

# Značajke eksplozijom ubