја представља процес приликом којег се почетак хемијске егзотермне реакције и декомпозиције материја одвија под утицајем вањског импулса. Неопходан услов за одигравање процеса иницијације је присуство велике количине енергије садржане у вањском импулсу која се приликом контакта са експлозивном материјом манифестује у виду топлотне енергије. Када енергетска

материја достигне неку граничну вриједност температуре<sup>224</sup> или вишу, започиње процес декомпозиције енергетске материје.

Поступак иницирања може се одиграти намјерно или ненамјерно. Намјерно покретање иницирања доводи до намјерног настанка вањског импулса који доводи до принудног паљења система.

Ненамјерно покретање поступка иницирања такође доводи до ненамјерног настанка вањског импулса а који доводи до самопаљења система.

Покретање процеса декомпозиције енергетских материја је могуће на два начина:

- самопаљења система
- принудног паљења система.

### **5. 1. 1. Самопаљење система**

Појава самозапаљења је присутна у системима у којима се одвија самоубрзавајући егзотермни процес приликом чега долази до акумулирања топлоте и достизања температуре самопаљења. Оваква појава се у литератури назива топлотна експлозија. Прва осматрања и истраживања везана за процес самопаљења провео је Вант Хоф а затим Ле Шателије. Савремени теоријски приступ појави самозапаљења је поставио Семјонов 1928. године. На основу теорије Семјонова, приликом одигравања егзотермних процеса у неком систему долази до постепеног повећања температуре система праћено одвођењем топлоте у околину путем зидова посуде у којој се материја налази или путем површине узорка. С обзиром на различите начине одвођења топлотне енергије (кондукција, конвекција, зрачење) и различиту топлотну проводљивост различитих материја, расподјела температуре није константна по цијелој запремини узорка. Температура има најниже вриједности на површини материје док се највише вриједности температуре налазе у средини материје. Температурне разлике, у реакционом простору, узрокују и различите брзине одвијања реакција а, самим тим, и

---

<sup>224</sup> Температура представља вриједност топлотне енергије (мјера количине топлотне енергије)

концентрације реактаната при чему су температурне и концентрационе разлике узрок преноса топлоте у систему. Када се створе тзв. критични услови, долази до самопаљења материје. Критичним условима се сматрају услови када је онемогућена стационарна (равномјерна) расподјела температуре у маси. Појава самопаљења је карактеристична за погонске пропеланте у чијем саставу се налази нитроцелулоза коју карактерише склоност према термичкој декомпозицији и на нормалној температури а која је праћена ослобађањем одређене количине топлоте.

### **5. 1. 2. Принудно паљење (иницирање)**

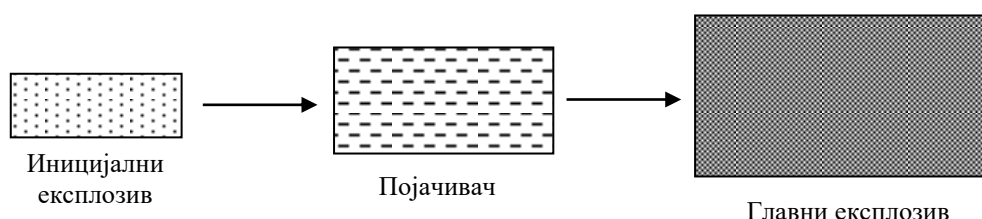
Принудно паљење енергетских материја се врши путем различитих вањских импулса као што су топлота или механички удар усљед чега долази до паљења, одвијања процеса горења или дефлаграције (убрзаног горења) и преласка у процес детонације или директног преласка у процес детонације под условом иницирања снажног вањског импулса (слика 145). Паљење се одиграва при температури паљења која је карактеристична за поједине супстанце, ако је линеарни губитак топлоте у околини мањи од топлоте створене егзотермном реакцијом.

Уопштено, иницирање енергетских материја је термички процес. До покретања експлозива долази када се помоћу енергије вањског импулса врши побуда молекулских вибрационих стања и у коначној фази долази до прекида хемијских веза у молекулима, уз егзотермни распад. У процесу иницирања, усљед дејства вањског импулса (удар, трење, електростатички електрицитет) долази до претварање енергије вањског импулса у топлотну енергију уз адијабатско загријавање. Енергија вањског импулса у првом моменту доводи до распада првих молекула са којима је у контакту и доводи до настанка гасовитих продуката те настају тзв. вруће тачке (енг. *hot spots*) које представљају мали гасни мјехурићи величине 0,1–10 микрометара који су сабијени адијабатском компресијом и загријани на веома високе температуре (900<sup>0</sup>C). С обзиром на то да су вриједности притиска и температуре врућих тачака значајно већи од вриједности притиска и температуре сусједних молекула, долази до преноса енергије на сусједне молекуле, односно, распада молекулске структуре уз ослобађање енергије (егзотерман процес) при чему се одиграва иницирање сљедећих сусједних молекула и шири процес декомпозиције (експлозије). Друга врста могућих жаришта су мали, веома тврди кристали или кристалне игле. Прије пуцања кристала, неопходно је

обезбиједити потребну енергију путем трења или притиска, како би се наелектрисања истог знака зближила. Та се енергија поново ослобађа распадањем кристала и може резултирати стварањем вруће тачке. У условима када се енергија довољном брзином ослобађа у околину, настале вруће тачке неће изазвати паљење и коначно детонацију. Да би се процес одиграо, потребно је да најмања вриједност температуре износи  $430^{\circ}\text{C}$  да би дошло до активирања секундарних експлозива а што имплицира да експлозиви са тачком паљења испод наведене температуре не могу бити иницирани путем врућих тачака. Енергетске материје у течном стању такође се могу иницирати механизмом врућих тачака и адијабатске компресије. Вријеме постојања врућих тачака износи  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  секунди. Имајући у виду да чврсте енергетске материје карактерише кристална структура, формирање врућих тачака настаје усљед међукристалног трења чији је животни вијек приближно  $10^{-6}$  секунди.

У претходним поглављима су приказане различите карактеристике енергетских материја са становишта осјетљивости на вањске импулсе усљед којих долази до покретања процеса иницирања. Такве карактеристике у највећој мјери одређују могућу примјену енергетских материја са становишта производње, складиштења, транспорта и кориштења. Да би се испунили наведени услови, односно, постигла безбједност у руковању, транспорту и складиштење са једне стране а, са друге, поузданост особина са становишта употребе (система и уређаја у којима се налазе енергетске материје), иницирање (покретање) процеса дефлаграције или детонације се врши помоћу система под називом „експлозивни воз” (енг. *Explosive Train*). Експлозивни воз садржи:

- иницијални (покретачки) експлозив кога карактеришу висока осјетљивост и мала енергија излаза као што су примарни експлозиви
- посреднички (интермедијарни) експлозив (појачивач, бустер) којег карактерише средња осјетљивост и средњи ниво ослобођене енергије
- главни експлозив којег карактерише ниска осјетљивост и висока вриједност ослобођене енергије



Слика број 146. Шема експлозивног воза

Табеларни приказ врста експлозивних материја и карактеристика које се користе у тзв. експлозивном возу су приказане у табели 66.

Табела број 66. Примјер састава и карактеристика енергетских материја које се налазе унутар тзв. експлозивног воза [76]

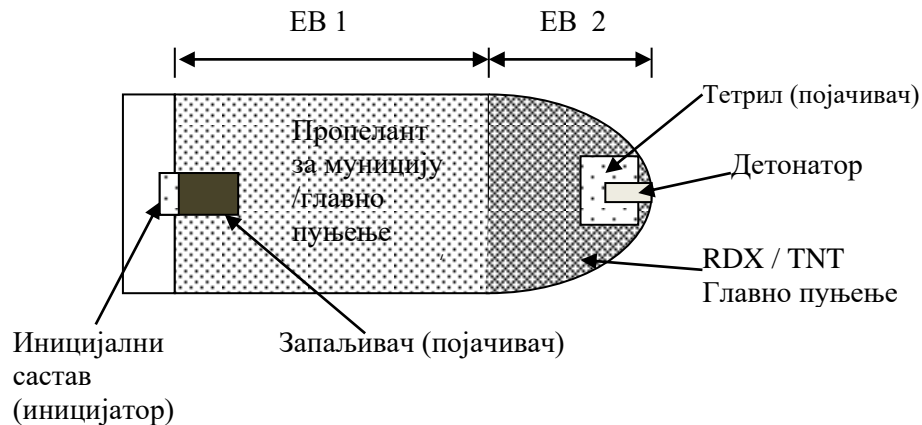
Улога	Детонатор	Појачивач	Главно пуњење
Назив компоненте	Оловни азид+оловни стифнат	ПЕТН	НМХ
Релативна осјетљивост (% у односу на ТНТ)	9 %	15 %	35 %
Брзина детонационог таласа (м/с)	5100	8300	9160

С обзиром на високу осјетљивост, примарни експлозивни усљед вањског утицаја се иницирају и предају мању и довољну количину енергије за активирање појачивача који предају довољно енергије за покретање главног експлозивног пуњења. Укупно повећање енергије од иницијалног експлозива до главног пуњења може да износи у омјеру од 1 : 10 милиона.

Разликују се два типа експлозивних возова у зависности од типа процеса са којим се врши иницирање:

- игниферни воз („горећи воз”)
- дисруптивни воз („детонирајући воз”).

Распоред саставних елемената је исти за све типове експлозивног воза. Разлика се огледа у томе да се процес у игниферном возу одиграва путем дефлаграције док је процес присутан у дисруптивном возу процес детонације.



Слика број 147. Шема експлозивног воза у пројектилу

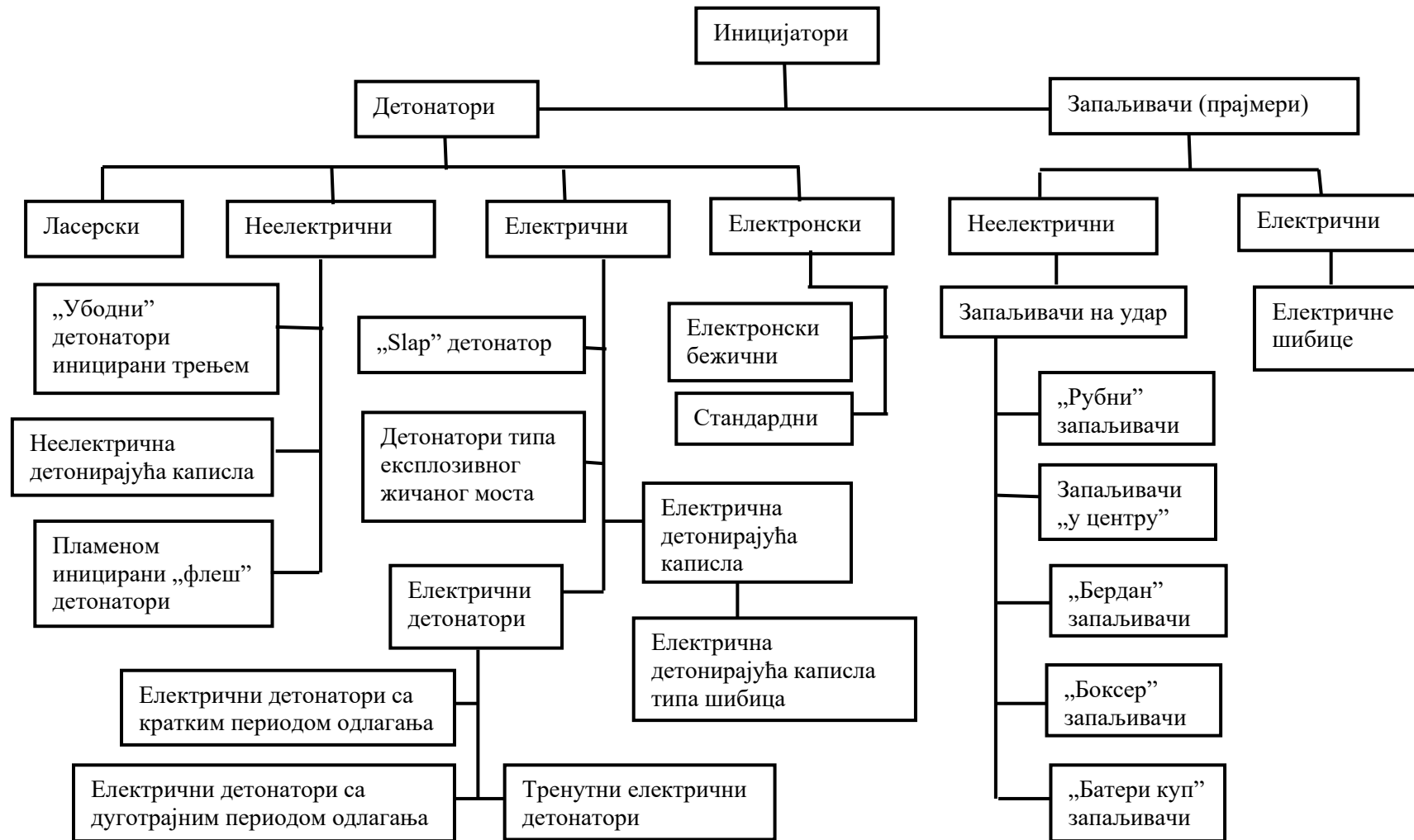
На слици 145 су шематски приказани примјери два експлозивна воза. Први експлозивни воз је означен са ЕВ1 и односи се на пуњење пропеланта који се користи за покретање пројектила. Експлозивни воз ЕВ1 представља тзв. игниферни воз. Други експлозивни воз је означен са ЕВ2, има улогу активирања приликом доласка на циљ и представља тзв. детонациони воз.

Под називом иницијатор се сврстава широка група уређаја којима је циљ активирање енергетског материјала (експлозива, пиротехничких материја, пропеланата). Конструисани су на начин да продукују малу излазну енергију узроковану вањским импулсом и иницирају већу количину енергије која се брзо ослобађа (појачивач). Покретањем појачивача обезбјеђује се довољна количина енергије за активирање главног пуњења. Приликом класификације иницијатора користе се различити термини и номенклатуре у зависности од извора података. Уопштено, са становишта метода иницирања енергетских материја, разликују се два система под називима:

- детонатори (енг. *detonator*)
- запаљивачи или прајмери (енг. *igniter, primers*).

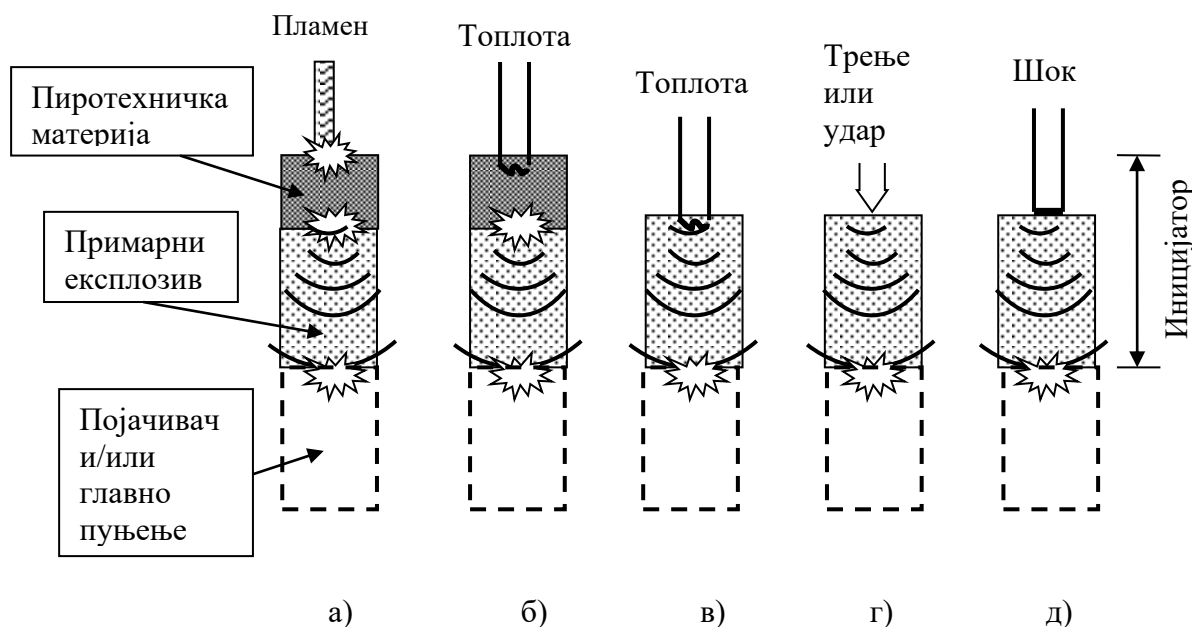
Детонаторски системи за иницирање енергетских материја остварују свој улогу путем ударног (детонационог) таласа док запаљивачи функционишу на основу пламена (топлоте).

Класификација иницијатора на основу различитих техничких конструкција је приказана на слици 148.



Слика број 148. Класификација иницијатора

С обзиром на велики број техничких и конструктивних рјешења извођења детонатора и запаљивача, иницијатори се могу класификовати на основу природе вањског импулса помоћу којег се одиграва процес иницијације енергетске материје.



Слика број 149. Шематски приказ метода иницирања енергетских материја а) пламеном; б) „врућом жицом” и пиротехничком материјом; в) „врућом жицом” без пиротехничке материје; г) механички удар или трење; д) експлозивни мост

У претходном времену, највише кориштена метода иницирања енергетских материја представља метода иницирања помоћу пламена (слика 149а) при чему пламен представља покретачки импулс путем којег се врши иницирање (паљење) пиротехничке смјесе. Процес дефлаграције пиротехничке смјесе обезбјеђује довољну количину енергије за иницирање примарног експлозива. Иницирани примарни експлозив путем процеса детонације иницира појачивач и/или главно експлозивно пуњење.

Слична метода се заснива на кориштењу топлотног импулса при чему се разликују методе са кориштењем пиротехничких материја (жица електричног моста је у контакту са пиротехничком материјом која, након паљења, активира примарни експлозив, слика 149б) и методе без употребе пиротехничких материја (жица електричног моста је у директном контакту са примарним експлозивом, слика 149в). Системи у којима се

користе пиротехничке материје се називају и електричне шибице (енг. *electric match*) и представљају једну од најчешће кориштених система (детонаторска каписла).

Такође су развијени системи за иницирање детонације без кориштења примарних експлозива под називом детонатори без примарних експлозива (енг. *Non Primary Explosives Detonator, NPED*). Функционисање ових детонатора се заснива на феномену дефлаграционо-детонационе транзиције (*DDT*). Секундарни експлозив *PETN* показује способност *DDT*-а након запаљења пиротехничке материје.

Методe и системи засновани на ефекту механичког удара или трења (слика 149г) најчешће се употребљавају за активирање различитих убојних средстава као и за паљење пропеланата. Почетни импулс се остварује механичким ударом или трењем. Енергетске материје које се користе за израду морају посједовати високу осјетљивост ради поузданости покретања система у коме се користе.

Висока поузданост, прецизност и релативна безбједност карактеришу систем иницирања под називом експлозивни мост (енг. *Exploding-bridgewire, EBW*) и иницијална експлозивна фолија (енг. *exploding foil initiators, EFI*) (слика 149д). Функционисање методе се заснива на брзом загријавању златне или платинасте жице помоћу великих вриједности јачине струје. Услјед процеса загријавања долази до испаравања метала при чему се кроз густе паре метала и даље креће значајна количина струје вршећи даље загријавање. На одређеној температури долази до детонације металних пара након чега се путем насталог детонационог таласа, процес детонације шири кроз масу примарне енергетске материје.

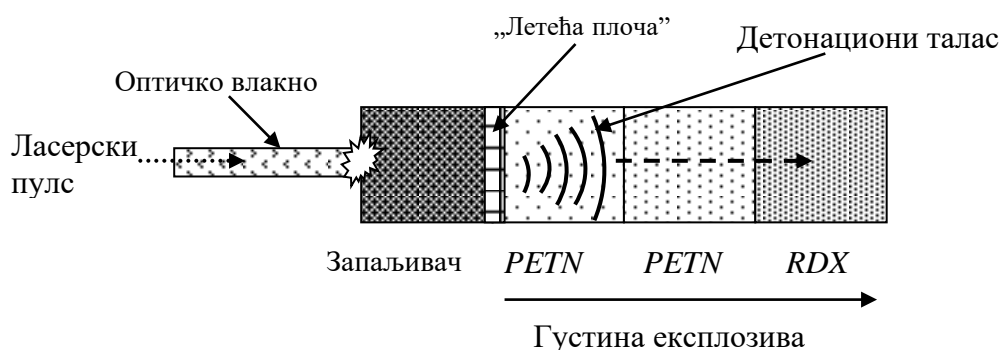
Недостаци који су се показали приликом практичне примјене претходно наведених метода и система за иницирање енергетских материја, довеле су до даљих истраживања у правцу изналажења и примјене напредних система за иницирање, како у смислу нових енергетских материја тако и у правцу извора вањског импулса. Прве резултате истраживања у правцу кориштења ласерских зрака<sup>225</sup> за иницирање енергетских материја су објавили крајем шездесетих и почетком седамдесетих година руски

---

<sup>225</sup>Ласер је уређај који емитује свјетлост кроз оптичко појачање а на основу емисије стимулисаног електромагнетног зрачења. Први ласерски уређај је конструисан 1960. године. Ласерски извори свјетлости посједују временску и просторну кохерентност (усклађеност два или више оптичких таласа), односно омогућава фокусирање на једну тачку и емитовање свјетлости у једној боји.

научници предвођени Бришом (енг. *Brish et al.*) и амерички научници Меничели и Јанг (енг. *Menichelli and Yang*). Практична употреба је била веома ограничена с обзиром на конструкцију ласерских уређаја (тзв. ласери чврстог стања, енг. *Solid-state lasers*, који користе кристалне или стакласте структуре чврстих материја допиране другим елементима). Појавом комерцијално доступних ласерских диода<sup>226</sup> настављају се интензивна истраживања а први резултати су објављени 1988. године.

Шематски приказ конструкције система са ласерском диодом је приказан на слици 150. Систем је конструисан без примјене примарног експлозива (*NPED* систем).



Слика број 150. Шема ласерског иницирања *NPED* система

Истраживања су показала да ласерске диоде посједују мање енергије у односу на друге методе иницирања што уједно представља и ограничавајући фактор.

Табела број 67. Карактеристике ласерских и електричних детонатора [20]

Карактеристика	„Врућа жица”	„Експлозивни мост”	„Експлозивна фолија”	Nd:YAG ласер	Ласерска диода
Јачина струје [А]	5	500	3000	10–100	10
Напон [V]	20	500	1500	10–100	2
Снага [W]	1	$10^5$	$3 \times 10^6$	$\geq 10^2$	1–10
Вријеме активације	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$ – $10^{-6}$	$10^{-6}$ – $10^{-3}$

<sup>226</sup>Ласерска диода је полупроводнички уређај који омогућава директно претварање електричне енергије у свјетлост.

Иницијално пуњење	Оловни азид, оловни стифнат, <i>PETN</i>	<i>PETN</i>	<i>PETN, HNS</i>	<i>PETN, RDX,</i> <i>HMX, Tetryl</i>	<i>BNCP, CP,</i> пиротехничке смјесе
----------------------	---	-------------	------------------	---	--

*BNCP* – тетра амин-цис-бис(5-нитро-2Н-тетразолато-N2) кобалт(III)-перхлора; *CP* – пента-амин (5-цијано-2Н-тетразолат) кобалт(III)-перхлорат

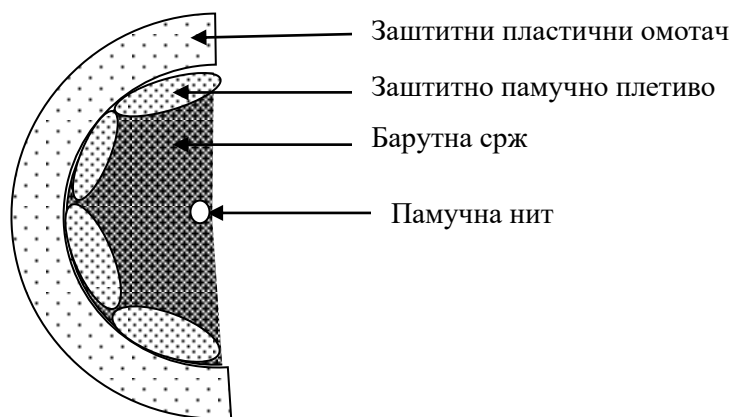
Са становишта практичне примјене, иницијатори чине конструктивни елемент који је дио сложенијих система активирања различитих експлозивних и пиротехничких направа под називом упаљачи (енг. *fuse, fuze*). У зависности од литературних извора, термин упаљачи (*fuse*) представља направе једноставне конструкције састављене од штапина (фитиља, корда) и детонирајуће каписле чија је основна улога иницирање експлозивног пуњења. Са друге стране, термин упаљачи (енг. *fuze*) означава софистициранији уређај за активирање експлозивног пуњења који укључује механичке и/или електронске компоненте. У примјени, најчешће кориштене једноставне конструкције (упаљачи, енг. *fuse*) су тзв. системи с штапином. Класификација система са штапином је приказана на слици 151.



Слика број 151. Класификација система са штапином

Систем са спорогорећим штапином је састављен од спорогорећег штапина и детонаторске каписле (иницијатора). Приликом иницирања барутних пуњења користи се систем без детонаторске каписле док се приликом иницирања експлозивних пуњења користи систем с детонаторском капислом.

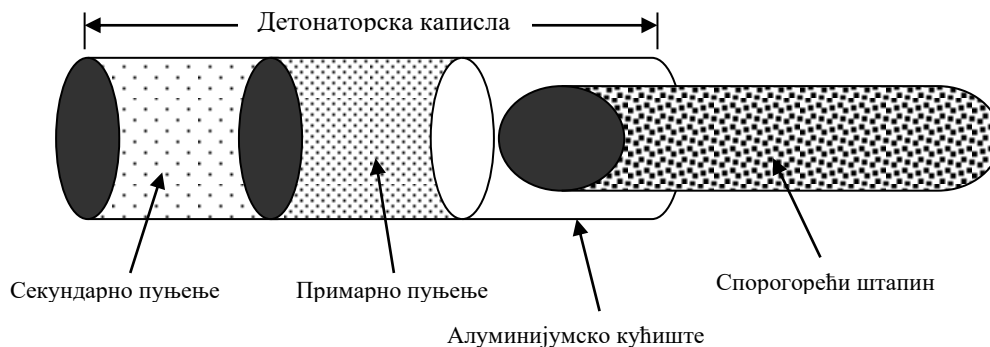
Спорогорећи штапин је израђен у облику канапа. Сачињавају га пластични заштитни омотач, заштитно плетиво израђено од памучних влакана и срж израђена од ситнозрног барута. Кроз срж барутног пуњења је постављена памучна нит са улогом одржавања континуитета барутне сржи.



Слика број 152. Шематски приказ попречног пресека спорогорећег штапина

Брзина горења спорогорећег штапина износи од 100 до 150 секунди за један метар штапина при чему се користи просјек од 120 секунди за један метар штапина.

Детонаторска каписла је израђена од алуминијумске чахуре која садржи примарно и секундарно пуњење. Примарно пуњење представља претежно оловни азид а секундарно пуњење, у зависности од произвођача, *TNT*, *RDX*, *HMX*, а најчешће пентрит. Означавање детонаторских каписли се врши бројевима који представљају снагу детонаторске каписле, односно, масу секундарног пуњења<sup>227</sup>.

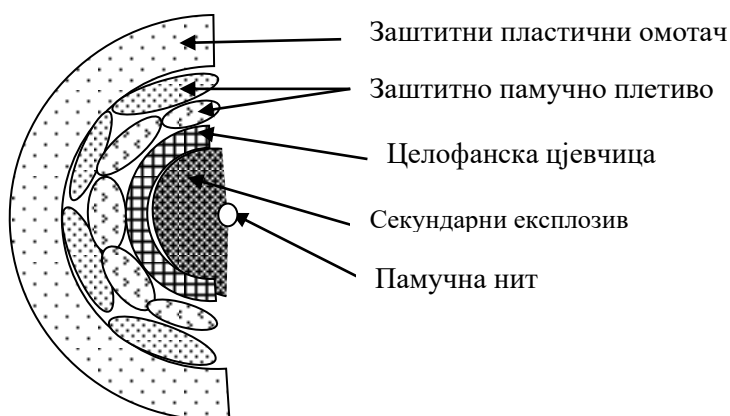


<sup>227</sup> У пракси се сусрећу детонаторске каписле број 6 и број 8. Детонаторска каписла број 6 садржи 0,6 грама секундарног пуњења што са примарним пуњењем има укупну масу 1 грам. Детонаторска каписла број 8 садржи 0,8 грама секундарног пуњења што са примарним пуњењем има укупну масу 1,3 грама.

Слика број 153. Шематски приказ система са спорогорећим штапином

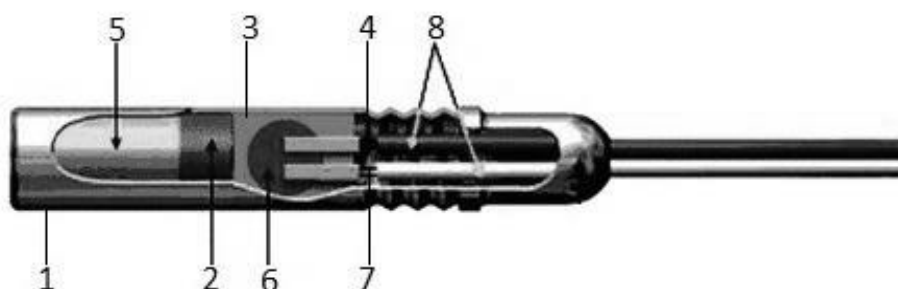
Систем са детонирајућим штапином се заснива на преносу иницијалног импулса путем детонације од мјеста иницирања до експлозивног пуњења које се жели иницирати. Основни елементи система са детонирајућим штапином су детонирајући штапин и детонаторска каписла те, у зависности од захтјева, и успоривач.

Детонаторски штапин садржи срж, памучни омотач и изолациони омотач. Срж детонирајућег штапина је сачињена од секундарних експлозива, претежно пентрита смјештена у целофанску цјевчицу која је омотана памучним влакнима у више слојева. Крајњи изолациони омотач је сачињен од пластичне масе.



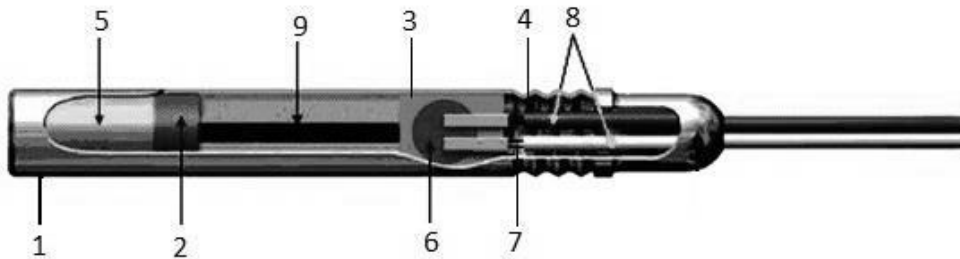
Слика број 154. Шематски приказ попречног пресека детонирајућег штапина

Систем са електричним штапином чини електрични штапин (електрични проводник) и електрични детонатор. Електрични детонатор представља средство за иницирање експлозивних материја помоћу електричне струје. Конструктивне елементе електричног детонатора чине чаура израђена од алуминијума или бакра, електрични упаљач, елемент за успорење (успоривач, према захтјеву) и детонаторска каписла.



1 – кућиште; 2 – иницијално-примарно пуњење; 3 – антистатичка комора за смјештај запаљиве главице, 4 – бртва; 5 – секундарно пуњење; 6 – запаљива главица; 7 – контакти запаљиве главице; 8 – електрични проводници

а)



1 – кућиште; 2 – иницијално-примарно пуњење; 3 – антистатичка комора за смјештај запаљиве главице, 4 – бртва; 5 – секундарно пуњење; 6 – запаљива главица; 7 – контакти запаљиве главице; 8 – електрични проводници; 9 – успоривачки елемент

б)

Слика број 155. Шематски приказ: а) електричног тренутног детонатора; б) електричног детонатора са успорењем [129]

Сложенији системи који садрже различите механичке или електронске компоненте којима је циљ иницирање процеса детонације под одређеним условима називају се упаљачи (енг. *fuze*). Ова терминологија се претежно користи кад се говори о војној муницији и наоружању.

Класификација упаљача се може вршити на основу различитих критерија. У критерије који се користе за класификацију упаљача сврставају се:

- врста муниције за коју се употребљавају
- врста активационог механизма
- врста циља за који се користи одређена муниција.

Класификација на основу врсте муниције се врши на:

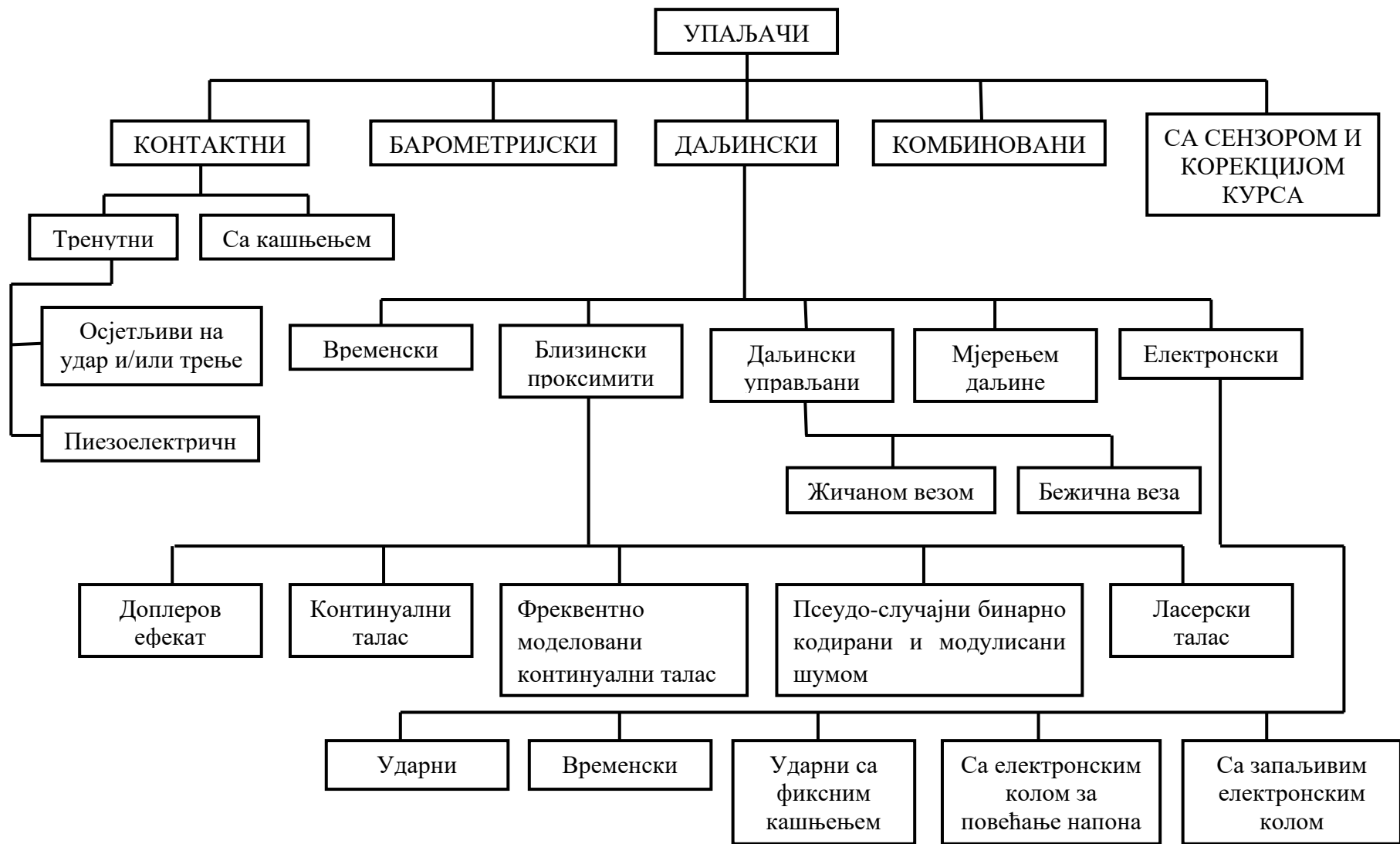
- упаљачи за артиљеријску муницију
- упаљачи за ручне гранате

- упаљачи за ваздухопловне бомбе
- упаљачи за нагазне мине
- упаљачи за поморске мине.

Класификација на основу врсте циља:

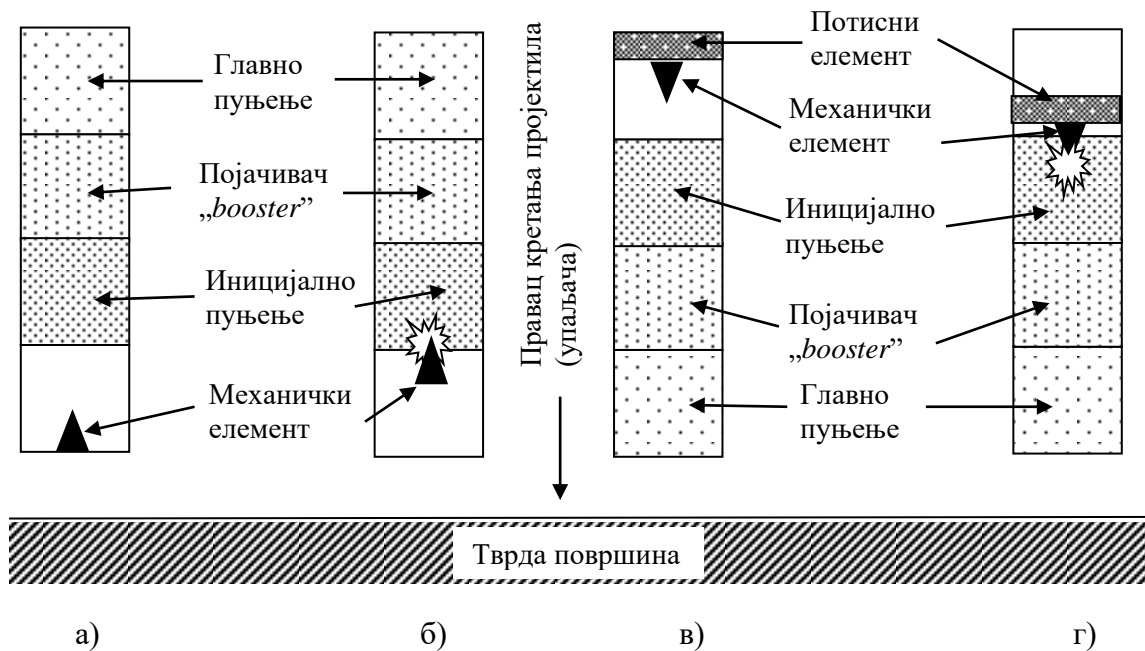
- површински циљеви
- ваздушни циљеви
- подводни циљеви.

Најчешће се класификација упаљача врши на основу активационог механизма (слика 156).



Слика број 156. Класификација упаљача

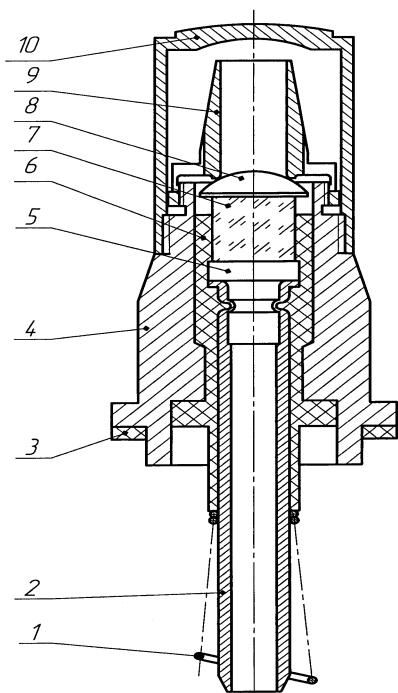
Контактне упаљаче представљају упаљачи чије иницирање је узроковано контактом са тврдом површином, односно, механичким ударом. Услед директног контакта између одговарајућег механичког елемента (унутар упаљача) и тврде површине остварује се механички удар наведеног елемента у масу иницијалног експлозива након чега упаљач остварује иницирање главног експлозивног пуњења. С обзиром на различите карактеристике површине (различите чврстоће), конструисан је тзв. инерциони упаљач који показује виши степен ефикасности без обзира на карактеристике површине са којом је у контакту. Након директног контакта упаљача са површином, услед инерције, потисни елемент дјелује на конструктивни елемент који остварује механички удар у иницијални експлозив. Савремени контактни упаљачи представљају комбинацију наведених начина иницирања.



Слика број 157. Шематски приказ функционисања контактних упаљача са механичким ударом  
 а) прије контакта са тврдом површином; б) након контакта са тврдом површином и инерционог упаљача в) прије контакта са тврдом површином г) након контакта са тврдом површином

Такође су изведени контактни упаљачи са елементом за кашњење (временско) при чему пројектил продира у мету и након тога детонира.

Пиезоелектрични упаљачи представљају тип контактних упаљача конструисаних помоћу пиезоелектричног елемента, односно, функционишу на основу пиезоелектричног ефекта<sup>228</sup>.



- 1 – контактна опруга
- 2 – цијев
- 3 – пластична заптивка
- 4 – кућиште
- 5 – контакт
- 6 – пластично изоловано кућиште
- 7 – пиезоелектрични елемент
- 8 – чекић израђен од цирконат-титаната
- 9 – навртка
- 10 – поклопац

Слика број 158. Шематски приказ пиезоелектричног упаљача [130]

Барометријски упаљачи иницирају главно експлозивно пуњење на одређеној унапријед подешеној висини изнад нивоа мора на основу одређене вриједности атмосферског притиска. С обзиром на изложеност атмосферског притиска сталним промјенама, немају ширу примјену.

Даљински упаљачи представљају већу групу упаљача различитих конструкција који врше активирање главног експлозивног пуњења на одређеној удаљености од циља. У зависности од начина функционисања могу се класификовати на:

<sup>228</sup> Пиезоелектрични ефект је појава стварања електричног напона на крајевима пиезоелектричног кристала при механичком притиску на кристал

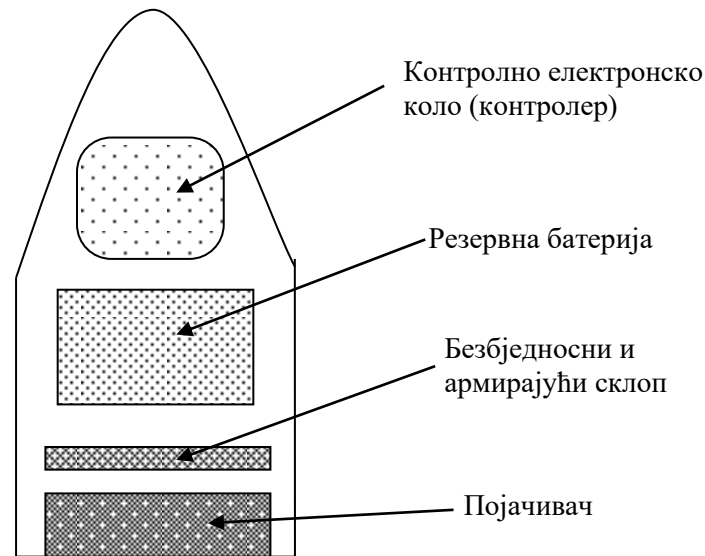
- временски – активирање упаљача се врши након унапријед одређеног временског периода (темпирања)
- близински – активирање упаљача се врши када је удаљеност пројектила од циља мања од претходно задане вриједности. Изведено је више врста близинских упаљача у зависности од начина функционисања.
  - на основу Доплеровог ефекта<sup>229</sup>
  - континуалног таласа (врши се мјерење јачине еха (одјек, одзив) циља на основу Доплеровог помака<sup>230</sup>
  - фреквентно моделованог континуалног таласа (користе се синусоидне и троугласте фреквентне модулације)<sup>231</sup>
  - псеудо-случајно бинарно кодирани и модулисани шумом (користе временске варијантне модулације)
  - ласерски талас (функционише на основу циљног еха ласерског сигнала)
- даљински управљачи - подразумијева активирање упаљача са одређене дистанце у жељеном временском тренутку. Разликују се према начину преноса сигнала (радио-веза, жичана веза)
- мјерењем даљине – врста упаљача која није нашла ширу примјену. Функционисање се заснива на механичком мјерењу даљине.
- електронски – упаљачи конструисани на примјени различитих електронских склопова. Основне компоненте овог типа упаљача су [131]:
  - модул контролера (програмабилна компонента упаљача која одређује момент иницирања)
  - резервна батерија (извор струјног напајања)
  - безбједносни и армирајући склоп (уређај за спречавање нежељеног активирања, користе се различити системи: механички, електромеханички, електронски, микроелектромеханички)
  - појачивач (одговарајућа експлозивна материја).

---

<sup>229</sup> Доплеров ефекат је појава да услед релативног кретања пријемника или извора долази до мијењања фреквенције таласа. Ако се пријемник и предајник крећу један ка другом, фреквенција се помјера навише (расте), а ако се пријемник и предајник крећу један од другог, фреквенција се помјера наниже (опада).

<sup>230</sup> Доплеров помак представља промјену таласне дужине и фреквенције у односу на таласну дужину и фреквенцију почетног таласа

<sup>231</sup> Фреквенцијска модулација (*FM*) је поступак модулације код које се информација преноси промјеном фреквенције преносног сигнала



Слика број 159. Шематски приказ електронског упаљача [131]

Подјела електронских упаљача у зависности од функције контролера се врши на:

- ударни
- временски
- ударни са фиксним кашњењем
- са електронским колом за повећање напона
- са запаљивим електронским колом.

Комбиновани упаљачи представљају упаљаче конструисане кориштењем више различитих механизма дјеловања.

Упаљачи са сензором и корекцијом курса се користе у системима са субмуницијом (касетном муницијом)<sup>232</sup>. Пројектил испаљен из артиљеријског оруђа или вишецијевног ракетног система експлодира на око 1000 метара изнад зоне циља и при томе се ослободе двије касетне бомбе (субмуниција) при чему долази до отварања падобрана и успореног кретања субмуниције. Током успореног пада помоћу додатног падобрана долази до ротације субмуниције. Током времена пада и ротације субмуниције сензори врше претрагу подручја пречника око 150 метара. Кориштени

<sup>232</sup> Касетна муниција је облик експлозивног оружја из ваздуха или са земље који ослобађа или избацује мању подмуницију.

сензори су радар милиметарских таласа, пасивни радио-метар милиметарских таласа и инфрацрвени телескоп и магнетометар. У случају детекције циља долази до активирања субмуниције и настанка експлозивно формираног пенетратора који погађа детектовану мету. Ако субмуниција у неактивираним стању доспије на тло одиграва се самоуништење субмуниције.

## **5. 2. Ефекти експлозивних процеса**

Разлози кориштења енергетских материја се заснивају на ефектима насталим услед процеса дефлаграције и детонације и утицајима на околину услед одигравања ових процеса. Ослобађање велике количине енергије у веома кратком времену представља најзначајнији ефекат експлозивних процеса и, као такав, остварује најинтензивнији утицај на околину и истовремено детерминише употребу енергетских материја. Енергетске материје се претежно употребљавају на начин да чине дио неког уређаја, средства или направе веома различитих конструкција чија сврха употребе може бити у различитим областима људског дјеловања. На основу врсте процеса декомпозиције који узрокује ослобађање енергије, могу се разликовати:

- ефекти дефлаграције
- ефекти детонације.

У даљем дијелу тексту ће се детаљније разматрати ефекти детонације.

### **5. 2. 1. Ефекти дефлаграције**

Карактеристике процеса дефлаграције, стварање велике количине гасовитих продуката под високим притиском, слојевито изгарање материја одговарајућом брзином сагорејевања (пропеланти), као и стварање захтијеваних ефеката (пиротехничка средства) у највећој мјери утичу на карактеристике ослобађене енергије путем дефлаграције а, самим тим, и ефектима који се испољавају у односу на вањско окружење у коме се процес одвија. Ови утицаји процеса дефлаграције одређују подручје и начин практичне примјене енергетских материја за које је карактеристичан процес декомпозиције путем процеса дефлаграције.

### 5. 2. 2. Ефекти детонације

Приликом одвијања процеса детонације долази до стварања велике количине гасовитих продуката насталих декомпозицијом енергетске материје а које карактерише веома висока температура и притисак (услјед егзотермне реакције распада и веома велике брзине одвијања процеса детонације) реда величине  $10^5$  бара. Услјед брзог ширења гасовитих продуката долази до формирања ударног таласа у околини, односно, енергија детонације се преноси у околину. У почетној фази детонације, брзина кретања гасовитих продуката је приближно иста брзини кретања ударног таласа насталог наглим ширењем гасовитих продуката детонације. Након одређеног времена, услед опадања брзине кретања гасовитих продуката детонације, долази до раздвајања ударног таласа и продуката детонације који заостају у односу на ударни талас. На удаљености која износи 10–12 радијуса експлозивног пуњења, притисак гасовитих продуката детонације се смањује на вриједности атмосферског притиска. На основу претходно наведеног, видљиво је да се на малим растојањима од центра експлозије основни утицај на околину остварује путем гасовитих продуката насталих процесом детонације док се на већим удаљеностима ефекти детонације остварују путем насталог ударног таласа.

Имајући у виду веома широку примјену енергетских материја које се разлажу у процесу детонације у различите намјене, као и то да представљају дио неког техничког система, утицаји настали кориштењем различитих уређаја, направа и система могу бити различити. Уопштено посматрано, утицаји, односно, ефекти дјеловања различитих система, у којима се користе одговарајуће енергетске материје (процес декомпозиције се одвија путем процеса детонације), испољавају се на околину у облику:

- разорног (бризантног) дејства
- рушећег (фугасног) дејства.

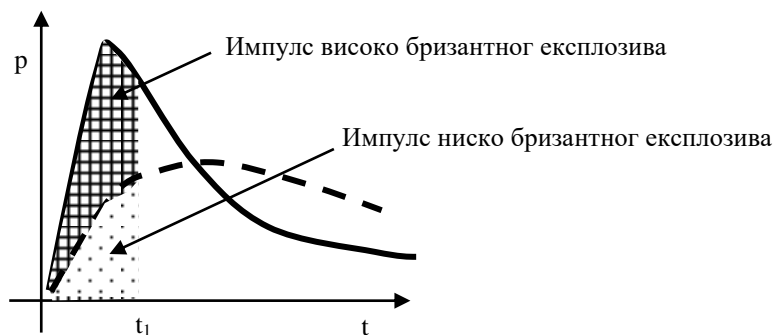
Разорно дејство процеса детонације се назива бризантност и дефинише се као мјера способности експлозивне материје у смислу остваривања разарајућег ефекта на непосредно окружење а које је последица утицаја насталих гасовитих продуката

процеса детонације. Теоретски посматрано, бризантност је окарактерисана величином силе којом продукти детонације дјелују на околинду, односно, импулсом силе притиска.

Дефинисање импулса силе притиска врши се у облику математичког израза:

$$I = \int_0^t p(t) dt \quad (74)$$

Графички приказ импулса силе притиска исказан вриједностима притиска у времену приказан је на слици 160.



Слика број 160. Приказ импулса силе притиска за експлозивне материје различитих бризантности

С обзиром на то да се фронт импулса налази у уским границама интеграла, импулс силе притиска има пропорционалну вриједност притиску детонације а чија вриједност представља критеријум бризантног дејства експлозије.

Могу се разликовати више различитих облика бризантног (разорног) дејства гасовитих продуката детонације који се крећу приближно истом брзином као и ударни талас (у почетном стадијуму, на малим удаљеностима):

- ефекат разорног дејства гасовитих продуката
- ефекат дејства ударних таласа на средине високих густина које су у контакту са експлозивном материјом
- кумулативни ефекат

- фрагментација
- ефекат разарање различитих конструкција.

Са једне стране, брзо ширење гасовитих продуката детонације (брзином ударног таласа) и, са друге, брзо смањење притиска гасовитих продуката, односно, изједначавање са атмосферским притиском ограничавају разорно дејство продуката детонације на веома кратак временски период и мала растојања од центра детонације (10–12 радијуса експлозивног пуњења). При срединама веће густине, растојање на коме се врши разорно дејство износи 2–4 радијуса експлозивног пуњења.

Одређивање зоне разорног дејства продуката детонације изражава се путем израза (за експлозивно пуњење сферног облика):

$$R_0 = 0,05\sqrt[3]{q} \quad (75)$$

$R_0$  – пречник зоне разорног дејства гасовитих продуката у метрима

$q$  – маса експлозивне материје у килограмима.

С обзиром на то да маса ваздуха која је једнака маси експлозивног пуњења заузима 1200–1500 запремине експлозивног пуњења, израчунавање пречника запремине након којег долази до смањења брзине ширења гасовитих продуката (смањује се и притисак који потиче од гасовитих продуката) врши се помоћу израза:

$$R_k = (\sqrt[3]{1200} - \sqrt[3]{1500}) R_0 \quad (76)$$

Одвијање процеса детонације у непосредној близини или у контакту са срединама високе густине (чврсте материје, метали и слично) узрокује снажни ударни талас који се простире кроз материјал и изазива напрезање материјала<sup>233</sup>.

---

<sup>233</sup> Напрезање је унутрашња сила расподијељена по јединици површине неког чврстог тијела која се јавља као реакција на дјеловање вањских сила или промјене температуре тијела. Вриједност напрезања се изражава са јединицом паскал ( $Pa = N/m^2$ ). Ако на неко тијело дјелују вањске силе, оне настоје да раздвоје или приближе поједине честице тијела. Тијело се супротставља путем унутрашњих сила које дјелују између честица материјала. Унутрашња сила подијељена површином пресјека на којем дјелује назива се напрезање.

Вањски утицаји могу имати динамички или статички карактер оптерећења. Напрезања или деформације настале усљед статичког карактера вањског оптерећења се расподјељују равномјерно по цијелој површини док динамички карактер оптерећења изазива локална напрезања, односно, деформације. Детонациони процес посједује особине динамичког оптерећења а које карактерише таласни карактер кретања гасовитих продуката детонације, кратко вријеме одигравања процеса и веома високи ниво притиска.

Имајући у виду динамичке карактеристике оптерећења узроковане детонационим процесом долази до појаве различитих ефеката на материјале који се налазе у непосредном контакту са процесом детонације. У ефекте који се издвајају и који су нашли практичну примјену су:

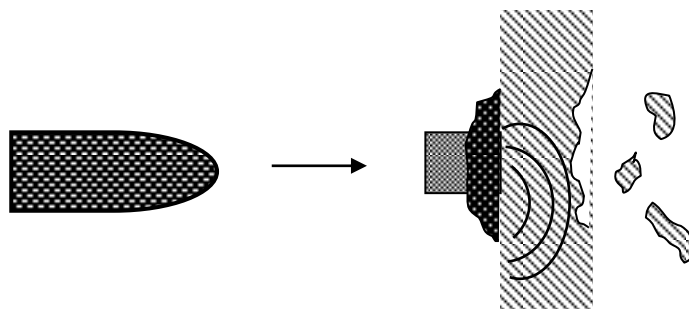
- ефекат очвршћивања метала експлозијом
- експлозивно заваривање (плакирање)
- Хопкинсов ефекат
- Миснај-Шардинов ефекат.

Примјеном одговарајућих експлозивних материја и технолошких поступака врши се очвршћавање металних површина са циљем повећања механичких карактеристика материјала који се обрађује а, прије свега, чврстоће површинских слојева.

Спајање металних елемената сачињених од различитих метала, може се вршити помоћу експлозивних материја. Параметри који утичу на процес спајања (заваривања, плакирања) металних позиција су:

- почетни параметри (физичко-хемијске карактеристике експлозивне материје, угао спајања, размак између металних позиција)
- кинематички параметри (брзина лета потискиване плоче, кинетичка енергија и слично)
- физички параметри (притисак, температура и слично).

Хопкинсов ефекат представља одвајање површинског слоја материјала који је супротан површини истог материјала а која се налази у контакту са детонационим процесом.



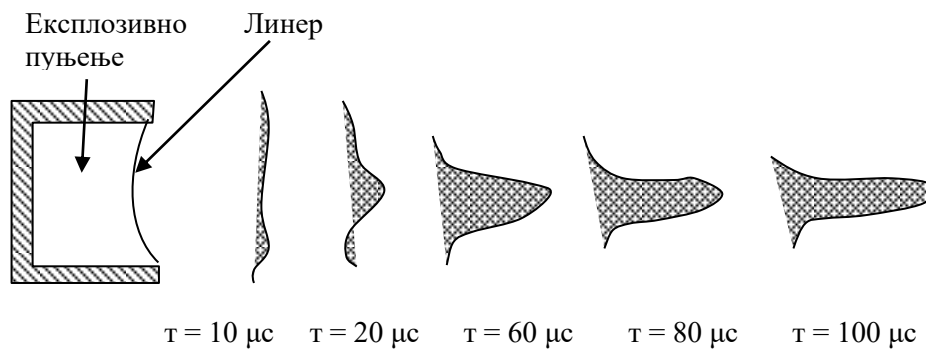
Слика број 161. Хопкинсов ефекат

Одигравањем детонационог процеса у непосредном контакту са материјалом долази до настанка ударног таласа (гасовитих продуката детонационог процеса) који се преноси на контактни материјал. Под утицајем ударног таласа, кроз материјал се креће талас сабијања у правцу према слободној (супротној површини од површине на којој се одиграо процес детонације) површини. Када талас сабијања доспије до слободне површине усљед различитих густина материјала и околине, долази до одбијања таласа и враћања у виду таласа истезања. Интерференцијом таласа сабијања и таласа истезања настаје резултујуће напрезање унутар материјала у слоју који се налази уз слободну површину материјала. Имајући у виду чињеницу да са порастом удаљености фронта таласа истезања од слободне површине расте и вриједност напрезања на истезање, када вриједност напрезања на истезања достигне критичну вриједност за дати материјал, долази до одвајања слоја материјала са слободне површине. Одвојени слој материјала карактеришу комади материјала различитих величина и велике кинетичке енергије.

На основу Хопкинсовог ефекта су конструисани различити системи наоружања (тзв. панцирни пројектили, *HESH* (енг. *high explosives squash head*) муниција)<sup>234</sup>. Помоћу процеса декомпозиције експлозивних материја настаје висока количина енергије која се трансформише у кинетичку енергију кретања пројектила. Приликом контакта пројектила са метом, кинетичка енергија кретања пројектила узрокује (трансформише се) ударни талас на основу кога настаје Хопкинсов ефекат.

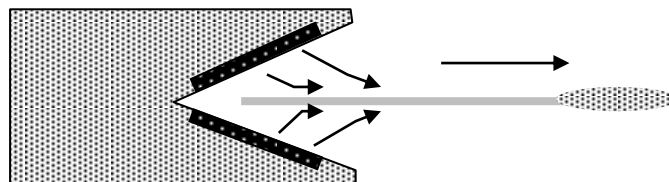
<sup>234</sup> Високоексплозивна разбијајућа глава.

Миснај-Шардинов ефекат представља процес одбацивања и преобликовања металног диска (линер) постављеног на експлозивно пуњење које се иницира са супротне стране. Почетна брзина кретања одбаченог диска износи и до неколико хиљада метара у секунди. На основу велике кинетичке енергије, она врши пробој материјала (избијање чепа). Метални диск се израђује од челика, бакра, тантала и осиромашеног уранијума<sup>235</sup>. На основу Миснај-Шардиновог ефекта се заснива дејство различитих врста пројектила под називом кинетички пенетратор, односно, експлозивно формирану пенетратор (енг. *Explosively formed penetrator*) [132].



Слика број 162. Шематски приказ формирања пенетратора (Миснај-Шардинов ефекат)

Кумулативни ефекат (енг. *Munroe or Neumann effect*) представља усмјеравање енергије детонационог процеса у одређеном правцу и фокусирање на малој површини. Конусна шупљина усмјерава дио продуката детонације у правцу кретања детонационог таласа при чему долази до фокусирања у облик млаза чији је пречник много мањи у односу на пречник почетног пуњења. Млаз је сачињен од гасовитих продуката сагоревања.



<sup>235</sup> Уранијум који има садржај мањи од 0,711% изотопа уранијум-235 (исти атомски број али различиту масу) од укупне тежине (просјечно 0,2–0,4 %).

*Слика број 163. Принцип формирања кумулативног млаза*

Облагање кумулативне шупљине металом доводи до знатног појачања дејства кумулативног млаза. Метална облога се под утицајем веома високог притиска деформише и понаша се као течност са веома високом кинетичком енергијом [133].

Појам фрагментација подразумева разарање облоге (кошуљице) која обавија експлозивну материју и настанак већег броја дијелова (фрагмената) облоге различите величине, масе и облика. Фрагментација настаје усљед високог притиска гасовитих продуката процеса детонације унутар затвореног простора (облога посједује затворену форму) при чему се потенцијална енергија гасовитих продуката експлозије дијелом претвара у кинетичку енергију дијелова облоге. На процес фрагментације утичу следећи фактори:

- термичка обрада облоге
- бризантност експлозивне материје
- густина експлозивног пуњења
- начин иницијације.

Специфичну карактеристику насталих металних фрагмената представља тзв. Гурнијева брзина којом се дефинише брзина кретања металних фрагмената усљед дејства експлозивног пуњења. Гурнијев модел брзине кретања металних фрагмената се заснива на претпоставкама да:

- енергија ослобођена детонацијом се, у суштини, потпуно мијења у кинетичку енергију детонационих гасова и кинетичку енергију металних фрагмената;
- на енергију која се искористи за деформацију или фрагментацију материјала облоге не утиче затвореност облоге те се, у суштини, може занемарити;
- приликом детонације експлозив се спонтано трансформише у хомогени и хемијски потпуно измијењени, гасовити продукт под високим притиском;
- гасовити продукти детонације се шире уједначеном густином и линеарним градијентом брзине;

- хемијска енергија детонације експлозива се мијења у кинетичку енергију, све док фрагменти не достигну стационарну брзину помоћу које се може израчунати Гурнијева брзина.

Израчунавање Гурнијеве брзине се може вршити помоћу једноставног емпиријског израза за експлозивне материје које карактерише општа формула  $C_aH_bN_cO_d$  и познате густине материје ( $\rho$ ,  $gcm^{-3}$ ) [20].

$$\text{Гурнијева брзина (} km s^{-1} \text{)} = 0,404 + 1,02\rho - 0,021c + 0,184 (b/d) + 0,303 (d/a) \quad (77)$$

Детонацијом експлозивног пуњења које се налази у непосредном (директном) контакту са различитим објектима, могу да се изазову различита оштећења или потпуна разарања објекта са којим је експлозивна материја у контакту. Степен оштећења или разарања са једне стране зависи од врсте и количине употребљене експлозивне материје а, са друге стране, величина и облик објекта као и физичке карактеристике материјала од кога је објекат сачињен и представљају веома значајне факторе који утичу на ефекте дејства експлозивне материје. Потребна количина експлозивне материје (тринитротолуен, *TNT*) за рушење различитих објеката је одређена изразом:

$$Q = K \times S \text{ (за тзв. спољно пуњење)} \quad (78)$$

$$Q = K \times S/10 \text{ (за тзв. унутрашње пуњење)} \quad (79)$$

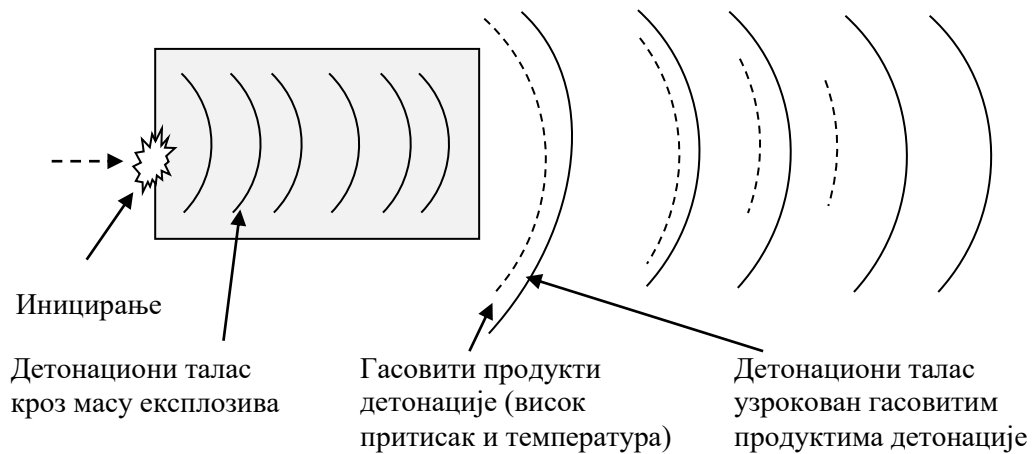
$K$  – фактор отпорности материјала

$S$  – површина попречног пресјека објекта у  $cm^2$

Одређивање потребне количине других врста експлозивне материје врши се помоћу еквивалента тринитротолуена.

На основу претходних разматрања, констатовано је да приликом одигравања процеса детонације, осим гасовитих продуката детонације, настаје и ударни (детонациони) талас. У почетној фази детонационог процеса, брзине гасовитих продуката детонације и ударног таласа су приближно једнаке док се на већим удаљеностима од центра експлозије притисак гасовитих продуката детонације изједначава са атмосферским

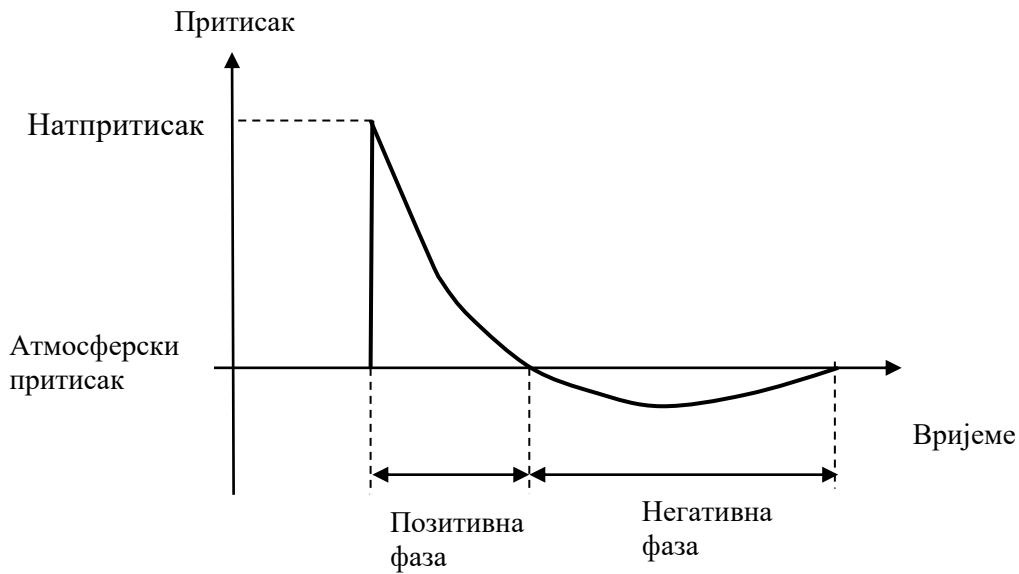
притиском а ударни талас наставља да се креће кроз средину у којој се одиграла експлозија. Као последица ширења ударног таласа настаје рушеће (фугасно) дејство детонационог процеса (слика 164).



Слика број 164. Ширење гасовитих продуката детонације и ударног таласа (детонационог) у околину

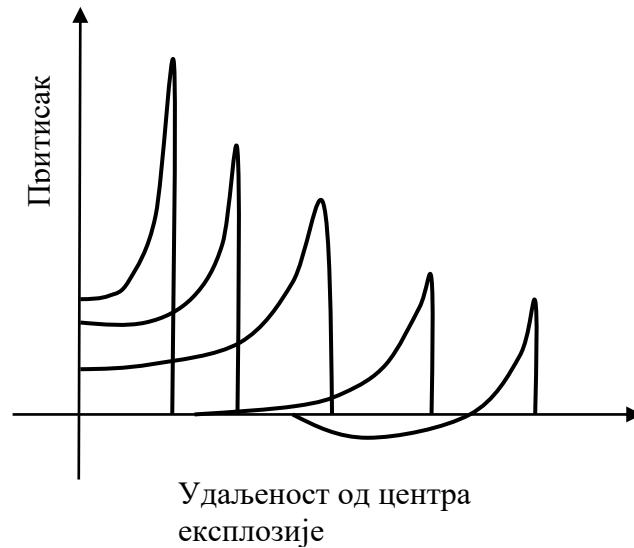
С обзиром на различите карактеристике средине у којој се одвија процес детонације, односно, средине у којој се креће ударни (рушећи) талас, разликују се кретање ударног таласа у ваздуху, земљи и води.

Ударни талас настао под утицајем гасовитих продуката детонације у ваздуху, креће се радијално, једнаком брзином у свим правцима. Брзина кретања ударног таласа је већа од брзине звука. Најважнију карактеристику представља вриједност натпритиска а који представља разлику притиска на фронту ударног таласа и атмосферског таласа. Даљим ширењем ударног таласа усљед губитака енергије долази до смањења брзине и на одређеној удаљености од центра експлозије претвара се у звучни (акустични) талас.



Слика број 165. Вриједност притиска фронта ударног таласа у ваздуху у зависности од времена (од момента детонације)

Са протоком времена, удаљености и смањењем брзине кретања, долази и до смањења притиска. Прва фаза ударног таласа се назива тзв. позитивна фаза коју карактерише максимални притисак на околину и велика брзина кретања (надзвучна брзина) и чија вриједност опада са протоком времена. Услед карактеристика фронта ударног таласа долази до сабијања слојева ваздуха који се налазе непосредно испред фронта ударног таласа (висока вриједност притиска) док у слоју ваздуха који се налази непосредно иза фронта ударног таласа долази до разређења (смањење вриједности притиска). Наизмјеничним кретањем таласа сабијеног и разријеђеног ваздуха врши се ширење ударног таласа у околину (слика 166). Услед енергетских губитака и престанка дотока енергије (изреаговала је сва количина експлозивне материје те је процес детонације завршен) натпритисак ударног таласа у одређеном моменту поприма вриједности мање од атмосферског притиска. Фаза у којој натпритисак фронта ударног таласа поприма негативне вриједности назива се негативна фаза. Након одређеног времена долази до изједначавања вриједности натпритиска фронта ударног таласа са атмосферским притиском. Просторна димензија позитивне фазе ударног таласа назива се дужина ударног таласа а вријеме трајања се назива период ударног таласа. Изражен утицај на ефекте који се остварују ударним таласом има величина импулса ударног таласа (вријеме трајања натпритиска).



Слика број 166. Наизмјенично кретање слојева сабијеног и разријеђеног ваздуха

За одређивање вриједности натпритиска ударног таласа у зависности од удаљености од центра експлозије, а, на основу теоријских и експерименталних података, изведено је више математичких израза.

Табела број 68. Математички изрази за израчунавање вриједности натпритиска на фронту ударног таласа

Аутор	Израз	Реф.
<i>Sadovski</i>	$\Delta p = k_1 \frac{q^3}{r} + k_2 \frac{q^3}{r^2} + k_3 \frac{q}{r^3}$	[134]
<i>Mays, Smith</i>	$q_s = \frac{5 p_s^2}{2(p_s + 7 p_0)}$	[135]
<i>Brode</i>	$p_s = \frac{6,7}{Z^3} + 1[\text{bar}], p_s > 10 \text{bar}$	[136]
	$p_s = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019[\text{bar}], 0,1 < p_s < 10 \text{bar}$	
<i>Newmark, Hansen</i>	$p_s = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \sqrt{\frac{W}{R^3}}, [\text{bar}]$	[137]
<i>Mills</i>	$p_s = \frac{1772}{Z^3} + \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} - 0,019, [\text{kPa}]$	[138]

---

Kingery-Bulmash 
$$U = K_0 + K_1 \times \log Z$$
 [139]

$$Y = 10^{(C_0 + C_1 \times U + C_2 \times U^2 + \dots + C_N \times U^N)}$$

---

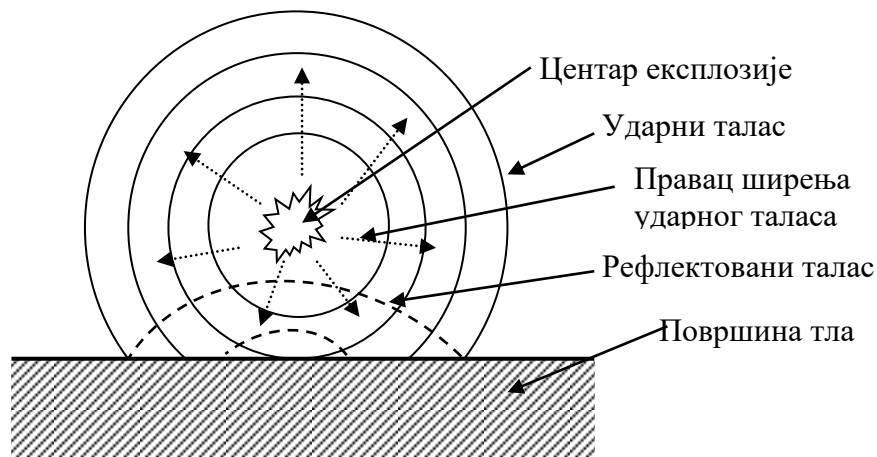
Swisdak 
$$Y = e^{(A + B \times \ln Z + C \times (\ln Z)^2 + \dots + G \times (\ln Z)^6)}$$
 [140]

---

DooJin Jeon et al. модификација Kingery-Bulmash – ове једначине [141]

$Z$  – нумеричка вриједност на логаритамској подјели у зависности од  $R/W^{1/3}$  за различите параметре ударног таласа,  $W$ ,  $q$  – маса експлозива (ТНТ),  $R$ ,  $r$  – удаљеност од центра експлозије  $U$  – брзина ударног таласа,  $K$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – константе,  $p_s$ ,  $\Delta p$  – вриједности натпритиска.

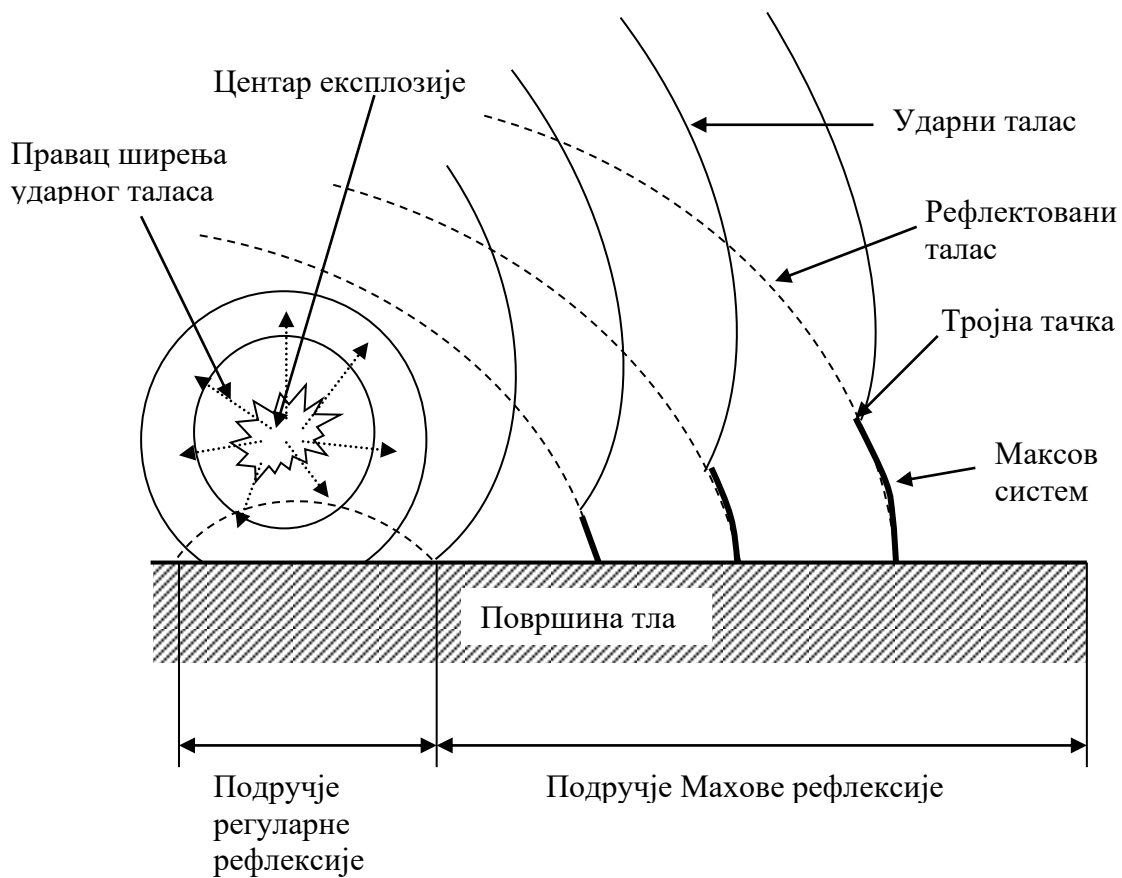
Приликом детонације експлозива и настанка сферног ударног таласа изнад површине земље, у слободном простору ударни талас се шири једнако одређеном брзином у свим правцима. Ударни талас који се креће у правцу површине рефлектује се и настаје тзв. рефлектовани (одбијени) ударни талас (слика 167).



Слика број 167. Рефлектовани талас

Брзина кретања рефлектованог таласа је већа у односу на брзину кретања директног ударног таласа услед кретања рефлектованог таласа кроз средину која посједује вишу температуру а која је последица претходног проласка директног ударног таласа. Услед кретања већом брзином рефлектовани талас у одређеном моменту сустиже директни ударни талас и долази до формирања јединственог фронта ударног таласа.

Појава интерференције (спајања) директног ударног таласа и рефлектованог таласа назива се Махов ефекат (слика 168). Тачка у којој се спајају ударни и рефлектовани талас се назива тројна тачка. Формирање и кретање јединственог ударног таласа зависи од удаљености центра детонације од површине тла као и вриједности угла под којим директни ударни талас долази у контакт са површином. Зависност од угла контакта директног ударног таласа са рефлектујућом површином одређује удаљеност и положај тачке формирања Маховог ефекта у односу на центар детонације.

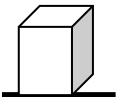
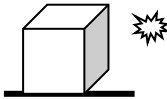
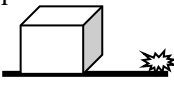


Слика број 168. Махов ефекат

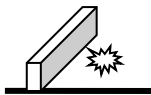
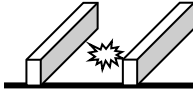
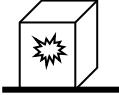
Ефекти дејства ударног таласа у највећој мјери зависе од величине вриједности натпритиска на фронту ударног таласа. На величину вриједности натпритиска, осим удаљености од центра експлозије, масе и врсте експлозивне материје веома значајну улогу има и положај центра експлозије у односу на објект који се налазе у зони дејства ударног таласа.

У зависности од мјеста експлозије, као и односа мјеста експлозије према објектима на које се испољава утицај ударног таласа, врши се подјела типова експлозије на експлозије без ограничења и експлозије са ограничењем<sup>236</sup>. Приказ подјеле типова експлозије са карактеристикама ударног таласа је приказано у табели 69.

Табела број 69. Подјела типова експлозије у односу на мјесто према објектима на које се испољава утицај [142]

Ограничење експлозије	Категорија	Карактеристике ударног таласа (експлозивног оптерећења)	Напомена
Експлозија без ограничења (препрека)	Експлозија у слободном ваздуху	Нерефлектован	Ударни талас се простире од центра детонације до објекта без посредног појачавања таласа 
	Експлозија у ваздуху	Рефлектован	Иницијални ударни талас је појачан са таласом рефлексије. Центар експлозије се налази на удаљености од објекта која износи 2–3 пута висине двоспратних објеката (20–30 m). Висина тачке Махове гране се налази изнад висине објекта. 
	Површинска експлозија	Рефлектован	Центар експлозије се налази на површини. Иницијални ударни талас је појачан рефлектованим таласом од површине. 

<sup>236</sup> Појам ограничења представља евентуалне препреке које се могу налазити на правцима простирања ударног таласа.

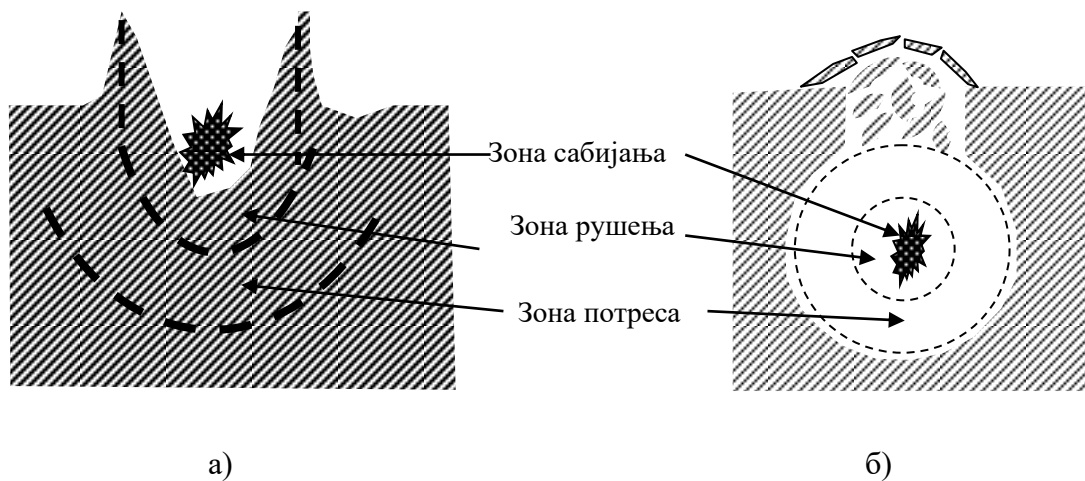
	Експлозија са пуним отвором	Унутрашњи ударни талас. Расипање ударног таласа.	
Експлозија са дјеломичним ограничењем (препрекама)	Експлозија са дјеломичним ограничењем	Унутрашњи ударни талас. Расипање унутрашњег таласа. Унутрашњи притисак гасовитих продуката детонације.	
	Експлозија са пуним ограничењем	Унутрашњи ударни талас. Унутрашњи притисак гасовитих продуката детонације.	

Приликом детонације експлозивне материје испод површине земље (подземне експлозије), разликују се:

- зона сабијања
- зона рушење
- зона потреса.

С обзиром на ефекте изазване подземном експлозијом, разликују се експлозије на релативно малим дубинама и релативно већим дубинама<sup>237</sup>.

<sup>237</sup> Вриједности за релативно мале или релативно веће дубине зависе од врсте и масе употријебљене експлозивне материје



Слика број 169. Подземна експлозија: а) на релативно малој дубини; б) на релативно великој дубини

Детонациони процес на релативно малој дубини изазива подизање слоја земље изнад центра детонације и под утицајем кретања гасовитих продуката детонације долази до избацавања одређене количине земље и формирања удубљења у облику лијевка (кратера) који се назива фугаса а дејство експлозива као фугасно дејство. Када се детонациони процес одиграва испод површине тла на дубинама већим од радијуса зоне рушења, усљед дјеловања гасовитих продуката детонације долази до подизања и поновног спуштања тла при чему на површини остају слабо уочљива испупчења или удубљења која се називају камуфлет.

За прорачун радијуса појединих зона користе се различити емпиријски изрази од којих је најчешће у употреби израз:

$$R_x = K_x n_x \sqrt[n_x]{q} \quad (80)$$

$R_x$  – радијус одређене зоне

$K_x$  – емпиријски коефицијент који зависи од карактеристика средине

$n_x$  – коефицијент који зависи од врсте експлозивне материје и начина извођења експеримента

$q$  – маса експлозивног пуњења.

Приликом примјене великих количина експлозива за извођење подземних експлозија на већим дубинама долази до ширења ударног таласа на релативно велика растојања од центра експлозије. Ефекти дјеловања оваквог начина употребе су слични дјеловању сеизмичких таласа насталих приликом земљотреса. Када се употребљавају веома велике количине експлозивних материја ( $\geq 100$  тона), полупречник опасне сеизмичке зоне се одређује на основу емпиријског израза:

$$R = 116q^{3/8} \quad (81)$$

$R$  – полупречник опасне зоне дејства сеизмичких таласа у метрима

$q$  – маса експлозивног пуњења у тонама.

Усљед детонације великих количина експлозива и утицаја насталог ударног таласа у земљишту долази до помјерања средине које се одређује на основу израза:

$$\Delta l = 34 \frac{q^{3/4}}{l^2} \quad (82)$$

$\Delta l$  – помјерање средине у метрима

$q$  – маса експлозива

$l$  – растојање од центра експлозије

и представља помјерање средине на неком растојању од центра експлозије.

Израчуната вриједност се упоређује са вриједностима помјерања тла приликом дешавања земљотреса<sup>238</sup>. У табели 70 су приказане еквивалентне вриједности TNT-а који подземном детонацијом изазивају сличне ефекте.

*Табела број 70. Еквивалентне количине тринитролтолуена за вриједности Меркалијева скале*

---

<sup>238</sup> За одређивање јачине земљотреса најчешће се користе Рихтерова и Меркалијева скала. Рихтерова скала врши подјелу земљотреса према количини енергије (магнитуди) која се ослободи у хипоцентру (жаришту) земљотреса. Меркалијевом скалом се врши подјела на основу брзине помјерања тла и ефекте које остварује на околину.

Степен	Количина TNT-а	Напомена
1.0	32 кг	
1.5	178 кг	
2.0	1000 кг	
2.5	5600 кг	
3.0	32000 кг	
3.5	178000 кг	
4.0	1000000 кг	Енергија мање нуклеарне бомбе
4.5	5100t	
5.0	32000t	
5.5	80000t	
6.0	$1 \times 10^6$ t	Мало слабија вриједност од атомске бомбе бачене на Нагасаки (21 килотона)
6.5	$5 \times 10^6$ t	
7.0	$32 \times 10^6$ t	
7.5	$160 \times 10^6$ t	
8.0	$1 \times 10^9$ t	Земљотрес у Сан Франциску, 1906. године, Бања Лука 27. 10. 1969. ( $6^0$ по Рихтеру)
8.5	$5 \times 10^9$ t	Највећа икад остварена нуклеарна експлозија (руска термонуклеарна бомба „Цар”)
9.0	$32 \times 10^9$ t	Земљотрес у Чилеу 1960. године, у Јапану 11. 3. 2011.
10	$1 \times 10^{12}$ t	Није забиљежен земљотрес ове јачине
12	$160 \times 10^{12}$ t	Количина енергије која дневно долази са Сунца. Приближно енергији приликом удара астероида у Јукатан прије 65 милиона година.

Подводну детонацију карактеришу двије појаве:

- формирање ударног таласа
- формирање гасног мјехура.

Настали ударни талас усљед ослобађања гасовитих продуката детонације, посједује сличне карактеристике ударног таласа у ваздуху. Пад вриједности притиска (натпритиска у фронту ударног таласа) израженији је у односу на пад притиска ударног таласа у ваздуху. На растојањима од око 10 радијуса сферног експлозивног пуњења, вриједност притиска износи стоти дио притиска ударног таласа у центру подводне експлозије. Помоћу одговарајућег израза врши се израчунавање приближне вриједности натпритиска на фронту ударног таласа за подводне експлозије:

$$\Delta p = 533 \left( \frac{\sqrt[3]{q_e}}{r} \right)^{1,13} \quad (83)$$

$\Delta p$  – натпритисак на фронту ударног таласа при подводној експлозији

$q_e$  – тротилски еквивалент експлозивног пуњења ( $kg$ )

$r$  – удаљеност од центра експлозије ( $m$ )

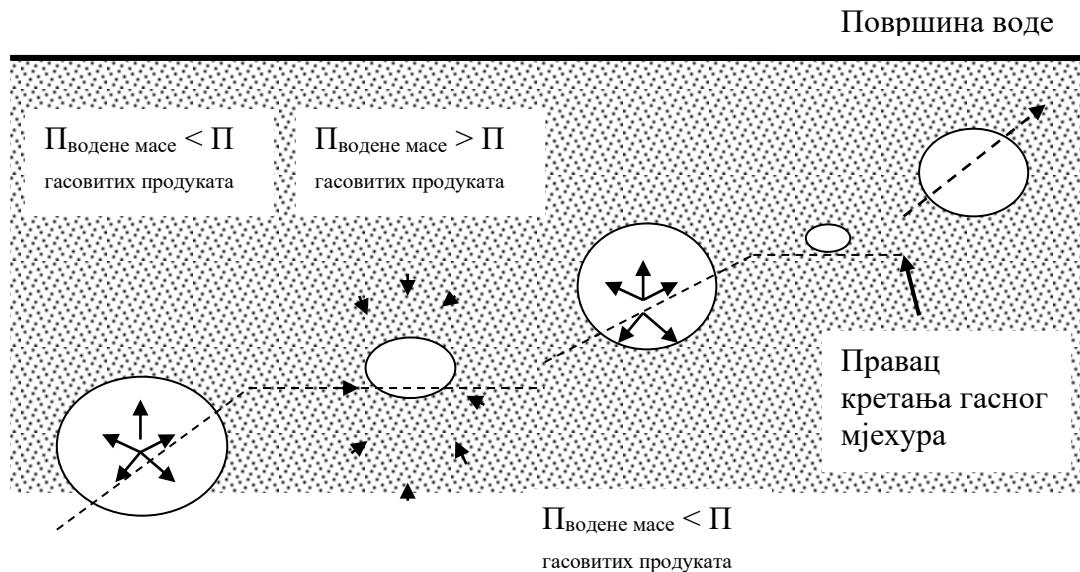
при чему се вриједност тротилског еквивалента изражава изразом:

$$q_e = K \times q \quad (84)$$

$K$  – коефицијент који изражава ефикасност појединих експлозива приликом подводне експлозије у односу на тринитротолуен.

Осим ударног таласа, на укупни разорни ефекат подводне експлозије утиче и тзв. гасни мјехур. У почетној фази детонације, усљед ширења продуката сагоријевања долази до настанка гасног мјехура који се радијално шири и потискује водену масу која га окружује. Приликом ширења гасног мјехура и потискивања (сабијања) водене масе у окружењу настаје ударни талас који се даље шири кроз водену масу. С протоком времена долази до постепеног смањења унутрашњег притиска у гасном мјехуру. Усљед инерције, водена маса се и даље шири те се унутар гасног мјехура ствара потпритисак. Када се у неком моменту заустави инерционо кретање водене масе у правцу од мјехура, долази до кретања водене масе према мјехуру (с обзиром на то да се у мјехуру формирао потпритисак) до момента изједначавања притисака инерционог кретања водене масе према гасном мјехуру и потпритиска у гасном мјехуру. Смањује се

запремина гасног мјехура усљед чега притисак унутар гасног мјехура прелази у натпритисак и процес се понавља. Процес понављања представља појаву која се назива тзв. пулсација гасног мјехура. У реалним условима, пулсација може трајати и до 10 циклуса. Потребно је нагласити да свако ново ширење гасног мјехура доводи до допунског импулса и стварања допунских ударних таласа који се шире кроз водену масу (слика 170).



Слика број 170. Пулсација гасног мјехура

Осим пулсације, гасни мјехур се истовремено креће према површини водене масе. Појава кретања гасног мјехура према површини воде назива се миграција гасног мјехура. У случају детонације на средњим дубинама, гасни мјехур може да изврши неколико циклуса пулсације прије избијања на површину при чему гасови избијају у атмосферу подижући стуб воде. Када се детонација одигра на већим дубинама приликом миграције гасног мјехура, усљед разлике притисака изнад и испод гасног мјехура, долази до деформисања облика гасног мјехура, спљоштавања и пробијања на површини млазом воде.

### 5. 3. Утицај експлозива и експлозија на околинду

Област производње, транспорта, складиштења и употребе енергетских материја (експлозива) јесте уређена примјеном прописаних законских и подзаконских аката помоћу којих су дефинисане надлежности и услови везани за ову област. Циљ прописаних мјера, поступака и процедура је обезбјеђење услова за руковање и кориштење експлозивних материја на начин спречавања настанка нежељених ефеката утицаја експлозивних материја и процеса на људе, материјална добра и животну средину. Непоштивање нормативно-правних и техничких прописаних докумената доводи до ненамјерно или намјерно изазваних експлозија са веома негативним утицајем на људе, материјална добра и животну средину. Као посљедица таквих утицаја долази до оштећења, разарања и уништења различитих објеката који се налазе у зони утицаја дејства експлозије те изазивања повреда, рањавања и смртности код људи. Такође је присутно и онечишћење животне средине како директно путем контаминације простора продуктима експлозивних процеса тако и индиректно путем изазивања накнадних ефеката (пожари и слично). Познавање физичко-хемијских карактеристика експлозивних материја, експлозивних процеса, утицаја експлозивних материја и процеса на људе и околину, конструкције експлозивних направа, метода детекције и идентификације доводе до спречавања и смањења ризика од намјерних или ненамјерних неконтролисаних експлозија као и до откривања и идентификације починиоца.

### **5. 3. 1. Ефекти дејства експлозива и експлозивних процеса**

Утицаји ефеката, који се одигравају приликом одвијања процеса дефлаграције и детонације енергетских материја, на окружење у којима се одвијају, посматрају се као ефекти дејства експлозива и експлозивних материја на околину (ефекти дјеловања разарајућег, рушећег дејства, фрагментације, топлотни). Подјела се врши на ефекте дјеловања:

- на објекте и околину
- на људе.

Ефекти дејства експлозивних процеса на објекте се испољавају у виду механичких оштећења, рушења и уништавања различитих објеката и предмета који се налазе у зони дејства експлозивног процеса.

Степен, односно, врста оштећења првенствено зависи од количине и врсте употребљене експлозивне материје, као и положаја објеката и предмета у односу на центар детонационог процеса.

Интензитет разарања, односно, појава могућих оштећења у зависности од масе експлозивне супстанце и растојања од центра детонације (приближно) су приказани у табели 71.

*Табела број 71. Интензитет разарања (оштећења) у зависности од масе експлозива и растојања од центра експлозије*

Могућа оштећења	Маса експлозива (TNT)			
	0,5 kg	1 kg	2 kg	5 kg
	Растојање (m)			
Безбједно	35–100	50–150	70–200	110–330
Дјелимично оштећење стакла	7–20	10–30	15–40	20–70
Рушење зидова мостова	1	1,4	2	3
Опасно (незаштићен човјек)	3,5–7	5–10	7–14	11–22
Опасно (човјек у оклопном возилу)	1,1–6,7	3,4–6,7	4,7–9,4	7,4–14,7

Ефекти дејства експлозивних материја на објекте првенствено су проузроковани дејством гасовитих продуката процеса детонације (разарања) и насталог ударног таласа (рушење). Имајући у виду карактеристике дејства ударног таласа (параметар натпритиска), више аутора су извршила експериментална мјерења вриједности натпритиска фронта ударног таласа који доводи до одређеног степене оштећења различитих објеката.

*Табела број 72. Резултати експерименталних мјерења вриједности натпритиска за поједине ефекте утицаја ударног таласа*

Натпритисак кРа	Јеремић [3]	Максимовић [21]	Бевериц [143]
1–1,5	Пуцање прозорског стакла		
3–7		Лом или прскање прозорског стакла	
3,5–7,6	Мања оштећења на неким зградама		
10–38		Дробљење мекших материјала	
14–28			Ломљење стакла и избијање прозора
12,4–20	Оштећење бетонских зидова		
20–60		Потпуно уништење цигле	
30–60			Кидање веза између алуминијумских или лимених панела
> 35	Рушење објеката дрвене конструкције		
27,5–48	Већа оштећења на објектима са челичном конструкцијом		
40–60	Тешка оштећења конструкција од армираног бетона		
> 69	Рањавање људи, оштећена плућа		
70–80	Вјероватно рушење већине зграда		

Ефекти оштећења објеката услед дејства гасовитих продуката детонације се манифестују на релативно малим растојањима од центра експлозије при чему их

карактерише високи ниво натпритиска и кратко вријеме дејства (високи импулс). Ударни талас узрокује различите нивое оштећења на релативно већим удаљеностима (нижа вриједност натпритиска и дуже вријеме трајања). На степен оштећења објеката насталих усљед дејства ударног таласа утиче мјесто експлозије (унутар или изван структуре објекта, на површини тла или изнад тла на одређеној висини), геометријски облик, величина и положај објекта у односу на правац простирања ударног таласа и појава феномена рефлексije ударног таласа. С обзиром на то да је процес детонације егзотерман процес, присутан је и утицај приликом детонације ослобођене, велике количине топлотне енергије у виду високих температура чији утицај доводи до паљења предмета и објеката у зони дејства. Такође се ефекти дејства на објекте испољавају у виду оштећења насталих усљед примарне и секундарне фрагментације, односно, дијелова саме експлозивне направе као и дијелова објеката са већим степеном оштећења (уништени објекти у непосредној близини детонације).

Ефекти дејства експлозивних процеса на људе се огледају у нашошењу повреда различитог интензитета и карактера као и настанка леталних стања. Ови ефекти дејства експлозивних процеса су посљедица директног и индиректног дејства експлозије. У директна дејства експлозивних процеса (примарна) убрајају се директни удар изазван ударним таласом или усљед рушења конструктивних елемената попут зидова, кровова и сл. док се индиректна дејства класификују као секундарна и терцијарна. Главно секундарно дејство се остварује путем фрагментације при чему фрагменте чине дијелови експлозивне направе или дијелови објекта који се налази у зони дејства експлозије. Терцијарни ефекти укључују дјеловање натпритиска ударног таласа који се шири унутар затвореног простора објекта а који пролази кроз отворе на објекту (позори, врата и слично, тзв. притисак цурења), секундарних фрагмената усљед ломљења и лома стакла те помјерања цијелог тијела и накнадног контакта (удара) са чврстим површинама.

У односу на карактеристике појава приликом процеса детонације, настале различите повреде се дијеле на примарну, секундарну, терцијарну и квартарну категорију.

*Табела број 73. Категорије повреда људи усљед дејства детонационих процеса [144, 145]*

---

Категорија	Карактеристика	Утицај на људско	Врста повреда
------------	----------------	------------------	---------------

---

		тијело	
Примарни	Специфично за дејство бризантних експлозива, удар на површину људског тијела изазван ударним таласом	Плућа, средње ухо, систем за варење (гастроинтестинални тракт)	Плућна баротраума Пукнуће и оштећење средњег уха Крварење и перфорације у трбушној регији Пукнуће глобуса (ока) Потрес мозга (без физичких знакова повреде главе)
Секундарни	Ефекти утицаја фрагментације	Цијело тијело	Продорне (балистичке) повреде Тупе повреде
Терцијарни	Ефекти усљед утицаја тзв. притиска цурења	Цијело тијело	Преломи и трауме дијелова тијела Затворене и отворене повреде главе
Квартарни	Све повреде, болести или болести које нису посљедица примарног, секундарног или терцијарног механизма укључујући погоршања или компликације постојећих услови.	Цијело тијело	Опекотине Повреде нагњечења Затворене и отворене повреде главе Проблеми у раду респираторног система (дим, прашина и сл.) Ангина Хипергликемија Хипертензија

Настанак леталног стања зависи од индивидуалних карактеристика особа у зони дејства експлозије као и од карактеристика детонационог процеса (разорног и рушећег дејства детонације) те положаја у односу на мјесто детонације. На основу израза:

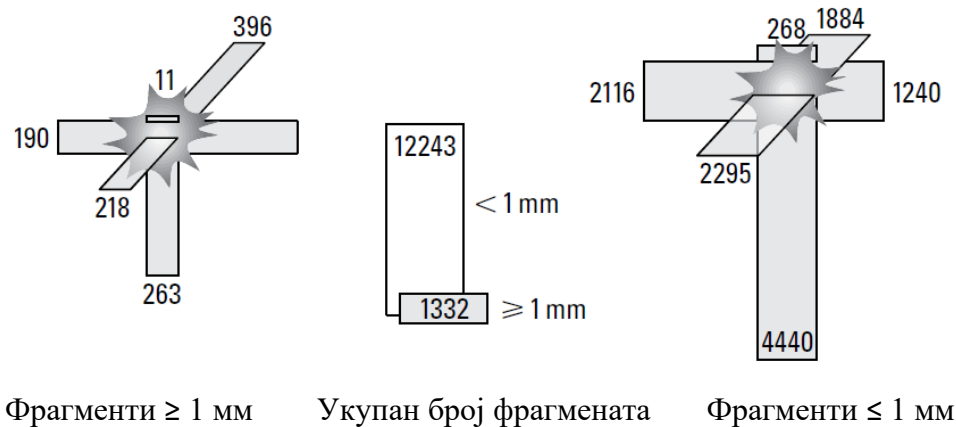
$$D \approx 2w^{0.33} \quad (85)$$

$D$  – удаљеност (м)

$w$  – маса експлозивне супстанце (кг)

може се одредити приближно вриједност удаљености од мјеста експлозије у зависности од масе експлозивне материје при којој постоји могућност недешавања леталног стања (преживљавања).

Иако ударни талас сам по себи изазива тешке повреде и доводи до бројних смртних случајева, зона дејства ударног таласа је ограничена на релативно мали простор с обзиром на то да интензитет ударног таласа (натпритисак) веома брзо опада са повећањем дистанце од центра експлозије. Другу главну опасност представљају секундарни ефекти представљени фрагментима велике брзине, како у непосредној близини тако и на већим даљинама. У зависности од конструкције експлозивне направе настаје веома велики број фрагмената који се крећу великим брзинама како у непосредној близини тако и на релативно већим раздаљинама (слика 171).



Слика број 171. Број фрагмената стаклене чаше запремине 10 милилитара насталих детонацијом 1 милиграма оловног азида [20]

Могућност продирања фрагмента (секундарно дејство) у људско тијело зависи од односа површине фрагмента које је у контакту са тијелом и од тежине фрагмента. За фрагменте мање тежине ( $\approx 15$  грама) који посједују брзину од 30 m/s, вјероватноћа

продирања у тијело износи 50%. Тежи фрагменти захтијевају веће брзине. Међутим, фрагменти чија маса износи реда величине килограм и више проузрокују озбиљне повреде и на мањим брзинама ( $\approx 3 \text{ m/s}$ ). Фрагменти оваквих карактеристика су специфични за фрагменте настале приликом рушења објекта. Терцијални ефекти експлозије такође могу довести до озбиљних повреда или чак смрти. Вриједности натпритиска ударног таласа који пролази кроз отворе у конструкцији објекта (притисак цурења) има мању вриједност у односу на вањско оптерећење конструкције (натпритисак на вањској страни конструкције) али и даље могу бити довољног интензитета да проузрокују рушење унутрашњих конструктивних елемената са посљедицама по људе. Притисак цурења такође могу изазвати директне повреде као и повреде настале усљед помјерања тијела и контакта са чврстим елементима.

## **6. МЕТОДЕ ДЕТЕКЦИЈЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ ЕКСПЛОЗИВНИХ МАТЕРИЈА**

Имајући у виду да ефекте дејства експлозивних материја и процеса по људе, објекте и животну средину карактеришу веома изражене негативне посљедице (изазивање повреда, смртности код људи, рушење и разарање објеката, онечишћење и деградација животне средине), методе детекције и идентификације експлозивних материја имају велики значај и циљ да спречавају неовлашћене и недозвољене употребе. Нарочито је то изражено приликом откривања скривених експлозивних направа које садрже експлозивне материје, као и саме експлозивне материје. Такође, ове методе имају велику улогу у оквиру лабораторијских анализа након извршења криминалних дјела. Примјена ових метода се врши унутар више различитих подручја као што су:

- детекција скривеног експлозива
- анализа продуката и нуспродуката насталих експлозијом
- анализа ефеката експлозије
- анализа других дијелова експлозивне направе
- анализа неексплодираних остатака експлозивне материје након експлозије
- анализа неексплодираних експлозивних материја
- детекција и анализа трагова приликом руковања и употребе експлозивних материја.

Методе детекције и идентификације експлозивних материја подразумевају откривање, проналажење и препознавање различитих експлозивних материја или направа које садрже експлозивне материје у различитим количинама (у маси, у траговима).

За детекцију и идентификацију експлозивних материја у маси (уочљива количина материје) претежно се користе инструменталне методе путем анализе различитих узорака.

Откривање и детекција експлозивних материја у траговима се заснива на откривању и детекцији површинске контаминације експлозивним честицама и гасовитих испарења експлозивних материја. Приликом израде и манипулације експлозивним направама, долази до како контаминације површине експлозивне направе тако и дијелова тијела и одјеће која се налази у контакту са контаминираном површином. Такође је могуће извршити детекцију експлозивних материја на основу испарења експлозивних материја. Експлозивне честице не посједују довољан ниво енергије да би се могле слободно кретати, односно, отпуштати из масе експлозивне супстанце и наставити слободно кретање у гасовитој фази те се накупљају на граничној површини чврсте и гасовите фазе (површина чврсте супстанце која је у контакту са ваздухом). Атмосфера (ваздух) која нас окружује садржи око 50.000 микрочестица (величине  $10^{-7}$ ) по једном кубном центиметру које приликом слободног кретања у ваздуху долазе у контакт са граничном површином између фаза а, самим тим, и са слободним честицама експлозивне материје. Под утицајем различитих сила на молекулском нивоу вежу се са честицама експлозивне материје и односе их даље у гасовиту фазу (ваздух). Поновно таложење ових финих честица је могуће након контакта са неком другом површином (људска кожа, тканине, одјећа, обућа и слично).

Приликом откривања и анализе експлозивних супстанци (експлозивних направа), у траговима инструменталне технике, и методе детекције и идентификације имају веома значајну улогу.

## **6. 1. Инструменталне методе**

Инструменталне методе детекције и идентификације експлозивних материја подразумевају кориштење различитих уређаја чији је принцип рада и функционисања заснован на различитим физичко-хемијским појавама и особинама испитиваних супстанци и смјеса. У различите физичко-хемијске појаве и особине сврставају се:

- емисија зрачењем
- апсорпција зрачењем
- расипање зрачења
- рефракција зрачења
- дифракција зрачења
- електрична струја
- маса
- електрични отпор
- радиоактивност
- ротација зрачења
- наелектрисање
- термичке особине
- електрични потенцијал
- брзина реакције
- масени удио.

У зависности од мјеста провођења поступака метода детекције и идентификације, разликују се тзв. *IN SITU*, односно, на лицу мјеста или тзв. *EX SITU*, односно, изван мјеста. Подјела се може извршити и на методе које се врше с одређене удаљености (енг. *stand – off*) и директне методе (енг. *non stand – of*). Такође се користе и методе којима се може даљински управљати (енг. *remote control*). Са становишта могућности преносивости и манипулације уређаја којима се врши метода, подјела се врши на стационарне и мобилне уређаје, односно, методе које се проводе.

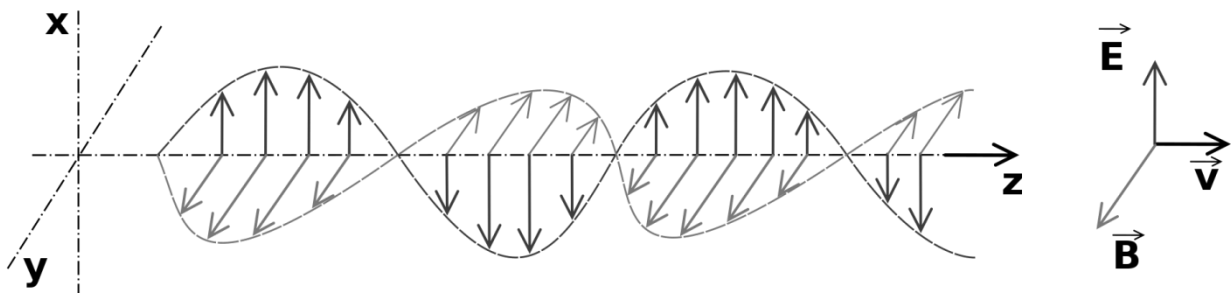
Класификација инструменталних метода детекције и идентификације на основу физичко-хемијских појава се врши на:

- спектроскопске методе
- термичке методе
- спектрометријске методе
- хроматографске методе
- остале методе.

### 6. 1. 1. Спектроскопске методе

Спектроскопске методе (спектроскопија) представљају методе и технике засноване на примјени електромагнетних таласа, односно, ефеката интеракције између електромагнетних таласа и материје.

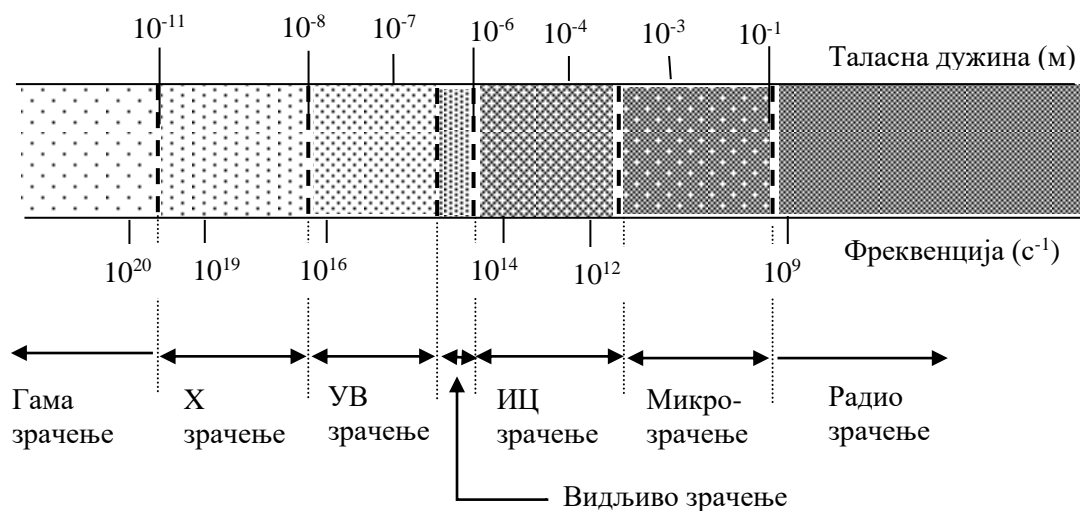
Електромагнетно зрачење је комбинација електричног и магнетног поља која осцилују и крећу се кроз простор у виду таласа. Равни у којима осцилују таласи међусобно затварају угао од  $90^0$  (слика 172).



Слика број 172. Електромагнетни талас ( $E$  – електрично поље,  $V$  – магнетно поље)

Природа електромагнетног таласа се може посматрати двојно. Са једне стране, електромагнетно зрачење је носилац електромагнетне интеракције (силе, енергије), а, са друге стране, може се представити као кретање честица које се називају фотони. Електромагнетни таласи се крећу брзином свјетлости ( $300000 \text{ km/s}$ ). С обзиром на таласну природу, главне карактеристике електромагнетних таласа представљају фреквенција<sup>239</sup> и таласна дужина<sup>240</sup>. Сва електромагнетна зрачења различитих таласних дужина чине спектар електромагнетног зрачења.

<sup>239</sup> Фреквенција или учесталост представља број понављања у јединици времена.



Слика број 173. Спектар електромагнетног зрачења

Област која се бави проучавањем међудејства електромагнетних таласа (зрачења) и материје назива се спектроскопија а методе засноване на међусобној интеракцији спектроскопске методе.

Класификација спектроскопских метода се врши на основу интеракција електромагнетних таласа одређене таласне дужине и испитиване супстанце:

- спектроскопске методе на основу рендгенских таласа
- спектроскопске методе на основу електромагнетних таласа ултравиолетног и видљивог дијела спектра
- спектроскопске методе на основу електромагнетних таласа инфрацрвеног дијела спектра
- спектроскопске методе на основу електромагнетних таласа различитих области спектра.

Методе и технике детекције и идентификације експлозивних материја заснованих на кориштењу рендгенских зрака имају веома широку примјену. Рендгенски зраци су електромагнетни таласи из спектра електромагнетног зрачења чија фреквенција износи  $3 \times 10^{16}$  до  $3 \times 10^{19}$  херца и таласних дужина од 0,1 до 10 нанометара ( $0,1 \times 10^{-9}$  до  $1 \times 10^{-8}$

<sup>240</sup>Таласна путања се описује помоћу синусоиде, таласна дужина представља размак између два сусједна врха (максимума) или удубљења (минимума) синусоиде.

*m*). Сврставају се у јонизујућа<sup>241</sup> зрачења те посједују високи ниво енергије. Рендгенско зрачење (икс зраци) настаје приликом удара, великом брзином (убразним напоном од 10 000–100 000 волти), високоенергетских електрона у метал (мета, анода рендгенске цијеви) при чему долази до наглог успоравања упадних електрона и, с обзиром на то да су електроактивне честице, долази до емитовања високоенергетског зрачења (рендгенских зрака).

У области рендгенског зрачења разликују се тзв. меки рендгенски зраци, тврди рендгенски зраци и гама зрачење при чему се и користе у различитим областима.

У спектроскопске методе засноване на примјени рендгенског зрачења сврставају се:

- радиографија
- рендгенска спектроскопија
- рендгенска флуоросценција
- рендгенска дифракција.

Радиографија се заснива на проласку (трансмисији) рендгенских зрака кроз различите материјале који се налазе на правцу простирања. Услјед различитог интензитета апсорпције рендгенских зрака за различите материјале, излазни рендгенски зраци посједују различите интензитета и као такви се детектују на фото-диодама. Помоћу дигиталних сигнала, насталих на фото-диодама формира се слика (слика 174).



*Слика број 174. Слика формирана помоћу рендгенских зрака (радиографија)*

---

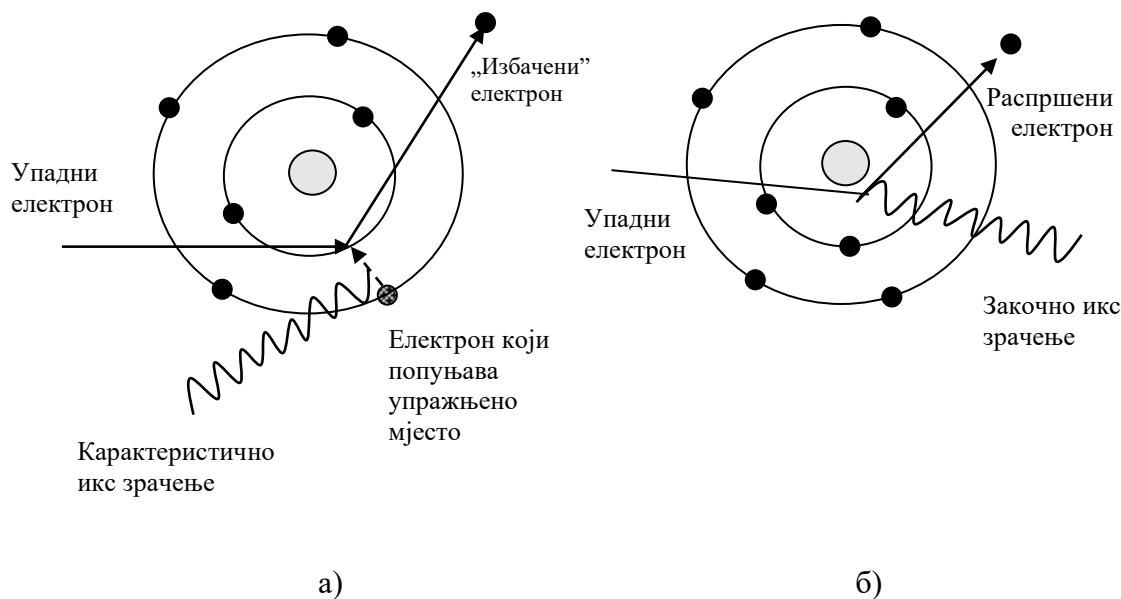
<sup>241</sup>Наелектрисани и електромагнетски активни.

Уређаји за рендгенско скенирање су различитих конструктивних изведби те се употребљавају за контролу особа и различитих предмета (торбе, пакети, моторна возила, контејнери и слично).

Техника под називом рендгенска спектроскопија је заснована на анализи побуђених рендгенских зрака те је могуће извршити квантитативну и квалитативну анализу испитиване супстанце.

Претходно је наведено да рендгенски зраци настају приликом наглог успоравања емитованих електрона или јона. Успоравање ових наелектрисаних честица, односно, настанак рендгенских таласа се одиграва на атомском нивоу на два различита начина.

- Кад упадни електрон посједује довољно енергије, долази до судара са електроном из унутрашњих орбитала и његовим избацивањем из електронског омотача испитиване супстанце. Настаје упражњено мјесто у датој орбитали. Тада електрони из вањских орбитала попуњавају упражњено мјесто при чему долази до емитовања рендгенских фотона који стварају спектар рендгенског зрачења карактеристичан за дату супстанцу. Спектар рендгенских зрака настао избацивањем електрона из унутрашњих орбитала назива се *карактеристично зрачење*.
- Приликом проласка упадног електрона поред језгра атома испитиване супстанце, усљед дејства јаког електричног поља протона, долази до наглог успоравања и распршивања упадних електрона. С обзиром на то да упадни електрони посједују високу енергију и веома брзо се крећу, успоравање и распршивање доводи до емитовања фотона, односно, рендгенских зрака. Рендгенски зраци проузроковани успорењем електрона назива се *закочно зрачење*.



Слика број 175. Шематски приказ: а) карактеристичног и б) закочног зрачења рендгенских зрака

С обзиром на то да елементи показују јединствено карактеристично зрачење, могуће је извршити квалитативну и квантитативну анализу испитиваних узорака.

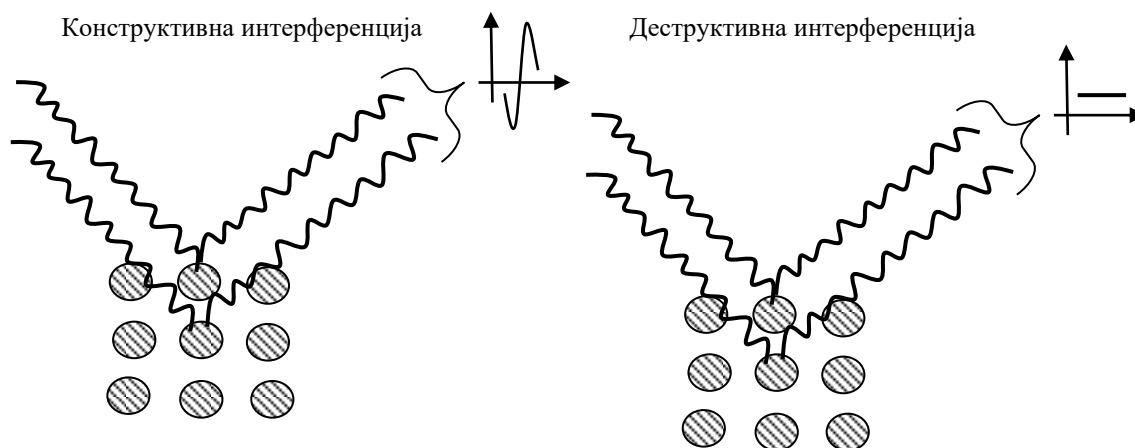
Појава емисије електромагнетног зрачења (претежно у видљивом дијелу спектра електромагнетног зрачења) које није побуђено термичким процесом и повишеном температуром назива се луминисценција. Луминисценција није последица побуђивања повишеном температуром већ је побуђивање емисије зрачења проузроковано другим видовима енергије (хемијске реакције, стрес кристала, електрична струја итд.). Луминисценција се дијели на фосфоросценцију и флуоросценцију.

Фосфоросценција представља појаву трајања емисије зрачења и након престанка дјеловања побуде. Флуоросценција представља појаву трајања емисије зрачења само током дјеловања побуде.

Рендгенска флуоросценција представља емисију тзв. секундарних рендгенских зрака који су карактеристични за поједине елементе. Секундарно зрачење је изазвано примарним рендгенским таласом или гама таласима (електромагнетно зрачење са таласним дужинама у гама области). Апсорпција енергије примарног зрачења изазива секундарно зрачење које посједује нижи ниво енергије у односу на примарни

(побудни) талас. За мјерење флуоросценције се користе два основна типа уређаја, флуорометар и спектрофлуорометар. Конструисани су уређаји за извођење мјерења овом методом који се могу лако преносити као и изведбе за лабораторијско испитивање.

Рендгенска дифракција је метода испитивања молекулске структуре једињења који се налазе у форми кристала (прашкасте супстанце). Метода се заснива на побуђивању електрона у вањској љусци који, након побуде, дјелују као нови извори зрачења, односно, долази до расипања побудног рендгенског таласа. Поједини расути таласи ступају у интеракцију при чему долази до појачања расејаних таласа (конструктивна интерференција) док се истовремено поједини таласи слабе или чак потпуно поништавају (деструктивна интерференција). Ова појава се назива дифракција (слика 176).



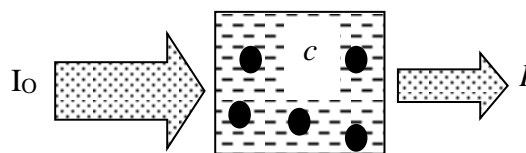
Слика број 176. Дифракција рендгенских таласа

На основу резултата испитивања, могуће је одредити молекулску и кристалну структуру молекула испитиваног материјала.

Електромагнетни таласи ултравиолетног дијела електромагнетног спектра посједују таласне дужине у распону од 10 до 400 нанометара док су таласи видљивог дијела спектра у распону 400–700 нанометара. У спектроскопске методе које користе тзв. ултравиолетно и видљиво зрачење убрајају се:

- *UV/VIS* спектроскопија
- Раманска спектроскопија
- ласерски индукована пробојна спектроскопија
- колориметрија.

*UV/VIS* спектроскопија припада групи апсорпционих или рефлектантних спектроскопских техника при чему се користе електромагнетни таласи у области видљивог и ултравиолетног дијела спектра. Претежно се користи за одређивање концентрације испитиваног узорка у течной фази. Када се кроз раствор непознате концентрације пропусте електромагнетни таласи *UV/VIS* дијела спектра, молекуле материје апсорбују енергију упадних таласа при чему долази до прелаза електрона из основног стања у побуђено стање. На основу Бер-Ламбертовог закона, апсорпција раствора је директно пропорционална концентрацији упијајућих врста у раствору и дужини пута (слика 177).

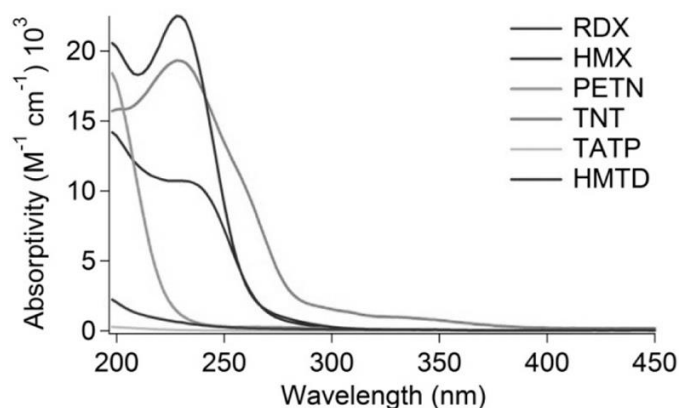


Слика број 177. Спектроскопија *UV/VIS* дијела спектра ( $I_0$ – интензитет упадног таласа;  $I$ – интензитет излазног (апсорбованог) таласа;  $L$  – дужина узорка;  $c$  – концентрација испитиваног узорка)

Метода се заснива на мјерењу интензитета таласа после проласка кроз узорак и упоређивања са интензитетом прије пролаза кроз раствор. Однос интензитета упадног и излазног електромагнетног таласа се назива трансмитанција<sup>242</sup> и изражава се у процентима (%). Логаритамска вриједност трансмитације се назива оптичка густина или апсорбанција. Уређај за спектроскопију помоћу *UV/VIS* таласа се назива спектрофотометар.

Резултати мјерења се приказују графичким приказом (слика 178), тзв. спектром *UV/VIS* зрачења.

<sup>242</sup> Трансмитанција је дио упадног зрачења дате таласне дужине који је прошао кроз медиј на који пада зрачење.



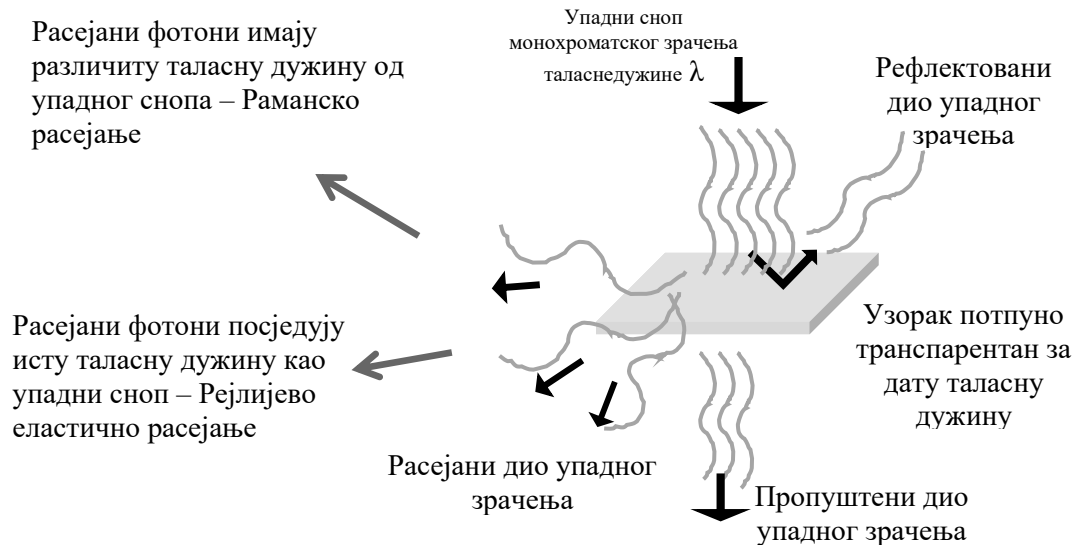
Слика број 178. Спектар UV/VIS зрачења за поједине експлозивне материје [146]

Овом методом могуће је детектовати веома мале концентрације материје (за TNT граница детекције износи 100 нанограма).

Раманска спектроскопија се заснива на интеракцији ласерских таласа (таласи једне таласне дужине који се налазе у истој фази осциловања) из дијела видљивог спектра електромагнетних таласа, чије се фреквенције налазе непосредно уз подручје инфрацрвених и ултравиолетних таласа, као и унутар подручја рендгенских таласа и испитиване супстанце.

Када упадни талас монохроматског зрачења<sup>243</sup> дође у контакт са чврстим узорком који је транспарентан (пропустљив за дату таласну дужину упадног таласа), један дио фотона се одбије, један дио фотона се пропусти а један дио фотона се распрши (расеје) (слика 179).

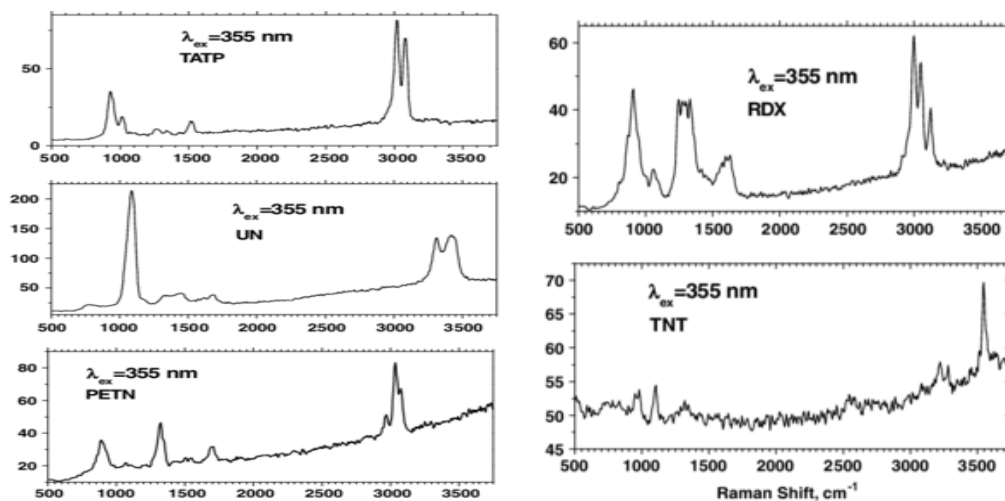
<sup>243</sup> Монохроматско зрачење је зрачење састављено од таласа само једне таласне дужине.



Слика број 179. Шематски приказ расејања упадног таласа

Ако расејани фотони посједују исту таласну дужину као упадни сноп називају се Рејлијево зрачење или еластично зрачење. Ако расејани фотони посједују различиту таласну дужину у односу на таласну дужину упадног зрака, тада се називају Раманско расејање или нееластично расејање. Раманска спектроскопија је заснована на основу Раманског расејања при чему се енергија распршеног фотона смањује или повећава. Помоћу Раманске спектроскопије врши се испитивање структуре молекула.

Постоји више различитих техника од којих је Раманска вибрациона спектроскопија основна техника. Резултати Раманске спектроскопије су приказани као Рамански спектар карактеристичан за дату супстанцу (слика 180).



Слика број 180. Рамански спектри појединих експлозивних материја [147]

Помоћу Раманске спектроскопије могуће је детектовати веома мале концентарције експлозивних материја (табела 74). Савремени развој Раманске спектроскопске методе је омогућио конструкцију уређаја на основи Раманске спектроскопије са могућношћу детекције експлозивних материја на удаљености већој од 200 метара [148].

Табела број 74. Границе детекције за поједине типове уређаја за Раманску спектроскопију [149]

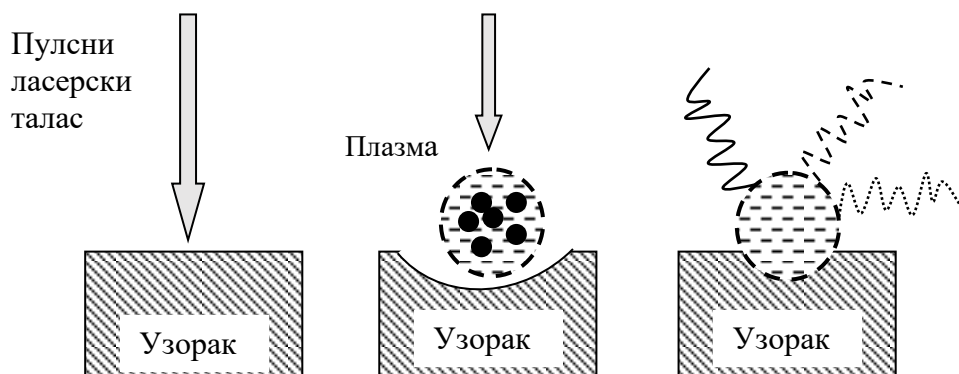
Раманска спектроскопија у stand-off режиму	<i>PETN, RDX</i> (>20m) (30m) <i>DNT, TNT, RDX</i> (7m)	<i>TNT, UN</i> <i>DNT, TNT, RDX</i> (7m)	$<20\mu\text{g}/\text{mm}^{-2}$ <500 $\mu\text{g}$ <3mg
Портабл изведба	23 incl. <i>TNT, DNT, RDX</i>		pure, mg
SERS* у гасовима	<i>TNT</i>		5 ppb**
SERS у течности	<i>TNT, DNT</i> <i>TNT, DNT, DPA, RDX</i>		0,1 ppt*** $10^{-7}$ M

\* Површински појачана раманска спектроскопија (енг. *Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, SERS*)

\*\* Билионити дио (*parts-per-billion, 10<sup>-9</sup>*)

\*\*\* Трилионити дио (*parts-per-trillion, 10<sup>-12</sup>*)

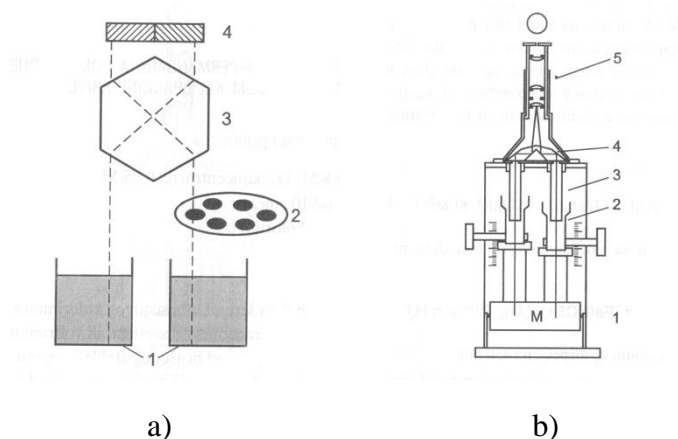
Ласерски индукована пробојна спектроскопија (енг. *Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS*) представља емисиону спектроскопску методу засновану на пулсном ласерском извору зрачења таласа из *UV* и *VIS* области блиске *IR* или пулсни ласерски извор зрачења за таласе из *UV* и *VIS* области. Приликом емитовања таласа високе енергије, долази до настанка плазме. Када се ласерски талас заустави усљед контакта са узорком, долази до ослобађања веома малих количина материјала (нанограма до пикограма) након чега настаје плазма са температурама од око  $10^5$  °C). Услјед оваквих температура долази до декомпозиције испитиване материје те, током хлађења плазме, појављују се одговарајући таласни пикови за сваки елемент који се детектује на детектору (слика 181).



Слика број 181. Принцип рада ласерски индуковане пробојне спектроскопије

Уређаји за ласерски индуковану пробојну спектроскопију су изведени и у стационарној и преносивој варијанти.

Колориметријска спектроскопија се заснива на апсорпцији електромагнетног зрачења таласних дужина из области видљивог дијела спектра и дијела близу ултравиолетног спектра у растворима. Мјерење се заснива на поређењу степена апсорбације за обојене растворе познате и обојене растворе испитиване концентрације. Уређаји помоћу којих се врше испитивања називају се компаратори слика (енг. *Hellige-ov*) и колориметри (енг. *Duboscqui-ov*) (слика 182).



Слика број 182. а) компаратор слика (енг. *Hellige-ov*); б) колориметар (енг. *Duboscqui-ov*)

Поступак испитивања се проводи на начин да се испитивана супстанца раствори у одговарајућем растварачу. Раствор познате концентрације растворене супстанце и раствор са непознатом концентрацијом растворене супстанце се изложи дјеловању електромагнетних таласа а затим се врши поређење. Уочене разлике у интензитету боја се пореде са стандардном мапом за различите експлозивне материје. У колориметрији се увијек користи полихроматско зрачење што искључује квантитативну анализу.

У групу колориметријских тестова се такође сврставају тестови засновани на промјени боје испитиваног узорка изазвано додавањем тзв. тест реагенаса. Приликом контакта између одређеног реагенса и испитиване материје одиграва се хемијска реакција приликом чега реагенс ступа у реакцију са специфичном функционалном групом<sup>244</sup>. Ова метода омогућује једноставно и брзо квалитативно одређивање експлозивних материја. У табели 75 су приказани специфични реагенси за поједине експлозивне материје као и обојење настало хемијском реакцијом [150]

Табела број 75. Референтни реагенси за детекцију експлозивних материја помоћу колориметријске реакције [150]

Реагенс	Састав	Анализирани експлозив	Настаје боја
Грисов (енг. <i>Greiss</i> )	0,2% N-(1-нафтил)етилен диами дихидрохлорид 2% сулфаниламид у 5% фосфорној киселини	<i>RDX, PETN</i> , нитратни јон	Ружичаста („пинк“)
Неслеров (енг. <i>Nessler</i> )	Калијум-јодид, живин хлорид, дејонизована вода <sup>245</sup>	<i>TNT</i> , Амонијум-јон	Црвено-наранџаста
Хлоридни	Концентровани сребрни нитрат, дејонизована вода	Хлоридни јон	Бијели талог
Сулфатни	10 % баријум-хлорид, дејонизована вода	Сулфатни јон	Бијели талог

<sup>244</sup> Функционална група представља групе атома у органским једињењима које дају карактеристичне особине тим једињењима и њиховим реакцијама.

<sup>245</sup> Дејонизована вода је вода из које су уклоњени све врсте минерала и јона.

Перхлоратни	0,3 % метилен плаво, дејонизована вода	Перхлоратни јон	Љубичаста
Пероксидни	Дифениламин у концентрованој сумпорној киселини	Пероксиди	Тамно плава

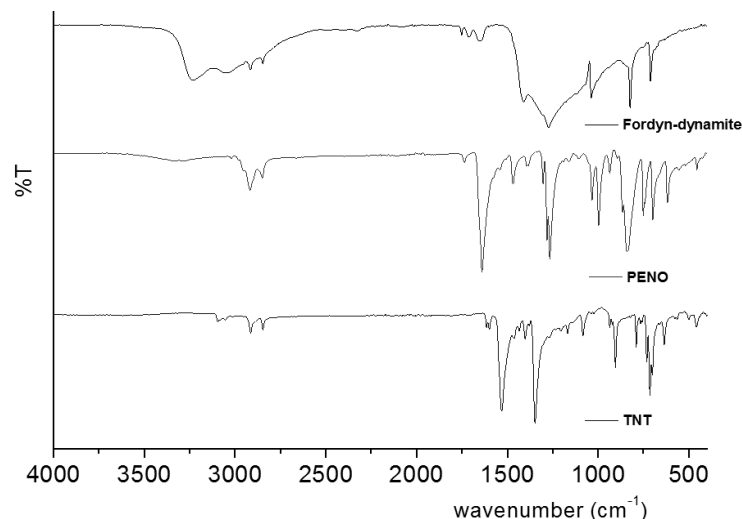
У спектроскопске методе засноване на основу електромагнетних таласа инфрацрвеног дијела спектра сврставају се:

- инфрацрвена спектроскопија (енг. *IR spectroscopy*)
- ласерска апсорпцијска спектроскопија (енг. *Cavity Ring Down Spectroscopy, CRDS*)
- терахерц спектроскопија.

Метода инфрацрвене спектроскопије се заснива на кориштењу електромагнетних таласа чије таласне дужине се налазе у области инфрацрвеног зрачења (од 0,78  $\mu\text{m}$ –1000  $\mu\text{m}$ ). На основу примјене, област инфрацрвеног зрачења са припадајућим таласним дужинама се дијели на:

- блиску 0,78–2,5  $\mu\text{m}$  (енг. *short wave infrared SWIR*)
- средњу 2,5–50  $\mu\text{m}$  (енг. *mid wave infrared MWIR*)
- далеку 50–100  $\mu\text{m}$  (енг. *long wave infrared LWIR*).

С обзиром на то да инфрацрвено зрачење не посједује довољан ниво енергије која би довела до електронских прелаза унутар молекулских орбитала, апсорбована енергија IR зрачења доводи до прелаза између вибрационих и ротационих енергетских нивоа молекула, односно, апсорбована количина енергије изазива прелазе на нивоу вибрација и ротација у молекулама. Графички приказ резултата мјерења се назива тзв. IR спектар при чему се на X-оси налазе вриједности таласне дужине а на Y-оси вриједност трансмитације (слика 183).



Слика број 183. IR спектар експлозивних материја [151]

Уређај за извођење инфрацрвене спектрофотометрије се назива спектрофотометар. У претходном временском периоду најшире су примјењивани тзв. дисперزيونи спектофотометри (енг. *Infrared spectroscopy*, *IR spectroscopy*) који су готово у потпуности замијењени са инфрацрвеним спектрофотометрима са Фуријеовом трансформацијом (енг. *Fourier transform infrared spectroscopy*, *FTIR spectroscopy*). Предности спектрофотометра се огледа у значајном побољшању карактеристика уређаја. С обзиром на то да одређене узорке није могуће адекватно анализирати помоћу апсорпције, примјењују се рефлексионе и емисионе инфрацрвене технике.

У рефлексионе технике се сврставају:

- огледалска рефлексија
- дифузна рефлексија
- ометена тотална рефлексија (енг. *attenuated total reflection*).

Емисионе IR спектроскопске методе се заснивају на чињеници да молекуле које апсорбују инфрацрвено зрачење након загријавања емитују инфрацрвене таласе карактеристичних таласних дужина. Границе детекције експлозивних материја су реда величине пикограма ( $10^{-12}$  килограма) (табела 76).

Табела број 76. Границе детекције за поједине експлозивне материје [151]

Експлозив	Метода	Граница детекције
<i>TATP</i>	<i>FTIR</i>	800 $\text{pg}/\text{m}^3$
<i>TATP</i>	<i>MWIR(QCL)</i>	300 $\text{pg}/\text{m}^3$
<i>DNT</i>	<i>FTIR</i>	31 $\text{pg}/\text{m}^3$
<i>DNT</i>	<i>MWIR(QCL)</i>	0,7 $\text{pg}/\text{m}^3$

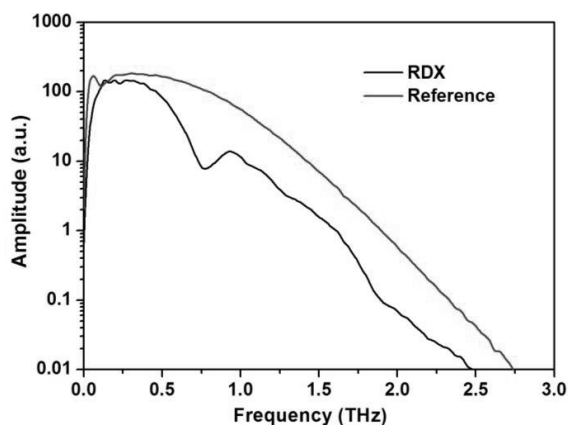
Ласерска апсорпцијска спектроскопија представља апсорпциону методу приликом које испитивани гасни узорак апсорбује или распрши (промијени таласну дужину) електромагнетни талас. Мјери се вријеме које је потребно да се интензитет упадног зрака смањи на одређену вриједност. Процедура се проводи на начин да се у шупљу затворену комору са рефлектујућим огледалима емитује ласерски талас (ласерски талас из инфрацрвеног таласног подручја). У зависности од геометрије коморе, интензитет упуштеног ласерског зрака почиње да се појачава услед рефлексије од огледала све до појаве резонанце, односно, момента када је интензитет улазног ласерског зрака на највишем нивоу. Затим се врши искључење извора ласерског зрака док се у комори ласерски зрак рефлектује при чему свако рефлектовање експоненцијално слаби интензитет ласерског таласа у комори. Мјери се вријеме потребно да се интензитет ласерског таласа смањи до неке одређене вриједности. Упуштањем испитиваног узорка у гасовитом стању проводи се иста процедура. Услед апсорпције ласерског таласа од стране гасовитог узорка, вријеме потребно за смањење интензитета ласерског таласа је мање него вријеме за које се интензитет ласерског таласа смањи у комори без присуства гасовитог узорка. Ласерску апсорпцијску спектроскопију карактерише веома високи ниво детекције, односно, изузетно ниска вриједност лимита детекције [152].

Табела број 77. Лимити детекције методом ласерске апсорпционе спектроскопије [152]

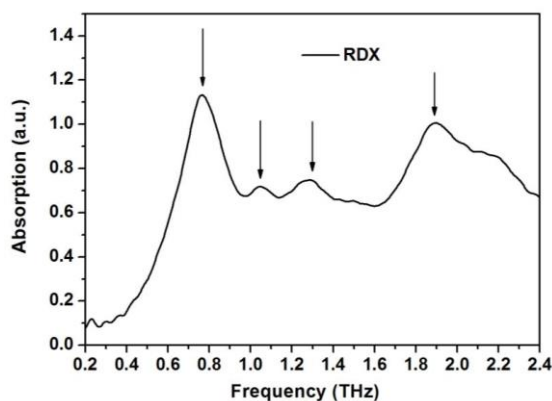
Експлозивна материја	Фазно стање	Лимит детекције
<i>TNT, 2,4-DNT, 1,3-DNB</i>	Гасовито	0,5 <i>ppb</i>
<i>DNT</i>	Чврсто	75 <i>ng</i>
Функционална група <i>NO<sub>2</sub></i>	Гасовито	10–100 <i>ppb</i>
<i>TNT, 2,4-DNT, 2,6-DNT</i>	Гасовито	10–100 <i>ng</i>

Спектроскопска метода приликом које се употребљавају електромагнетни таласи различитих таласних дужина (3 nm–10 μm) и подручја фреквенција 0,1–30 терагерца ( $1\text{THz} = 10^{12}\text{ Hz}$ ) назива се терагерц-спектроскопија. Област терагерцних таласа се у спектру електромагнетних таласа налази између области инфрацрвеног и микроталасног зрачења.

Метода се заснива на интеракцији терагерцних таласа и молекуле испитиване супстанце. Услед апсорпције и рефлексије терагерцних таласа одигравају се интермолекуларне вибрације<sup>246</sup>, интрамолекуларне торзије<sup>247</sup> или вибрације кристалне решетке које карактеришу различите спектралне карактеристике у зависности од испитиване супстанце.



a)



б)

<sup>246</sup> Представљају вибрације међуатомских или међумолекуларних хемијских веза.

<sup>247</sup> Представљају промену положаја међуатомских веза унутар молекуле.

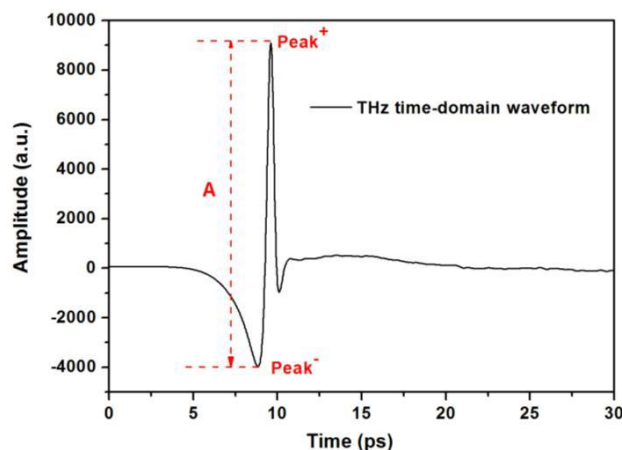
Слика број 184. а) спектри ТХз поља трансмитованих кроз узорак RDX-а б) спектар апсорпције RDX-а у фреквенцијском домену ТХз [153]

Основне предности терахерц-спектроскопије се огледају у сљедећим карактеристикама:

- бесконтактна техника која је у стању да прегледа предмете кроз паковање,
- недеструктивно за анализиране објекте,
- неинвазивно зрачење које нема опасно дејство по људско здравље,
- пружа хемијски потпис који може идентификовати прах и опасан материјал.

С обзиром на карактеристике терахерцних таласа своју примјену су нашли у детекцији мањих количина скривених експлозивних направа са могућношћу детекције са удаљености.

Развијена је спектроскопска метода под називом терахерц-спектроскопија са временском доменом (ТХз-ТДС) у којој су својства материје испитивана помоћу ултракратких импулса терахерц-зрачења а помоћу којих се врши генерисање и детекција терахерцног кохерентног<sup>248</sup> импулса. Помоћу наведене методе, могуће је мјерити амплитуду и фазу електричног поља терахерцног зрачења за разлику од терахерц-спектроскопије која показује осјетљивост на амплитуду [154].



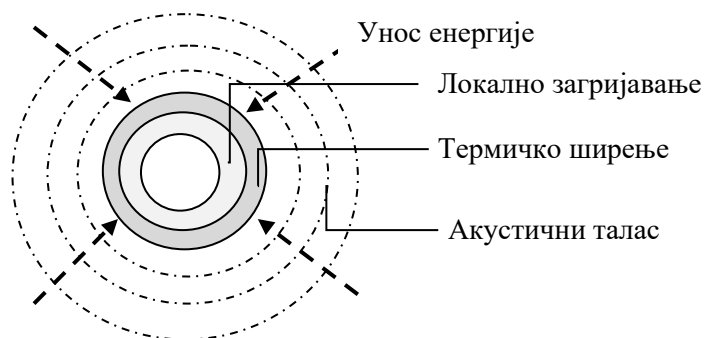
Слика број 185. Типичан пулс мјерен ТХз-ТДС методом [153]

<sup>248</sup> Два извора таласа су кохерентна ако су њихова фреквенција и таласни облик идентични

За провођење појединих спектроскопских метода користе се електромагнетни таласи из различитих области електромагнетног спектра. У методе детекције и идентификације експлозивних материја помоћу електромагнетних таласа из осталих области електромагнетног спектра се сврставају:

- фотоакустична спектроскопија
- неутронска активациона анализа.

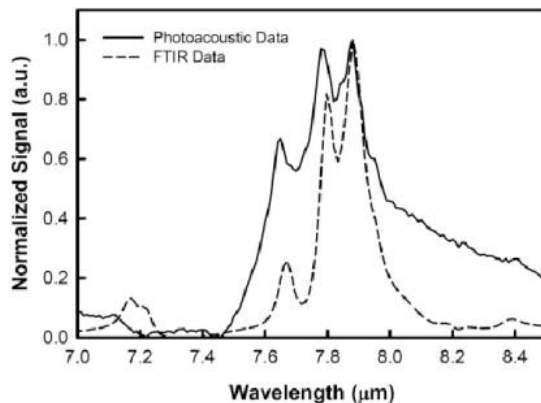
Метода фотоакустичне спектроскопије се заснива на мјерењу ефекта апсорбоване енергије електромагнетних таласа на различитим таласним дужинама. Апсорбована енергија врши локално загријавање услед чега долази до термичког ширења које проузрокује ширење таласа или притисак (акустички талас). Снимањем таласа на различитим таласним дужинама свјетлости настају фотоакустични спектри који служе за идентификацију компоненти узорка. Користе се различите таласне дужине [155].



Слика број 186. Шематски приказ формирања фотоакустичног таласа

Побољшања методе су изведена употребом ласерског таласа. Метода се назива ласерска фотоакустична спектроскопија (енг. *laser photoacoustic spectroscopy, LPAS*). Интензитет насталог звука је пропорционалан интензитету упадног таласа. Додатна побољшања су изведена додавањем резонантне коморе. У последње вријеме, све већу пажњу привлачи употреба тзв. конзолног детектора при чему постоје три оперативна мода, статичко савијање, динамички резонантни и биметални топлотни мод. Метода са употребом конзолног детектора се назива конзолно побољшана фотоакустична метода (енг. *Cantilever enhanced photoacoustic spectroscopy*).

Резултати испитивања експлозивних материја помоћу фотоакустичне спектроскопске методе се приказују спектром фотоакустичног зрачења (слика 187).



Слика број 187. Спектри зрачења RDX-а настали помоћу фотоакустичне методе и инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом [156]

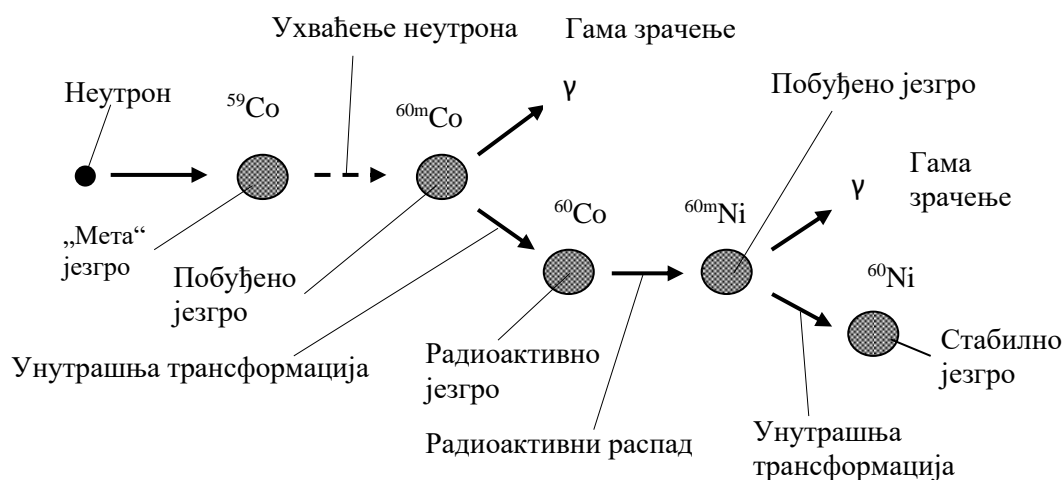
Вршена су испитивања употребе фотоакустичне спектроскопије у stand-of моду. Резултати указују на веома високи ниво осјетљивости (реда величине билионитог дијела) (табела 78).

Табела број 78. Резултати испитивања фотоакустичне спектроскопије у stand-of моду [157]

Експлозивна материја	Метода	Удаљеност, м	Лимит детекције	
RDX	QE-PAS	20	~ 100 ng/cm <sup>2</sup>	
DNT		12	5 μg/cm <sup>2</sup>	подлога Al
PETN		12	5 μg/cm <sup>2</sup>	подлога Al
DNT		6	50 μg/cm <sup>2</sup>	подлога дрво
PETN		6	50 μg/cm <sup>2</sup>	подлога дрво
DNT, TNT, Tetryl, RDX, HMX, PETN ,TATP	IR-PAS		100 μg	

*QE-PAS* (*Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy*) – кварцом појачана фотоакустична спектроскопија, *IR-PAS* – инфрацрвена фотоакустична спектроскопија

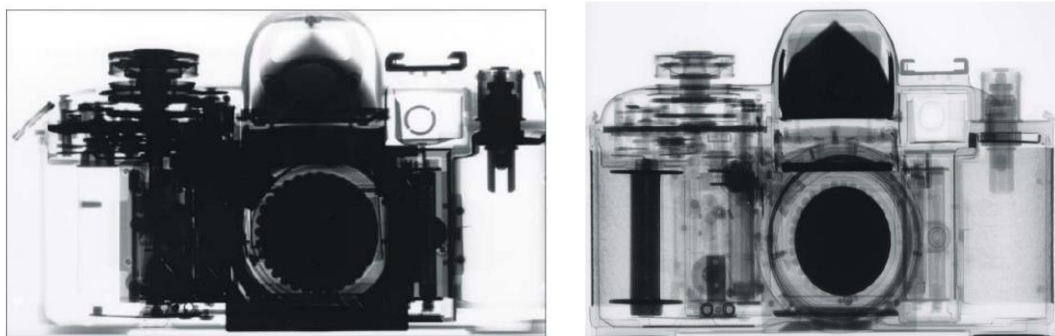
Анализа активације неутрона (неутронска активациона анализа) представља, у суштини, нукларни процес који се користи за одређивање концентрације елемената. Метода се заснива на побуди неутрона који се налазе у језгру атома. Испитивани узорак се бомбардује неутронима услед чега елементи формирају радиоактивне изотопе. Због настале нестабилности у језгру и тенденције постизања стабилног стања долази до радиоактивног распада језгра атома. Посљедице радиоактивног распада је промјена масе и/или хемијских својстава уз истовремено емитовање јонизујућег зрачења. Емисије радиоактивности и начини распада су познати за сваки елемент. Проучавањем спектра емисије радиоактивног узорка могуће је одредити концентрацију елемената у посматраном узорку (слика 188).



Слика број 188. Шематски приказ настанка радиоактивног изотопа и преласка у стабилно стање (тзв. распад)

Када се неутронска активациона анализа изводи директно на озраченим узорцима, метода се назива инструментална анализа активације неутрона (енг. *Instrumental Neutron Activation Analysis, INAA*). Техника приликом које су озрачени узорци подвргнути хемијском раздвајању назива се радиохемијска анализа активације неутрона (енг. *Radiochemical Neutron Activation Analysis, RNAA*). Широка примјена ове методе се огледа у радиографији, односно, стварању слике. Побољшане

карактеристике неутронске радиографије у односу на рендгенску радиографију је приказано на слици 189.



а)

б)

Слика број 189. Слика: а) рендгенска радиографија; б) неутронска радиографија [158]

Помоћу методе неутронске активационе анализе, вршене су анализе доказног материјала у појединим специфичним случајевима<sup>249</sup>.

### 6. 1. 2. Термичке методе

Термичка анализа се дефинише као скуп техника којима се мјере физикална својства материја и/или њезиних реакцијских продуката у функцији температуре или времена при чему је материја подвргнута програмираној промјени температуре у контролисаној атмосфери.

У термичке методе се сврставају термогравиметријска анализа (*TGA*), динамичка механичка анализа (*DMA*), диференцијална термичка анализа (*DTA*) и диференцијална претражна калориметија (*DSC*). Детаљнији приказ термичких метода је представљен у поглављу Осјетљивост на топлоту.

---

<sup>249</sup> Примјеном методе неутронске активационе анализе је разријешена недоумица везана за број испалењих метака приликом убиства америчког предсједника Кенедија 1963. године. Методом парафинске рукавице је првобитно установљено да је једини извршилац био Ли Харви Освалд. Накнадно анализом, 1977. године уз помоћ неутронске активационе анализе фрагмената зрна нађених на лицу мјеста утврђено је да су приликом атентата испалења два хица, односно, да су учествовале најмање двије особе. На сличан начин је доказано (2005. године) да се смрт Наполеона Бонапарте 1821. године не може приписати тровању арсеном у храни.

### 6. 1. 3. Спектрометријске методе

За разлику од спектроскопских метода које се заснивају на проучавању интеракције електромагнетних таласа и испитиване материје при чему настају карактеристични спектри, спектрометријским методама се врши мјерење појединих физикалних величина карактеристичног спектра. Постоје четири основна типа спектрометра:

- спектрометрија масе (*Mass spectrometry*)
- јон-покретна спектрометрија – масена спектрометрија (енг. *Ion-mobility spectrometry – Mass spectrometry*).

Масена спектрометрија представља скуп техника помоћу којих се врши анализа молекула на основу омјера масе и наелектрисања. Резултати се приказују као масени спектар који представља интензитет јона у функцији омјера масе и наелектрисања. Спровођење технике подразумијева јонизацију молекула у јонизатору након чега се настали јони проводе кроз анализатор који раздваја јоне у простору и времену а затим одводе на детектор гдје производе електрични сигнал који се може регистровати на осцилоскопу, писачу, рачунару. Јонизација<sup>250</sup> се може проводити на више начина након чега се настали јони подвргавају и раздвајају под утицајем електричног или магнетног поља. У зависности од начина провођења поступка јонизације, развијен је већи број метода и техника масене спектрометрије.

Табела број 79. Методе и технике масене спектрометрије у зависности од типа јонизације

Хемијска јонизација енг. <i>Chemical ionization</i> (CI)	Брзо бомбардовање енг. <i>Fast bombardment (FAB)</i>	Хемијска јонизација на атмосферском притиску енг. <i>Atmospheric pressure chemical ionization (APCI)</i>
Свијетло пражњење	Масена спектрометрија искром	Секундарна спектрометрија масе

<sup>250</sup>Јонизација је процес у којем атом губи валентни електрон из своје последње електронске љуске. Пошто атом губи електрон, постаје позитивни јон (има више протона од електрона). Електрон који се ослободио из последње љуске назива се слободни електрон. Када слободни електрон изгуби дио енергије и дође у спољну електронску љуску неутралног атома, атом постаје електрично негативно набијен (јер сад има више електрона од протона) и постаје негативни јон.

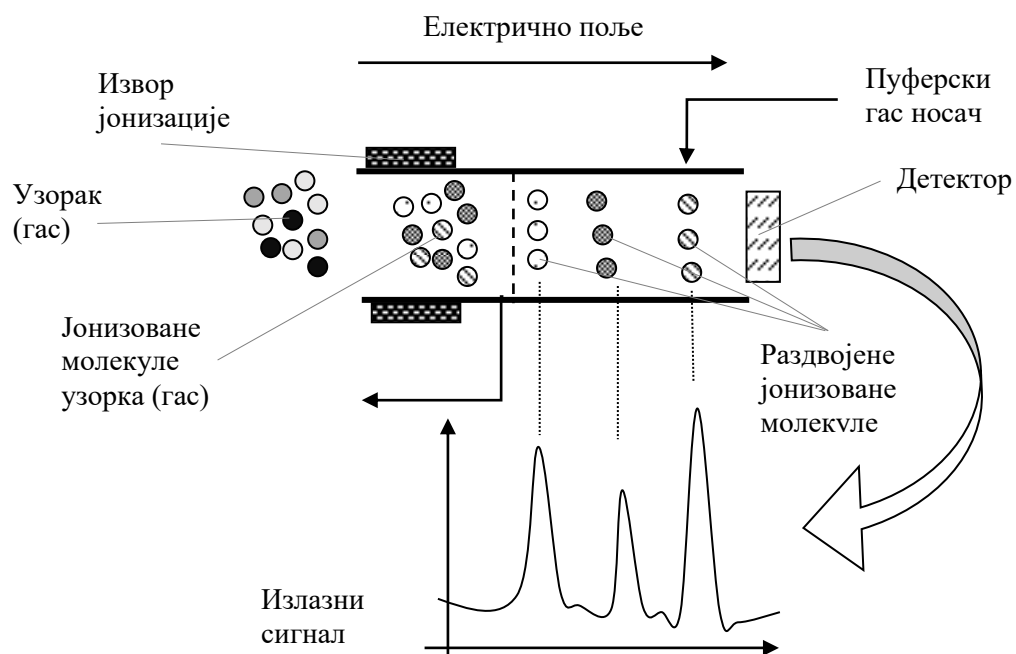
<i>енг. Glow discharge</i>	<i>енг. Spark source mass spectrometer (SSMS)</i>	јона <i>енг. Secondary ion mass spectrometry (SIMS)</i>
Десорпција поља <i>енг. Field desorption (FD)</i>	Ласерска десорпција/јонизација <i>енг. Matrix-assisted laser desorption/ionization (MALDI)</i>	Електроспреј јонизација <i>енг. Electrospray ionization (ESI)</i>
Термоспреј <i>енг. Thermospray</i>	Директна анализа у реалном времену <i>енг. Direct analysis in real time (DART)</i>	Термална јонизација <i>енг. Thermal ionization-thermal ionization mass spectrometry (TIMS)</i>
Фотојонизација <i>енг. Photoionization</i>	Десорпција/јонизација на силикону <i>енг. Desorption/ionization on silicon (DIOS)</i>	Електронска јонизација <i>енг. Electronic ionization (EI)</i>
Индуктивно повезана плазма <i>енг. Inductively coupled plasma (ICP)</i>	Десорпциона електроспреј јонизација <i>енг. Desorption electrospray ionization (DESI),</i>	

Различитим спектрометријским методама масене спектрометрије детектоване су веома ниске вриједности концентрације (лимити детекције) различитих експлозивних материја.

*Табела број 80. Лимити детекције за поједине експлозивне материје кориштењем различитих типова масене спектрометрије. [149]*

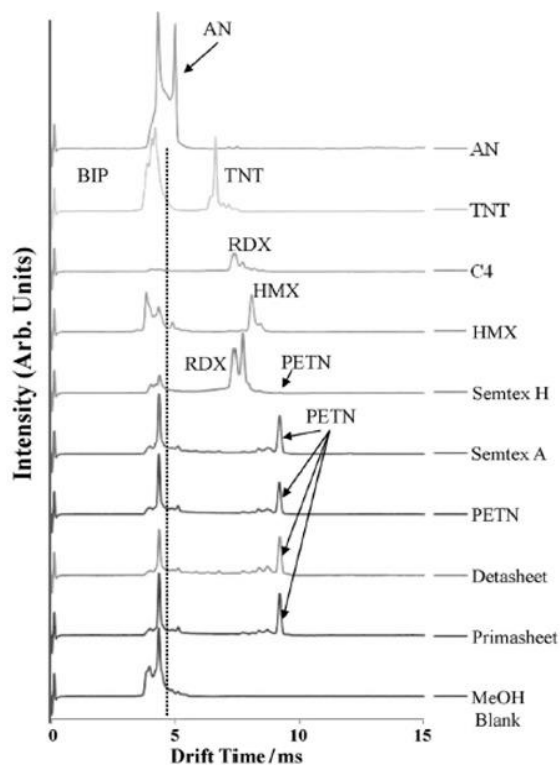
Техника	Експлозивна материја	Лимит детекције
Електроспреј јонизација	<i>HMX, RDX, PETN, Tetryl</i>	<i>170 fmol/μL</i>
Хемијска јонизација на атмосферском притиску	<i>TNT, PETN, RDX</i>	<i>5 fg, 250 pg, 5 ng</i>
Директна анализа у реалном времену	Нитроароматска једињења	<i>2 μg/ml</i>
Електроспреј јонизација/течна хроматографија	<i>RDX</i>	<i>2 x 10<sup>-8</sup> M</i>
Десорпциона електроспреј	<i>RDX</i>	<i>0,5 ng</i>

Јон покретна спектрометрија представља аналитичку технику засновану на раздвајању и идентификацији јонизираних молекула у гасној фази на основу мобилности у протуструјном току пуферског гаса носача.



Слика број 190. Шематски приказ јон-покретне спектрометрије

Резултати анализе помоћу јон-покретљиве спектрометрије су приказани спектрима при чему интензитет одзива испитиване супстанце зависи од времена кретања појединих јонских врста.



Слика број 191. Спектри јон-покретљиве спектрометрије за различите експлозивне материје [159]

Савременији уређаји су изведени у комбинацији јон-покретна спектрометрија – масена спектрометрија. У првом степену се врши одвајање јона на основу интеракције са пуферским гасом а затим у другом степену се врши анализа на основу омјера масе и наелектрисања.

Вриједности границе детекције експлозивних материја показују веома ниске вриједности (реда величине нанограма).

Табела број 81. Вриједности лимита детекције кориштењем јон покретљиве спектрометрије за различите експлозивне материје [159]

Експлозивна материја	Метода	Граница Детекције /ng/
TNT, RDX	IMS	10
PETN	IMS	50
RDX	IMS-MS	0,1
TNT	IMS-MS	10

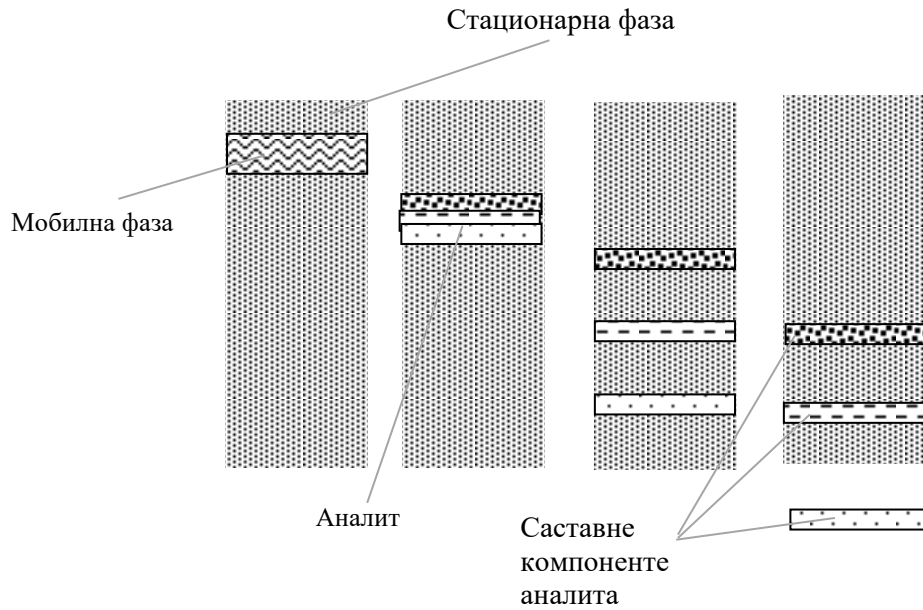
<i>PETN</i>	<i>IMS-MS</i>	0,5
<i>HMX</i>	<i>IMS-MS</i>	5
<i>DNT</i>	<i>IMS-MS</i>	10
<i>TNT</i>	<i>LIMS – laser ion mobility spectrometer</i>	1
<i>HMX</i>	<i>LIMS</i>	20
<i>RDX</i>	<i>IMS – positive mode</i>	1
<i>HMX</i>	<i>IMS – positive mode</i>	10
<i>PETN</i>	<i>IMS – positive mode</i>	40
<i>NTO</i>	<i>IMS – positive mode</i>	1000
<i>TNT</i>	<i>IMS – positive mode</i>	1000

*IMS* – јон-покретљива спектрометрија, *IMS-MS* – јон-покретљива спектрометрија / масена спектрометрија, *LIMS* – ласерска јон-покретна спектрометрија

У конструктивном смислу јон-мобилни спектрометри су оптимизовани у зависности од подручја примјене.

#### **6. 1. 4. Хроматографске методе**

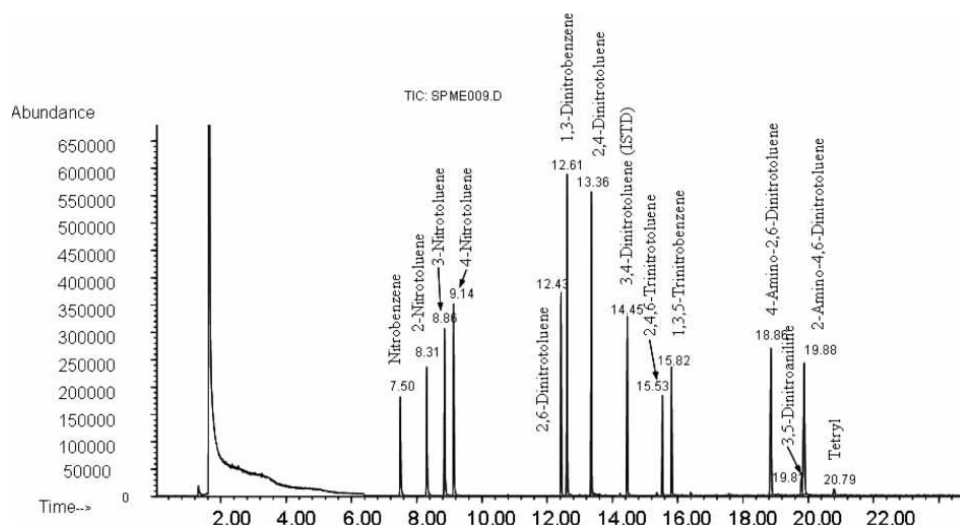
Хроматографија је физикална метода раздвајања у којој су компоненте које се одвајају распоређене између двије фазе, од којих је једна стационарна (стационарна фаза) док се друга (мобилна фаза) креће у одређеном смјеру. Мобилну фазу (течно или гасовито стање) чине аналит (супстанца која се раздваја, анализира) и носилац аналита. Стационарну фазу представља непокретна фаза преко које или кроз коју пролази мобилна фаза са улогом раздвајања аналита на саставне компоненте. Овом техником се врши раздвајање смјеше на компоненте (квалитативна анализа) на основу које се накнадно врши количинско одређивање (квантитатна анализа) (слика 192).



Слика број 192. Шематски приказ начина функционисања хроматографије

Постоји већи број метода хроматографије. Подјела се врши на основу физичког стања фаза, физичко-хемијских реакција које се дешавају приликом раздвајања компоненти или механизма раздвајања.

Резултати анализе помоћу хроматографских метода су представљени графичким приказом који се назива хроматограм (слика 193).



Слика број 193. Хроматограм за различите експлозивне материје [160]

Квантитативна анализа се проводи мјерењем површина хроматограмских пикова и упоређивање с одговарајућим стандардима.

Квалитативна анализа – непознати аналити могу бити идентификовани упоређивањем са ретенционим запреминама стандарда.

Имајући у виду да су хроматографске методе у првом реду сепарационе технике, веома често се користе у комбинацији са другим инструменталним методама као што је масена спектрометрија.

### **6. 1. 5. Електрохемијске методе**

Електрохемијске методе припадају групи електроаналитичких поступака у којима је сигнал побуде електрични напон док се сигнал одзива, електрична струја, мјери као функција наметнутог електричног напона. С обзиром на то да облик и временска зависност сигнала побуде могу бити различити, могу се разликовати волтаметрија са линеарном промјеном потенцијала и цикличка волтаметрија, пулсна волтаметрија, диференцијална пулсна волтаметрија, волтаметрија са правоуглим измјеничним сигналом побуде (енг. *square wave voltammetry*) и волтаметрија микрочестица (енг. *voltammetry of microparticles, VMPs*) [161].

Основни дио електрохемијског сензора представљају катода (негативно наелектрисана електрода), анода (позитивно наелектрисана електрода) и електролит (растворена испитивана материја у одговарајућем растварачу).

Одигравање електрохемијске реакције на радној електроди представља основу електроаналитичког мјерења. На основу електрохемијске редукције функционалних група, на радној електроди (катоди) се заснива детекција и идентификација нитроароматских експлозивних материја<sup>251</sup>.

---

<sup>251</sup> Карактеристичну вриједност представља електрични потенцијал на коме се одиграва редукција специфичне функционалне групе (уочава се појава струјног пика).

Имајући у виду да волтаметријске методе карактерише вањски сигнал побуде, радна електрода се може окарактерисати као амперометријска електрода. Такође, амперометријске електроде се могу сврстати у групу хемијских, односно, електрохемијских сензора који се темеље на електрохемијској реакцији анализата под утицајем вањске побуде при чему се врши мјерење излазног сигнала који представља јачина струје [162].

У досадашњим истраживањима примјењиване су различите врсте електродног материјала за израду радне електроде (катоде, електрохемијског сензора).

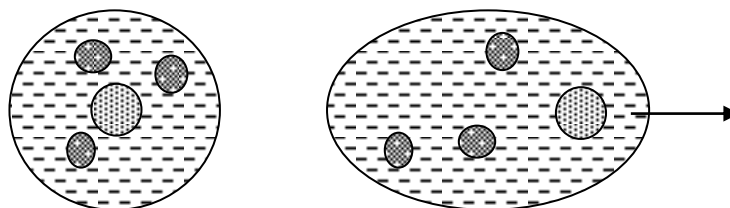
Електрохемијске методе карактеришу висока осјетљивост, широко подручје линеарног електрохемијског одговора у зависности од концентрације анализата, кратко вријеме одзива електрохемијског сензора, мобилност, комерцијална доступност и могућности вршења *in situ* испитивања [163].

#### 6. 1. 6. Остале методе

У групу осталих метода које се употребљавају за детекцију и идентификацију експлозивних материја сврставају се:

- електрофореза
- биосенсинг.

Електрофореза представља електрокинетички феномен који представља миграцију електрички набијених честица кроз раствор поузроковану дјеловањем електричног поља (слика 194). Метода електрофорезе помоћу позитивно набијених честица се назива катафореза док се употреба негативно набијених честица назива анафореза.



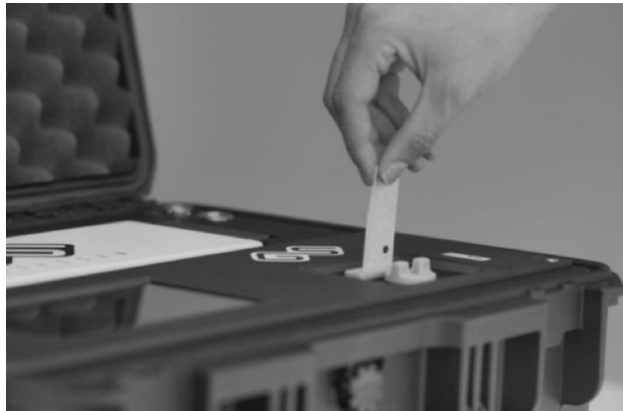
а)

б)

*Слика број 194. Електрофоретски ефекат: а) јон у стационарном стању; б) кретање јона.*

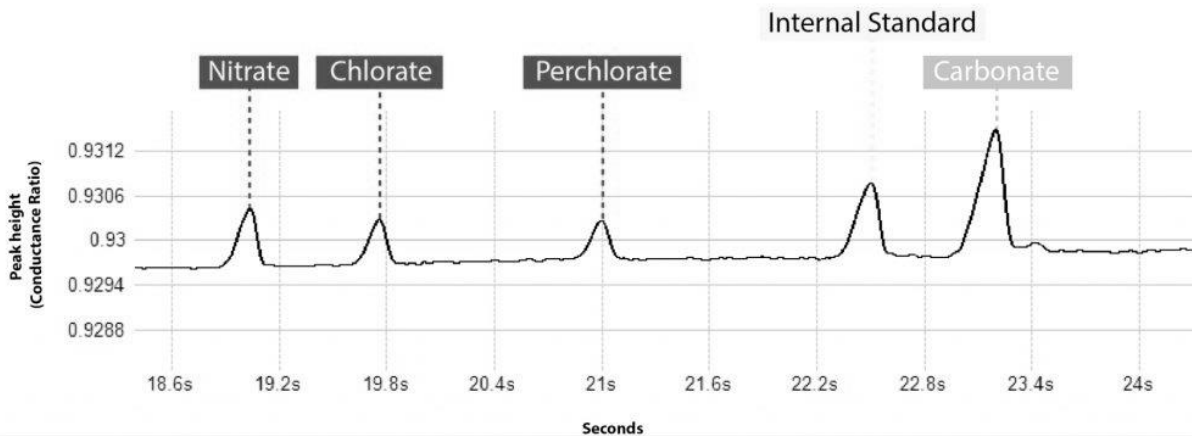
Приликом детекције и идентификације експлозивних материја, нарочито када се захтијева брза детекција на лицу мјеста с одговарајућим степеном тачности, као и претпоставкама да су присутне анорганске експлозивне материје (хлорати, нитрати), метода капиларне електрофорезе се показује као веома погодна метода [164].

Уређај за детекцију је преносив и веома једноставан за употребу. Техником узимања бриса са површине сумњивог предмета, испитивани узорак се поставља у отвор за узорке на уређају. Брис се аутоматски испере (елуира) са малом количином воде која раствара евентуално присутне анорганске материје. Евентуално присутне анорганске соли се раздвајају на позитивне наелектрисане катионе као што су натријум, амонијум и калијум и негативно наелектрисане анионе као што су нитрати, хлорати и перхлорати.



*Слика број 195. Постављање бриса узорка у отвор за узорке на уређају*

На дисплеју уређаја се приказује графички приказ тзв. електроферограм који се користи за идентификацију материје. Амплитуде на електроферограму испитиваног узорка се пореде са амплитудама инертних стандарда на основу чега се израчунава детектована концентрација.



Слика број 196. Електроферограм анорганских експлозива [164]

Досадашња истраживања су показала да се лимит детекције методом електрофорезе за поједине експлозиве налази на нивоу микрограма.

Биосенсинг представља детекцију циљних молекула на основу принципа које користе живи системи као што је имуни систем. Важни параметри биосенсинга су специфичност детекције и осјетљивост. Обиљежавање циљних молекула је уобичајена и неопходна метода да се обезбиједи специфичност.

Најважнији дио биосенсинга представља биосензор, аналитички уређај који може пружити специфичне квантитативне или полуквантитативне аналитичке информације кориштењем биолошког елемента препознавања који је у директном просторном контакту са претворним елементом. Чини га интегрисан биолошки елемент са физичко-хемијским претварачем који формира електрични сигнал пропорционалан анализираном аналиту који се затим преноси до детектора.

Класификација биосенсинга се може извршити на [165]:

- квалитативни биосенсинг
- квантитативни биосенсинг.

У квалитативни биосенсинг се сврставају:

- животиње, укључујући сисаре и инсекте, који имају много осјетљивије чуло мириса у односу на људска бића. Представљају осјетљиве и робусне биосензоре;
- електронски нос који се обично састоји од вјештачке неуронске мреже и низа хемијских сензора. Сваки хемијски сензор посједује различите карактеристике те може дати различити електрични или оптички сигнал за циљни мирис. Појединачни хемијски сензори су у интеракцији са циљаним мирисом на различите начине и интензитетом, производећи јединствене обрасце сигнала низа сензора. Процес препознавања образаца омогућава детекцију одређеног анализата. Аналити се идентификују помоћу вјештачке неуронске мреже;
- генетски модификовани микроорганизми представљају микроорганизме конструисане на молекуларном нивоу а који се употребљавају као биосензори за детекцију експлозивних материја. Микробиолошки биосензори укључују фузију промотора гена<sup>252</sup> (узроковану циљном молекулом) и репортерског гена<sup>253</sup> чији се производи могу детектовати путем активности или присуства. Промотор гена служи као јединица коју карактерише специфичност, а репортерска јединица (ген) одређује класу сигнала и представља његов аналитички инструмент.

У квантитативни биосенсинг се сврставају:

- имунолошки тест на бази антителијела<sup>254</sup>
- биотест на бази пептида који представља биохемијске тестове у којима се умјесто антителијела употребљавају пептиди<sup>255</sup>

---

<sup>252</sup> Промотор ген је секвенца *DNK* (дезоксирибонуклеинска киселина) за коју се везују протеини да би иницирали транскрипцију (процес копирања сегмента *DNK* у *RNK*) једног транскрипта *RNK* (рибонуклеинска киселина) из *DNK*.

<sup>253</sup> Репортерски ген је ген који се везују за регулаторну секвенцу (сегмент молекула нуклеинске киселине који је способан да повећа или смањи експресију (процес којим се информација из гена користи у синтези функционалног генског производа, а који му омогућава да произведе крајње производе), специфичних гена унутар организма другог гена од интереса за бактерије, ћелијску културу, животиње или биљке. Такви гени се називају репортерима јер се карактеристике које дају организмима који их експримирају лако идентификују и мјере, или зато што су маркери који се могу бирати.

<sup>254</sup> Антитијела су протеини у облику слова Y имуног система за неутрализацију и идентификацију страних материја. Везивањем антителијела за антиген, формира се имуни комплекс. Имуно тест је биохемијски тест који мјери присуство или концентрацију макромолекула или малог молекула у раствору употребом антителијела (претежно) или антигена (ријетко).

<sup>255</sup> Пептиди су кратки ланци аминокиселина дизајнирани према мјестима везивања антителијела, скрининг на специфичне секвенце, и синтетизовани хемијским методама, да имитирају специфична молекуларна препознавања између антигена и антителијела.

- биотест на бази аптамера<sup>256</sup>. Афинитет везивања аптамера за циљни молекул представља основу за провођење биотестова на бази аптамера за идентификацију експлозивних материја
- биотест на бази молекуларно утиснутих полимера<sup>257</sup> који показује високи ниво специфичности и селективности за идентификацију циљаних експлозивних молекула на основу тзв. ефекта кључ-брава.

## 7. ТЕРОРИЗАМ И ЕКСПЛОЗИВНЕ МАТЕРИЈЕ

Имајући у виду потенцијалне ефекте дејства експлозивних материја на људе и животну средину, познавање метода, техника и начина кориштења експлозивних материја приликом извршења различитих кривичних дјела, има веома велики значај са становишта њиховог спречавања и онемогућавања. Све присутнија појава тероризма и извођење терористичких активности употребом експлозивних материја додатно даје важност изучавања и познавања ове области.

Уопштено посматрано, тероризам представља вршење насиља према грађанима и званичним институцијама ради изазивања страха и изнуђивања политичких и социјалних промјена (циљева) [166]. Приликом извођења терористичких активности, веома често се користе различите експлозивне материје.

Најчешћи начини употребе експлозивних материја приликом извођења терористичких активности су:

- терористички напади помоћу директне употребе (употреба у моменту самог извођења напада)
- терористички напади помоћу подметнутих експлозивних направа (активирање направе у одређеном тренутку).

---

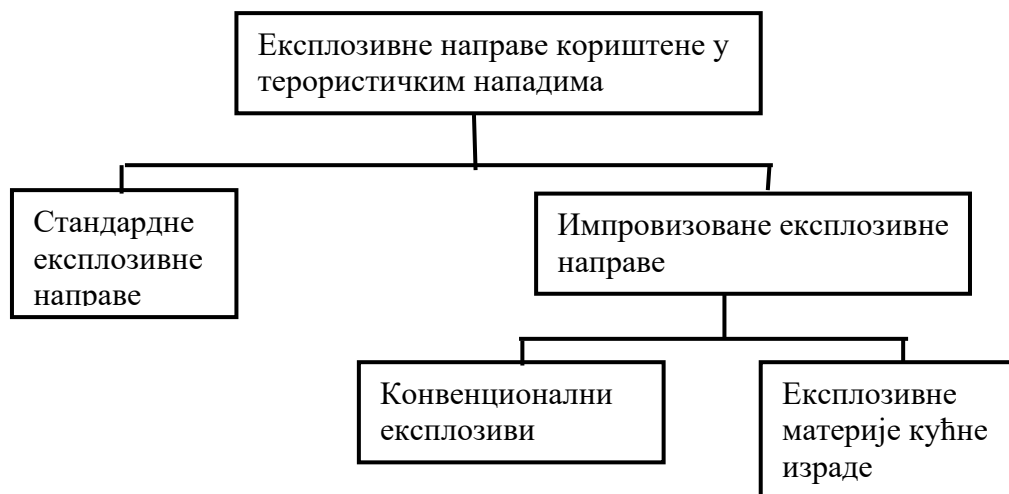
<sup>256</sup> Аптамери су кратке секвенце вјештачке DNK, RNK или пептида (једноланчани олигонуклеотидни молекули) које везују специфични циљни молекул или фамилију циљних молекула.

<sup>257</sup> Молекуларно утиснути полимерни материјали (МИП) су високоумрежени органски/неоргански кополимери у којима су шупљине (мјеста за препознавање) утиснуте за молекуле шаблона, било да су то експлозивни молекули било да су њихови неексплозивни структурни аналози, као лажни шаблони.

при чему се употребљавају тзв. стандардне експлозивне направе намијењене за војну употребу (бомбе, гранате, мине и слично) и импровизоване експлозивне направе (енг. *improvised explosive devices, IED*) које садрже конвенционалне експлозивне материје (*TNT, RDX, HMX, TATP*) и експлозивне материје ручне израде (енг. *homemade explosives, HME*).

Директна употреба подразумијева кориштење конвенционалних експлозивних направа у моменту самог напада (бацање бомбе, испаливање ракетних пројектила, самоубилачки напади – бомбаши самоубице и слично).

Подметнуте експлозивне направе подразумијевају експлозивне направе различите конструкције које се активирају након одређеног времена у зависности од начина иницирања.



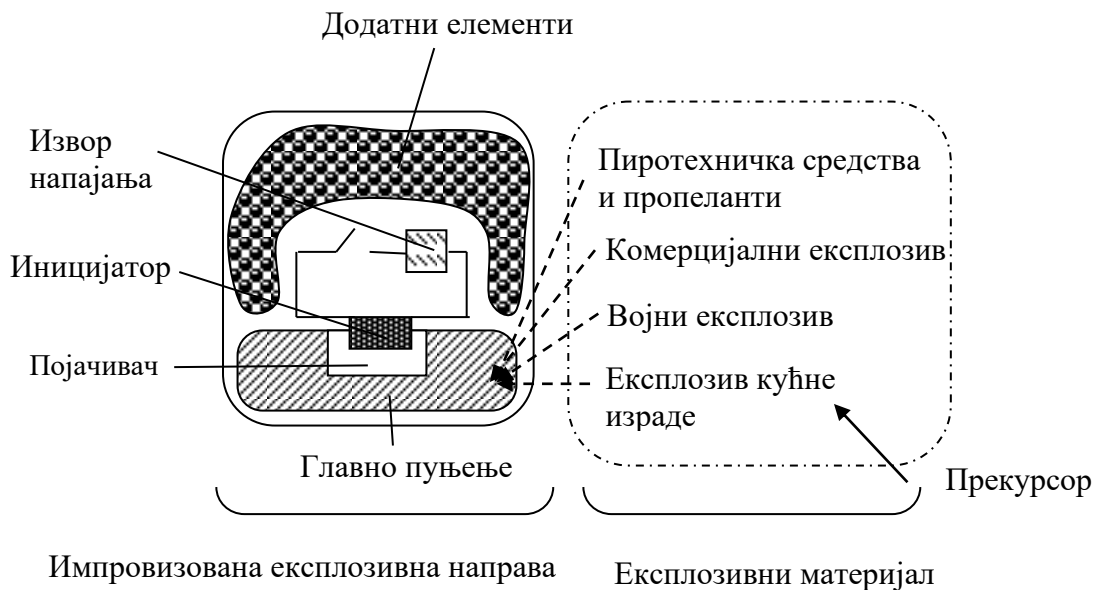
Слика број 197. Експлозивне направе кориштене у терористичким нападима

Стандардне експлозивне направе које се користе за извођење терористичких активности су различите врсте и типови минско-експлозивних средстава намијењених за војну употребу (мине и слично). Експлозивно пуњење представљају конвенционални секундарни експлозиви као што су *TNT, RDX, HMX, C4*.



Слика број 198. Конвенционална минско-експлозивна средства

Импровизоване експлозивне направе представљају експлозивне направе конструисане на импровизовани начин са циљем уништења, разарања и наношења повреда. Садрже разарајуће, смртоносне, штетне, пиротехничке или запаљиве хемикалије. Могу да садрже конвенционалне експлозивне материје и експлозивне материје тзв. ручне израде, као и њихову комбинацију.



Слика број 199. Шематски приказ конструкције импровизоване експлозивне направе

Конвенционалне експлозивне материје представљају различити цивилни и војни експлозиви (описани у претходним поглављима).

Експлозивне материје ручне израде представљају експлозивне материје произведене од хемијских прекурсора<sup>258</sup> путем физичког мијешања или хемијске реакције. На основу

<sup>258</sup> Прекурсор је било која хемијска супстанца која учествује, независно од методе, у било којој фази производње

анализе кориштених хемикалија за израду експлозива кућне израде извршена је њихова класификација [167].

Табела број 82. Класификација прекурсора

Група А	Група Б	Група В
Алуминијум	Калцијум-нитрат	Амонијум-перхлорат
Амонијум-нитрат	Хлороводонична киселина	Антимон-трисулфид
Калцијум-амонијум-нитрат	Калијум-нитрат	Хексамин
Водик-пероксид	Калијум-перманганат	Магналијум <sup>259</sup>
Азотна киселина	Натријум-нитрат	Магнезијум
Нитрометан	Натријум-нитрит	Пентаеритритол
Калијум-хлорат	Сумпор	Фенол
Калијум-перхлорат	Сумпорна киселина	Калијум-нитрит
Натријум-хлорат	Уреа	
Уреа-амонијум-нитрат раствор	Цинк	

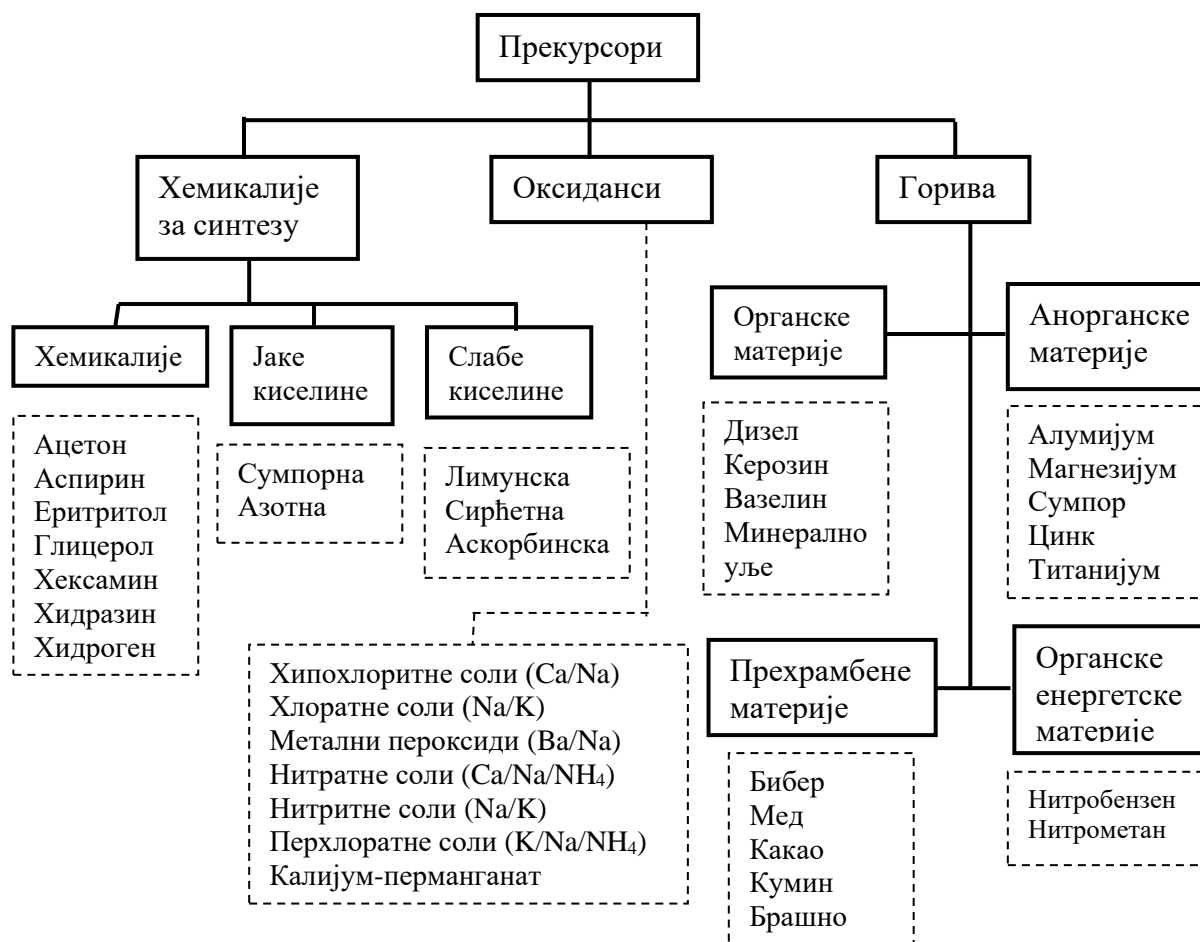
Класификација прекурсора – хемикалија је извршена на основу три критеријума:

- да ли се прекурсорска хемикалија може користити за израду импровизоване експлозивне направе коју особа носи или чува, било вољно или невољно
- да ли је прекурсорска хемикалија кориштена у претходним терористичким нападима
- да ли се хемикалија може користити за израду експлозива кућне израде независно од потребе за другом специфичном хемикалијом.

У групу А су сврстане хемикалије које су задовољиле сва три претходно наведена услова. У групи Б се налазе хемикалије које су испуниле минимално два услова док групу В сачињавају хемикалије које су испуниле један услов.

Класификација прекурсора се може извршити на основу функционалности.

<sup>259</sup> Легура алуминијума 5% и магнезијума 95%.



Слика број 200. Класификација прекурсора на основу функционалне улоге [167]

Уопштено импровизоване експлозивне направе су конструисане из основних функционалних елемената:

- прекидач (активатор)
- извор напајања
- иницијатор/упаљач
- spremник (тијело)
- набој/главно пуњење (експлозив).

Прекидач представља елемент путем којег се обезбјеђује вањски импулс ради иницирања импровизоване експлозивне направе. С обзиром на то да је већина

кориштених упаљача (иницијатора) електричног типа, неопходно је обезбиједити извор напајања. Иницирањем упаљача врши се покретање игниферног/дисруптивног експлозивног воза (поглавље 5. 1).

Подјела импровизованих експлозивних направа се може извршити на више начина у зависности од примијењеног критерија:

- у односу на врсту набоја (главног пуњења)
- у односу на начин активирања и кориштења.

### **7. 1. Врсте набоја (главног пуњења)**

Основна подјела је извршена на импровизоване експлозивне направе и импровизоване нуклеарне направе (енг. *improvised nuclear device, IND*)<sup>260</sup>. Подјела према врсти набоја импровизованих експлозивних направа се врши на:

- експлозивно пуњење
- експлозивно формирани пенетратор
- директно фокусирано пуњење
- хемијско пуњење
- биолошко пуњење
- запаљиво пуњење
- радиолошко пуњење
- нуклеарно пуњење.

Експлозивно пуњење подразумијева употребу хемијских материја (експлозива) која изазивају разарање, рушење и наношење повреда људима (слика 201).

---

<sup>260</sup> Импровизована нуклеарна направа представља теоријско недозвољено нуклеарно оружје купљено, украдено или на други начин отуђено које потиче из нуклеарне државе, или оружје које је терористичка група произвела од илегално добијеног материјала који продукује експлозију. ИНД се може купити или може бити направљен од компонената украденог оружја или употребом нуклеарног материјала (плутонијум, уранијум или високообогаћени уранијум). Успјешна детонација резултирала би катастрофалним губицима живота, уништењем инфраструктуре и нуклеарном контаминацијом врло великог подручја.



*Слика број 201. Импровизирана експлозивна направа [168]*

Ради извођења напада на блиндирана моторна возила, користе се импровизоване експлозивне направе које функционишу на принципу Мисрај-Шардиновог ефекта које се називају експлозивно формирану пенетратори. Иницирање се може вршити даљински управљаним системима.



*Слика број 202. Импровизирана експлозивна направа са експлозивно формирану пенетратором [169]*

Сличну изведбу посједују директно фокусирана пуњења која обично садрже велики број различитих металних предмета (ексери, вијци и слично) при чему затварајућа плоча има раван облик (код експлозивно формирајућих пенетратора затварајућа плоча има конкаван (удубљен) облик.

Направа са хемијским пуњењем садржи токсичне хемијске материје које путем расипања ових токсичних хемијских материја доводи до стварања примарног патофизиолошког токсичног ефекта (морбидитет и смртност) или секундарног психолошког ефекта (изазивајући промјену страха и понашања) на већу популацију. Направе са биолошким пуњењем су сличне хемијском пуњењу при чему се користе биолошки агенси.

Запаљиво пуњење се користи за брзо ширење пламена (ватре). Једна од најчешћих импровизованих експлозивних направа са запаљивим пуњењем је тзв. Молотовљев коктел<sup>261</sup>.

Претпостављено радиолошко пуњење садржи радиоактивне материјале које се распршује на одређеном простору. Импровизирана експлозивна направа са радиолошким пуњењем се назива и направом за радиолошку дисперзију или „прљавом бомбом”.

## 7. 2. Начин активирања и кориштења

Класификација импровизованих експлозивних направа коју су усвојиле Уједињене нације [170] у односу на начин кориштења и активирања се врши на:

Табела број 83. Класификација импровизованих експлозивних направа

Назив	Опис
ИЕД ваздушно ношена (енг. <i>Air Borne IED, ABIED</i> )	ИЕД која се налази у ваздухопловним саобраћајним средствима
ИЕД ношена помоћу животиња (енг. <i>Animal Borne IED</i> )	ИЕД се користи помоћу животиња
ИЕД управљана жичаном везом (енг. <i>Command Wire IED, CWIED</i> )	ИЕД који има прекидач на месту активирања. Прекидач и контактна тачка су одвојени и спојени жичаном везом

<sup>261</sup> Стаклена флаша напуњена бензином са комадом платна који је једним крајем потопљен у бензин а други дио вири из флаше. Након запаљења краја платна које вири изван, флаша се баца и приликом пада разбија а расути бензин се запали.

ИЕД ношена особом (енг. <i>Person Borne IED, PBIED</i> )	ИЕД који особа носи, носила или чува, вољно или невољно
ИЕД радио контролисана (енг. <i>Radio Controlled IED, RCIED</i> )	ИЕД са прекидачем који се покреће електронским бежичним путем а који се састоји од система предајник/пријемник
Радиолошки дисперзивна направа (енг. <i>Radiological Dispersal Device, RDD</i> )	Импровизовани склоп или процес дизајниран за ширење радиоактивног материјала („прљава бомба”)
ИЕД на возилу (енг. <i>Vehicle Borne IED, VBIED</i> )	ИЕД која се налази у копненим саобраћајним средствима
ИЕД руковођена жртвом (енг. <i>Victim Operated IED, VOIED</i> )	ИЕД са прекидачем који се активира након контакта са жртвом, односно, облик дјеловања који ће довести до тога да се направа активира.
ИЕД ношена водом (енг. <i>Water Borne IED, WBIED</i> )	ИЕД која се налази у воденим саобраћајним средствима

ИЕД – импровизирана експлозивна направа

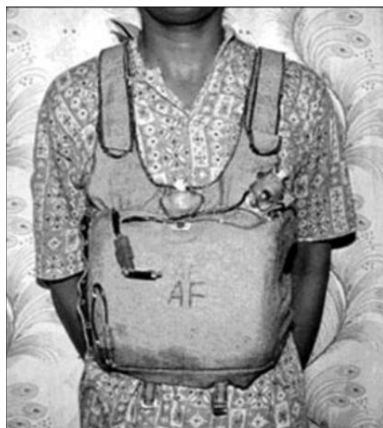
У групу ИЕД носених ваздушним путем се сврставају ИЕД постављене унутар/на различитим ваздухопловним летјелицама. У скоријем временском периоду развој као и комерцијална приступачност омогућила је потенцијалну примјену дрона<sup>262</sup> за транспорт и вршење напада помоћу импровизованих експлозивних направа.

ИЕД ношена помоћу животиња карактерише извођење терористичких напада помоћу појединих врста домаћих животиња користећи појаву кретања према устаљеном правцу.

Активирање жичаном везом се врши путем жица које су спојене на извор напајања и активирајући елемент (детонатор).

<sup>262</sup> Беспилотна летјелица (БПЛ; енгл. *unmanned aerial vehicle, UAV*) или популарно дрон (енгл. *drone* – трут) је ваздухоплов којим управља навигатор, пилот са даљинским преносом сигнала са земље или који лети аутономно по задатим запамћеним подацима. БПЛ се користе у цивилне и војне сврхе.

Најчешће ИЕД ношене особом се односи на самоубилачке терористичке нападе. Ова врста терористичких напада се односи на терористичке активности приликом којих и сам извршилац губи живот у току извођења напада. Најчешће се изводе активирањем експлозивних материја које се налазе на тијелу извршиоца (слика 203) у виду прслука.



*Слика број 203. Експлозивни прслук који користи бомбаш самоубица [171]*

ИЕД радио контролисане представљају направе које се активирају помоћу радио-везе. Одашиљач емитује радио-сигнал (одговарајући електромагнетни талас) који омогућава у пријемнику настанак одговарајућег импулса за покретање експлозије. На сличан начин функционише и активирање мобилним телефоном који је модификован и повезан у електрично коло за активирање експлозива.

Радиолошка дисперзивна направа или „прљава бомба” је направа која комбинује радиоактивни материјал са конвенционалним експлозивима. Сврха је да контаминира простор око конвенционалне експлозије радиоактивним материјалом. Уопштено, прљава бомба је конструисана на начин да се око одређене количине конвенционалног експлозива постави одређена количина радиоактивног материјала који се усљед детонације експлозива распрши на одређену удаљеност од центра експлозије.

Кориштење моторних возила различитих типова у којима се налази смјештено главно експлозивно пуњење се назива тзв. ауто-бомба. У зависности од типа возила, смијештају се различите количине експлозивних материја.

*Табела број 84. Максимална количина експлозивне материје у зависности од типа моторног возила [171]*

Тип моторног возила	Максимални капацитет експлозива	Пречник леталне зоне	Минимална евакуациона удаљеност	Опасност од поломљеног стакла
	227 kg	30 m	457 m	381 m
	455 kg	38 m	534 m	534 m
	1818 kg	61 m	838 m	838 m
	4545 kg	91 m	1143 m	1143 m
	13636 kg	137 m	1982 m	1982 m
	27273 kg	183 m	2134 m	2134 m

Импровизоване експлозивне напаве које се активирају приликом контакта са жртвом још се називају клопке. Напаве се могу активирати гласовним путем, притиском, ослобађањем или притискивањем опруге, помјерањем, савијањем или неким другим покретом који врши помјерање одређеног предмета или дијела предмета. У групу активирања на овакав начин се убрајају и импровизоване експлозивне напаве постављене у аутомобиле, импровизоване нагазне мине и поштанске бомбе.

ИЕД ношене водом представљају ИЕД постављене на различите пловне објекте који могу бити даљински управљани [172].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Grant, R. G. *Battle: a Visual Journey Through 5000 Years of Combat*. London: Dorling Kindersley. 2005.
- [2] Radman-Livaja I., Rimska streljačka oprema nađena na Gardunu kod Trilja. *Opvsc. Archaeol.* 1998. 22, pp. 219–231.
- [3] Јерemiћ, Р. *Експлозије и експлозиви*. Београд : Војноиздавачки завод. 2007.
- [4] Crosby, Alfred W. *Throwing Fire: Projectile Technology Through History*. Cambridge: University Press. 2002.
- [5] Pryor John H. & Jeffreys Elizabeth M. *The Age of the ΔΡΟΜΩΝ: The Byzantine Navy ca. 500–1204*. Boston: Brill Academic Publishers. 2006.
- [6] Partington James R. *A History of Greek Fire and Gunpowder*. Baltimor: Johns Hopkins University Press. 1999.
- [7] Akhavan, J. *The Chemistry of Explosives*. 3rd Edition. Cambridge: Royal Society of Chemistry. 2011.
- [8] Andrade, T. *The Gunpowder Age: China, Military Innovation, and the Rise of the West in World History*. Princenton: Princeton University Press. 2016.
- [9] Chase, K. *Firearms: A Global History to 1700*. Cambridge: Cambridge University Press. 2003.
- [10] Kelly, J. *Gunpowder: Alchemy, Bombards & Pyrotechnics: The History of the Explosive that Changed the World*. New York: Basic Books, Perseus Books Group. 2004.
- [11] Khan, Iqtidar A. *Gunpowder and Firearms: Warfare in Medieval India*. Oxford: Oxford University Press. 2004.
- [12] Carey, P. ed. *Babad Dipanagara: A Surakarta Court Poet's Account of the Outbreak of the Java War (1825-30)*. 2nd ed. Vol. 9. Singapore: Malaysian Branch of the Royal Asiatic Society. 2019.
- [13] Jai Prakash Agrawal. *High Energy Materials Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. 2010.
- [14] Coburn M. D. & Jackson T. E. Picrylamino-Substituted Heterocycles. III. 1,2,4-Triazoles. *J. Heterocycl. Chem.* 1968. 5 (2), pp. 199–203.
- [15] Coburn M. D. 2,6-Bis(picrylamino)-3,5-dinitropyridine and a Method for its Preparation. *Chem. Abstr.* 1972. 77, 139812z.

- [16] Neilsen A. T. et al. Polyazapolycyclics by condensation of aldehydes with amines. 2. Formation of 2,4,6,8,10,12-hexabenzyl-2,4,6,8,10,12-hexaazatetracyclo [5.5.0.05.9.03,11] dodecanes from glyoxal and benzylamines. *J. Org. Chem.* 1990. 55 , pp. 1459–1466.
- [17] Chaban Vitaly V. et al. Buckybomb: Reactive Molecular Dynamics Simulation. *Journal of Physical Chemistry Letters*. 2015. 6 (5), pp. 913–917.
- [18] Vujaklija, M. Leksikon stranih reči i izraza Beograd: Prosveta. 1980.
- [19] Venugopalan S. Demystifying Explosives: Concepts in High Energy Materials. Amsterdam: Elsevier. 2015.
- [20] Klapötke Thomas M. Chemistry of High-Energy Materials 3rd ed. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH. 2015.
- [21] Максимовић П. Технологија експлозивних материја. Београд: ВИЗ. 1972.
- [22] Božić B., Lukić I. & Petrović N. (2014). Eksplozivi u terorističkim napadima. 2014. DOI:10.13140/2.1.4078.4167.
- [23] Abolfazl Khalkhali & Gholamhossein Liaghat. Explosive welding of unequal surface using Groove Method. Transactions- Canadian Society for Mechanical Engineering. 2012. 36 (2), pp. 113–125
- [24] Savić M. Miniranje na površinskim kopovima. Bor: Institut za Bakar. 2000.
- [25] Bement L. J. (1970). Application of temperature resistant explosives to NASA missions. Proc. Symp. on Thermally Stable Explosives. Whiteoak: Naval Ordnance Laboratory. 1970 .
- [26] Urbanski T. Chemistry and Technology of Explosives, vol 4. Oxford, UK: Pergamon Press. 1984. p. 206.
- [27] Agrawal J. P. Some new high energy materials and their formulations for specialized applications. Prop. Explos. Pyrotech. 2005. 30 (5), 316–328.
- [28] Huynh M. H. V. et al. Green Primaries: Environmentally Friendly Energetic Complexes. *Proc. National Academy of Science of the USA*. 2006. 103 (14), 5409–5412.
- [29] Jesse J. Sabatini & Karl D. Oyler. Recent Advances in the Synthesis of High Explosive Materials. *Crystals*. 2016. 6 (5), doi:10.3390/cryst6010005
- [30] Ilyshin M. A., Tselinsky I. V. & Shugalei I. V. Environmentally Friendly Energetic Materials for Initiation Devices. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2012. 9 (4), 293–327.
- [31] Qu Y. & Babailov S. P. Azo-linked high-nitrogen energetic materials. *J. Mater. Chem. A*. 2018. 6, pp. 1915–1940.
- [32] Yuehai Yu., et al. Study on a novel high energetic and insensitive munitions formulation: TKX-50 based melt cast high explosive. *RSC Adv*. 2017. 7, pp. 31485.

- [33] Fischer N. et al. Pushing the Limits of Energetic Materials - The synthesis and characterization of dihydroxylammonium 5,5'-bistetrazole-1,1'-diolate. *J. Mater. Chem.* 2012. 22, pp. 20418–20422.
- [34] Lease N., et al. Increased handling sensitivity of molten erythritol tetranitrate (ETN). *Journal of Hazardous Materials.* 2019. 367, pp. 546–549.
- [35] Shijie Zhang et al. Recent Advances in Synthesis and Properties of Nitrated-Pyrazoles Based Energetic Compounds. *Molecules.* 2020. 25, pp. 3475.
- [36] DeHope A., et al. Synthesis and Small-scale Performance Characterization of New Insensitive Energetic Compounds, LLNL-CONF-669680. Rome, Italy 2015.
- [37] Sikder A. K., et al. Synthesis, Characterization and Thermal Behaviour of 2,4,6,8-Tetranitro-2,4,6,8 Tetraazabicyclo[3.3.1]Nonane-3,7-Dione (TNPDU) and one of its Methylene Analogues. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics.* 2001. 26, pp. 63–68.
- [38] Agrawal J. P. & Dodke V. S. Validation of approaches (introduction of conjugation & condensation with triazole ring/s) for imparting/improving thermal stability of explosives, Part II. *FirePhysChem.* 2023. 3 (1), pp. 1–10.
- [39] Agrawal J. P. Past, Present & Future of Thermally Stable Explosives, *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 2012. 9, pp. 273–290.
- [40] Kazem-Rostami M. Factors Influencing the Thermal Stability of Azo and Bisazo Compounds, *J. Therm. Anal. Calorim.* 2020. 140, pp. 613–623.
- [41] Ning Liu et al. Comparative study on thermal behavior of three highly thermostable energetic materials: z-TACOT, PYX, and TNBP. *FirePhysChem.* 2021. 1, pp. 61–69.
- [42] Gutowski Ł. & Cudziło S. Synthesis and properties of novel nitro-based thermally stable energetic compounds. *Defence Technology* 2021. 17, pp. 775–784.
- [43] Son S. F., Yetter R. & Yang V. Introduction: nanoscale composite energetic materials. *J Propul Power.* 2007. 23 (4), pp. 643–644.
- [44] Jie LIU et al. Study of nano-nitramine explosives: preparation, sensitivity and application. *Defence Technology.* 2014. 10, pp. 184–189.
- [45] Shantanu Bhattacharya et al. *Nano-Energetic Materials.* Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019.
- [46] Liu, K. et al. Research progress of cocrystal energetic materials. *Chemical Analysis and Meterage.* 2014. 23 (5), pp. 139–142.
- [47] Etter M. C. & Frankenbach G. M. Hydrogen-bond directed cocrystallization as a tool for designing acentric organic solids. *Chem. Mater.* 1989. 1(1), pp. 10–12.

- [48] Jin P. et al. Preparation and Characterization of a Novel Cocrystal Explosive. *Cryst. Growth Des.* 2011. 11, pp. 1759–1765.
- [49] Braga, D., Maini, L. & Grepioni, F. Mechanochemical preparation of co-crystals. *Chem. Soc. Rev.* 2013. 42, pp. 7638–7648.
- [50] Braga D. et al. Crystal Polymorphism and Multiple Crystal Forms. In Hosseini, M. W. (eds). *Molecular Networks. Structure and Bonding*. Berlin : Springer. 2009.
- [51] Gilli, G., Gilli, P. *Supramolecular Chemistry: From Molecules to Nanomaterials*. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.
- [52] Мићин С. Кокристални експлозивни – експлозивни побољшаних карактеристика. *Journal of engineering and processing management*. 2017. 9 (1), pp. 100–115.
- [53] Feng R. Z. et al. Theoretical insight into the binding energy and detonation performance of  $\epsilon$ -,  $\gamma$ -,  $\beta$ -CL-20 cocrystals with  $\beta$ -HMX, FOX-7, and DMF in different molar ratios, as well as electrostatic potential. *Journal of Molecular Modeling*. 2016. 22 (6), article number 123.
- [54] Jiang G. R. & Liu Z. T. *Initiating Explosive*. Beijing: Ordnance Industry Press. 2006.
- [55] An C. et al. Nano-CL-20/HMX Cocrystal Explosive for Significantly Reduced Mechanical Sensitivity. *Journal of Nanomaterials*. 2017. 2017 (5), pp. 1–7.
- [56] Liu G. Et al. Experimental Study of Fuel–Air Explosive. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2008. 44 (2), pp. 213–217.
- [57] Appa Rao A. Fuel Air Explosives. *Def. Sci. J.* 1987. 37 (1), pp. 23–28.
- [58] Lavoie L. Fuel Air Explosives, Weapons and Effects. *Military Technology*. 1989. 9, pp. 64–70.
- [59] JSP 333, Services Textbook of Explosives, Chapter 11, UK MOD, (Amendment 6). Technical Note 09.30 /04 Version 1.0 Fuel Air Explosive (FAE). Systems Geneva: International Mine Action Standards. 1990. Доступно на: [https://www.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/documents/standards/TN\\_09.30\\_04\\_20\\_01\\_FAE\\_V.10\\_Amd\\_1\\_01.pdf](https://www.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/documents/standards/TN_09.30_04_20_01_FAE_V.10_Amd_1_01.pdf) [3. 5. 2023]
- [60] Dearden P. New Blast Weapons. *J. R. Army Med. Corps*. 2001. 147, pp. 80–86.
- [61] Türker L. Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX). *Defence Technology*. 2016. 12, pp. 423–445.
- [62] Trzciniński W. A. & Maiz L. Thermobaric and Enhanced Blast Explosives – Properties and Testing Methods. *Propellants Explos. Pyrotech.* 2010. 35, pp. 1–14.
- [63] Симић Д. Научно-техничке информације: Ливени термобарични РВХ експлозивни, Београд: Војнотехнички институт 2016.

- [64] Maiz L. & Trzcin'ski W. A. *Detonation and combustion of new heterogeneous composite explosives containing aluminum particles*. XIth International armament conference on scientific aspects of armament and safety technology Conference Paper. 2016.
- [65] Maiz L. & Trzcin'ski W. A. A Method to Investigate the Confined Explosion of Thermobaric and Enhanced Blast Explosives. *American Journal of Engineering Research*. 2018. 7 (4), pp. 139–147.
- [66] Piercey D. G. & Klapötke T. M., Nanoscale Aluminum - Metal Oxide (Thermite) Reactions for Application in Energetic Materials. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2010. 7 (2), pp. 115–129.
- [67] Clements B. E. & Mas E. M. A theory for plastic-bonded materials with a bimodal size distribution of filler particles. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 2004. 12, pp. 407–421.
- [68] Skidmore, C. B. et al. The evolution of microstructural changes in pressed HMX explosives. In *Proceedings of the 11th Detonation Symposium*, Snowmass Village, CO, USA. 1998. [Google Scholar].
- [69] Los Alamos National Laboratory Hazardous and Solid Waste Group (ESH-19). Part B Permit Application Technical Area 36 Open Detonation Unit. LANL TA-36 Part B. Los Alamos: Department of Energy, Albuquerque Operations Office. 1999. Доступно на: <https://web.archive.org/web/20221001143545/https://hwbdocuments.env.nm.gov/Los%20Alamos%20National%20Labs/TA%2036/2351.pdf> [3. 5. 2023].
- [70] Zong-Xian Zhang. *Rock Fracture and Blasting Theory and Applications*. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier. 2016.
- [71] Akhavan J. *The Chemistry of Explosives* 3rd Edition. Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge CB4 0WF, UK: The Royal Society of Chemistry, 2011.
- [72] Meyers C. J. & Kosowski, B. M. DMAZ: a replacement of hydrazine derivatives in hypergolic fuel applications. *Proc. 34th Intl Ann. Conf. ICT*. Karlsruhe, Germany. 2003. pp. 177/1–177/4.
- [73] Cruice W. J. Report No. ARBRL-CR – 00454. ( 1981 ) *Classification of Liquid Gun Propellants and Raw Materials for Transportation and Storage*. Aberdeen Proving Ground : U. S. Army Research Laboratory, MD. 1981.
- [74] Klein, N. TECHNICAL REPORT BRL-TR-2641. *Liquid propellants for use in guns-a review*. Aberdeen Proving Ground : US Army Ballistic Research Laboratory ATTN: ALMR-IBD, MD. 1985. 21005–5066.

- [75] Doherty R. M. Novel Energetic Materials for Emerging Needs. *9th-IWCP on Novel Energetic Materials and Applications*. Lerici (Pisa), Italy. 2003.
- [76] Venugopalan S. *Demystifying Explosives: Concepts in High Energy Materials* Amsterdam : Elsevier. 2015.
- [77] Mishra I. B., Vande - Kieft L. J. & Lawrence J. Insensitive binder for propellants and explosives. *Chem. Abstr.* 1990. 113, pp. 121716c.
- [78] Biddle R. A. & Willer R. L. Thermoplastic elastomer based LOVA gun propellants. *Chem. Abstr.* 1990. 112, pp. 237797j.
- [79] Choudhari M. K., Asthana S. N. & Singh H. Studies on high energy LOVA compositions. *Proc. 24th Intl Ann. Conf. ICT*. Karlsruhe, Germany. 1993, pp. 61/1–61/9.
- [80] Trache D. & Fouzi Tarchoun A. Stabilizers for nitrate ester-based energetic materials and their mechanism of action: a state-of-the-art review. *J. Mater Sci.* 2018. 53, pp. 100–123.
- [81] Kudryavtsev P. Production technology development and creation of production of additives used in solid rocket propellants. *Journal „Scientific Israel – Technological Advantages”*. 2014. 16 (3), pp. 25–37.
- [82] Mason B. P. & Roland C. M. Solid propellants. *Rubber chemistry and technology*. 2019. 92 (1), pp. 1–24.
- [83] Bozic V. et al. Composite Rocket Propellants Based on Thermoplastic Elastomer Binders. *In Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Conference*. The Korean Society of Propulsion Engineers. 2010. pp. 199–204.
- [84] Lysien K.; Stolarczyk, A.; Jarosz, T. Solid Propellant Formulations: A Review of Recent Progress and Utilized Components. *Materials* 2021, 14, 6657. <https://doi.org/10.3390/ma14216657>.
- [85] Yogeshkumar V., Nikunj Rathi & Ramakrishna P. A. Solid Fuel-rich Propellant Development for use in a Ramjet to Propel an Artillery Shell. *Defence Science Journal*. 2020. 70 (3), pp. 329–335.
- [86] Rahimi S. & Natan B. The status of gel propellants in year 2000. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 2001. 5 (1–6), pp. 172–194.
- [87] Aggarwal R. et. al. A comprehensive study on gelled propellants. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. 4 (9), pp. 286–290.
- [88] US Army Material Command. *Engineering Design Handbook: Military Pyrotechnics Series, Part One – Theory and Application*. Washington DC, USA: US Army Material Command Headquarters. 1967.

- [89] United Nations. *Manual of Tests and Criteria* Seventh revised edition ST/SG/AC.10/11/Rev.7 New York and Geneva : United Nations. 2019.
- [90] Fedorff B. T. & Sheffield O. E. *Encyclopedia of explosives and related item*. New Jersey: U. S. Army research and development command TACOM, Ardec warheads, energetics and combat support center Picatinny arsenal. 1974.
- [91] Elbeiha A., Abd-Elghanya M. & Elshenawy T. Application of vacuum stability test to determine thermal decomposition kinetics of nitramines bonded by polyurethane matrix. *Acta Astronautica*. 2017. 132, pp. 124–130.
- [92] Department of defense armed forces support center. *MIL-STD-650 (notice 6), military standard: explosive; sampling, inspection and testing*. Washington 25, D. C : Department of defense armed forces support center. 1996.
- [93] Rui Liua et. al. Dynamic vacuum stability test method and investigation on vacuum thermal decomposition of HMX and CL-20. *Thermochimica Acta*. 2012. 537, pp. 13–19.
- [94] Zeman, S. & JungovÃ M. Sensitivity and performance of energetic materials. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2016. 41 (3), pp. 426–451.
- [95] Smirnov A. et. al. Impact and friction Sensitivity of energetic materials : methodical evaluation of technological safety features. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*. 2015. 3 (3), pp. 1–8.
- [96] Sućeska M. *Test methods for explosives*. New York : Springer-Verlag New York. 1995.
- [97] Rankine J. G. & Turner, H. C. *A Design for a Rotary Machine to Assess the Friction Sensitiveness of Explosives and Propellants*. Waltham Abbey, UK : Ministry of technology, Explosives research and development establishment. 1970.
- [98] Dekra. *PROCESS SAFETY EQUIPMENT – Expertise in Explosion & Process Safety*.  
Доступно на: <https://www.dekra-process-safety.co.uk/instruments/process-safety-instruments/ctl47-rotary-friction-test-apparatus> [11. 3. 2023].
- [99] Copp J. L. et. al. The sensitiveness of explosives – The onset of detonation in the sensitiveness of explosives. *Phil. Trans. A*. 1948. 241, pp. 197–203.
- [100] Warner K. F. et al. ABL and BAM Friction Analysis Comparison. *Propellants Explosives and Pyrotechnics Journal* 2014. 40 (4), pp. 583–589.
- [101] Qiqi Peng et al. Electrostatic Hazards Assessment of Nitramine Explosives: Resistivity, Charge Accumulation and Discharge Sensitivity. *Cent. Eur. J. Energ. Mater*. 2016. 13 (3), pp. 755–769.
- [102] Türker L. Electrostatic Discharge and Energetic Materials. *To Chemistry Journal*. 2019. 2, pp. 72–114.

- [103] Electro-Tech Systems, Inc. *Model 931 – Electrostatic Discharge Firing Test System*.  
Доступно на: <https://www.electrotechsystems.com/products/electrostatic-instrumentation/electrostatic-discharge-simulators/electrostatic-discharge-firing-test-system-for-esd-testing-of-powders-liquids-and-devices/>. [14. 3. 2023].
- [104] United Nations, Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals. *Determination of electrostatic sensitiveness discharge (ESD) using the Allegany Ballistics Laboratory (ABL) ESD machine*. ST/SG/AC.10/C.3/2018/526. Geneva : UN. 2018.
- [105] Zeman S. & Majzlík J. Electric Spark Sensitivity of Polynitro Arenes Part I. A Comparison of Two Instruments. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2007. 4 (3), pp. 15–24.
- [106] Zhimin Li et. al. A Comprehensive Study of the Electrostatic Discharge Sensitivity and Chargeability of Tris(carbohydrazide)zinc Perchlorate. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2014. 11 (4), pp. 553–573.
- [107] Zhang L., Yu Y. & Xiang M. A Study of the Shock Sensitivity of Energetic Single Crystals by Large-Scale Ab Initio Molecular Dynamics Simulations. *Nanomaterials*. 2019. 9 (9), pp. 1251.
- [108] Dremin A. N. On the Mechanism of Molecular Condensed EMs Transformation under the Effect of Shock and Detonation Waves. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2008. 5 (1), pp. 31–44.
- [109] Dobratz B. M. *LLNL Explosives Handbook Properties of Chemical Explosives and Explosives Simulants*. UCRL-52997. Livermore : Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL. 1981.
- [110] Kyrychenko O. L. On the influence of the density of laser beam energy on the sensitivity of explosive substances to laser radiation. *Solid State Physics, Mineral Processing*. 2018. 6, pp. 48.
- [111] Kyrychenko O. L. et al. A technique to measure sensitivity of explosives to the effect of laser pulse radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019. 4, pp. 11.
- [112] Rothstein L. P. & Peterson R. Predicting High Explosive Detonation Velocities from their composition and structure. 1979. *Prop., Explos., Pyrotech*, 4 (3), pp. 56–60.
- [113] Džingalašević V., Jelača Z. & Ugrčić M. Primena metode višekanalnog merenja vremenskih intervala pomoću električnih sondi za ispitivanje procesa detonacije. *Naučnotehnički PREGLED*. 2001. 51 (6), pp. 112–119.

- [114] Ko Y. & Kwak K. Blast Effects of a Shear Thickening Fluid-Based Stemming Material. *Mining*. 2022. 2, pp. 330–349.
- [115] Fedoroff B. T. et al. *Encyclopedia of Explosives and Related Items*. Vol. 2. Dover : Picatinny Arsenal. 1962.
- [116] Keshavarz M. H., Seif F. & Soury H. Prediction of the Brisance of Energetic Materials. *Propellants Explos. Pyrotech.* 2013. 35, pp. 1–5.
- [117] Keshavarz M. H. & Klapötke T. M. *Energetic Compounds Methods for Prediction of their Performance*. 2nd edition. Berlin/Boston : Walter de Gruyter GmbH. 2020.
- [118] Mukhtar A. & Nasir H. Comparative Closed Vessel Firing-Ballistic Parameters Evaluation for Development of Base Bleed Composite Solid Propellant. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2018. 8 (6), pp. 3545–3549.
- [119] Russell, Michael S. *The Chemistry of Fireworks*. Cambridge : Royal Society of Chemistry. 2009.
- [120] Zheng-gang Xiao, San-jiu Ying & Fu-ming Xu. Deconsolidation and combustion performance of thermally consolidated propellants deterred by multi-layers coating. *Defence Technology*. 2014. 10 (2), pp. 1–5.
- [121] Carlucci D. E. & Jacobson S. S. *Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition*. Third Edition. Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group. 2018.
- [122] Gupta G., Jawale Mehilal L. & Bhattacharya B. Various Methods for the Determination of the Burning Rates of Solid Propellants – An Overview. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2015. 12 (3), pp. 593–620.
- [123] Woodley C. et al. Ignition and combustion of pyrotechnics at low pressures and at temperature extremes. *Defence Technology*. 2017. 13, pp. 119–126.
- [124] Conkling J. A. & Mocella C. J. *Chemistry of Pyrotechnics Basic Principles and Theory*. Third Edition. Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group. 2019.
- [125] Kosanke K. L. & Kosanke B. J. Selected Pyrotechnic Publications of K. L. and B. J. Kosanke (Pyrotechnic Literature Series). *Journal of Pyrotechnics; 1st edition*. 2013. 13
- [126] US Army Material Command, *Engineering Design Handbook: Military Pyrotechnics Series, Part One– Theory and Application*. AMC Pamphlet 706-185, Ch. 7. Washington : US Army Material Command Headquarters. 1967.
- [127] Jan Dirk van der Woerd et al. Design methods of blast resistant façades, windows, and doors in Germany: a review. *Glass Struct. Eng.* 2022. 7, pp. 693–710.
- [128] Nastasescu V. & Barsan G. Upon analytical and numerical calculus of the main parameters of the detonation process. *Buletinul AGIR*. 2015. 2

- [129] Zou D. *Initiation System. In: Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering*. Singapore : Springer. 2017.
- [130] Открытое акционерное общество „Научно производственное объединение Курганприбор” (RU). *ПЬЕЗОГЕНЕРАТОР ВЗРЫВАТЕЛЯ*. РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ. RU 154400 U1. 2015.
- [131] Wang K. & Chen H. Analysis on the characteristics of pulsed laser proximity fuze's echo. *Proceedings Volume 8192, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*. Beijing : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2011.
- [132] Jian-qing Liu et. al. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. *Defence Technology*. 2014. 10 (2), pp. 119–123.
- [133] Mukhtar A. & Qadeer Malik A. A Review of Works on Shaped Charges. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2017. 7 (5), pp. 2098–2103.
- [134] Sadovskii M. A. *The Mechanical action of air Blast Waves Experimental data, in Physics of Explosions*. Moscow. 1952.
- [135] Mays G. C. & Smith P. D. *Blast Effects on Buildings*. 2nd ed. London : Thomas Telford Publishing. 2009.
- [136] Brode H. L. Numerical solutions of spherical blast waves. *J. Appl. Phys.* 1955. 26 (6), pp. 766–775.
- [137] Newmark N. M. & Hansen R. J. *Design of blast resistant structures. In Shock and Vibration Handbook*. New York : McGraw-Hill. 1961.
- [138] Mills C. A. The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects. *Proceedings of the 1st International Conference on Concrete for Hazard Protections*. Edinburgh, UK. 1987. pp. 61–73.
- [139] Kingery C. N. & Bulmash G. *Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*. Aberdeen Proving Ground : Ballistic Research Laboratories. 1984.
- [140] Swisdak M. M. Jr. *Simplified Kingery Airblast Calculations*. Indian Head : Naval Surface Warfare Center. 1994.
- [141] DooJin Jeon et al. Modified Equation of Shock Wave Parameters. *Computation*. 2017. 5 (41), pp. 1–14.
- [142] United States Department of Defense (U.S DoD). *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. Army Armament Research and Development Command vol. 4. Arlington County. 2008.

- [143] Beveridge A. *Forensic Investigation of Explosions*. London : Taylor & Francis Ltd. 1998.
- [144] Centers for Disease Control and Prevention. *Explosions and Blast Injuries A Primer for Clinicians*. 2023. Доступно на: <https://www.cdc.gov/masstrauma/preparedness/primer.pdf> [17. 4. 2023].
- [145] Jorolemon M. R., Lopez R. A. & Krywko D. M. *Blast Injuries*. In: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022.
- [146] Cooper J. K., Grant C. D. & Zhang J. Z. Experimental and TD-DFT Study of Optical Absorption of Six Explosive Molecules: RDX, HMX, PETN, TNT, TATP, and HMTD. *J. Phys. Chem. A* 2013. 117, pp. 6043–6051.
- [147] Gaft M. & Nagli L. UV gated Raman spectroscopy for standoff detection of explosives. *Optical Materials*. 2008. 30 (11), pp. 1739–1746.
- [148] Pettersson A. et. al. Explosives standoff detection using raman spectroscopy: from bulk towards trace detection. *Proceedings Volume 7664, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets*. Orlando : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2010.
- [149] Youngeun Choi et. al. *Forensic analysis of explosives*. Доступно на: [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/chab/organic-chemistry/zenobi-group-dam/documents/Education/LecturesExercisesAnalytical%20Strategy%202014/HS2015/031115-Presentation\\_Explosives.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/chab/organic-chemistry/zenobi-group-dam/documents/Education/LecturesExercisesAnalytical%20Strategy%202014/HS2015/031115-Presentation_Explosives.pdf) [9. 5. 2023].
- [150] Mohamad Afiq Mohamed Huri et. al. A review of explosive residue detection from forensic chemistry perspective. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. 2017. 21 (2), pp. 267–282.
- [151] Kuula J. et. al. Detecting explosive substances by the IR spectrography. *Proc. SPIE 9073, Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XV, 90730Q*. Baltimor : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2014.
- [152] Berden G., Peeters R. & Meijer G. Cavity ring-down spectroscopy: Experimental schemes and applications. *Int. Reviews in Physical Chemistry*. 2000. 19, (4), pp. 565–607.
- [153] Jia Liu et. al. 2016 Identification of high explosive RDX using terahertz imaging and spectral fingerprints. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. 680, 012030.
- [154] Sleiman J. *Terahertz Imaging and Spectroscopy: Application to Defense and Security in front of the examination panel*. Doctoral dissertation. Bordeaux : Université de Bordeaux 2016.

- [155] Terzić M. et. al. Primena fotoakustičke spektroskopije u medicini i biofizici. *Zbornik radova XLVIII Konf za ETRAN*. Čačak. 2004.
- [156] Holthoff E. L., Marcus L. S. & Pellegrino P. M. Photoacoustic Spectroscopy for Trace Vapor Detection and Standoff Detection of Explosives. *Proc. SPIE 9824, Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XVII*. Baltimore : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2016.
- [157] Kathryn E. Brown et. al. Moore Advances In Explosives Analysis – Part II –Photon and Neutron Methods. *Anal. Bioanal. Chem.* 2016. 408 (1), pp. 49–65.
- [158] Shulyakovaa O., Avtonomova P. & Kornienkoa V. New Developments of Neutron Activation Analysis Applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2015. 195, pp. 2717–2725.
- [159] Wei Zhang et. al. Recent Developments in Spectroscopic Techniques for the Detection of Explosives. *Materials*. 2018. 11, pp. 1364.
- [160] Mayfield H. T., Burr E. & Cantrell M. Analysis of Explosives in Soil Using Solid Phase Microextraction and Gas Chromatography. *Analytical Letters*. 2006. 39, pp. 1463–1474.
- [161] Micin S., Tatic D. & Hrvac M. Electrochemical sensors for the detection and identification of nitro-aromatic explosives. *Bezbjednost, policija, građani*. 2023. 18 (2), 3–20.
- [162] Piljac I. *Senzori fizikalnih veličina i elektroanalitičke metode*. Zagreb : Mediaprint. 2010.
- [163] Zhang R. et al. Graphene Nanoribbon-Supported PtPd Concave Nanocubes for Electrochemical Detection of TNT with High Sensitivity and Selectivity. *Anal. Chem.* 2015. 87, pp. 12262–12269.
- [164] Calcerrada M., González-Herráez M. & García-Ruiz C. Recent advances in capillary electrophoresis instrumentation for the analysis of explosives. *Trends in Analytical Chemistry*. 2016. 75, pp. 75–85.
- [165] Rui Liu et. al. Biosensors for explosives: State of art and future trends. *Trends in Analytical Chemistry*. 2019. 118, pp. 123–137.
- [166] Đorđević D. R. Vojna intervencija kao sredstvo borbe protiv terorizma. *Vojno delo*. 2018. 3, pp. 460–478.
- [167] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Reducing the Threat of Improvised Explosive Device Attacks by Restricting Access to Explosive Precursor Chemicals*. Washington, DC: The National Academies Press. 2018.

[168] Action on Armed Violence. *An examination of the precursor chemicals used in the manufacture of explosive compositions found within Improvised Explosive Devices (IEDs)* Action on Armed Violence. 2021.

[169] Wikipedia. *Explosively formed penetrator*. Доступно на: [https://en.wikipedia.org/wiki/Explosively\\_formed\\_penetrator](https://en.wikipedia.org/wiki/Explosively_formed_penetrator) [9. 5. 2023].

[170] United Nations Mine Action Service. *United Nations Mine Action Service improvised explosive device lexicon*. 2018. Доступно на: <http://www.mineaction.org/sites/default/files/publications/UNMAS%20IED%20Lexicon.pdf>. [9. 5. 2023].

[171] American Civil Liberties Union. Доступно на: [https://www.aclu.org/sites/default/files/field\\_document/Appendix-I-Improvised-Explosive-Devices-Suicide-Bombers-and-Unexploded-Ordnance-.pdf](https://www.aclu.org/sites/default/files/field_document/Appendix-I-Improvised-Explosive-Devices-Suicide-Bombers-and-Unexploded-Ordnance-.pdf)

[172] Conflict Armament Research. Доступно на: <https://www.conflictarm.com/perspectives/anatomy-of-a-drone-boat/> [9. 5. 2023].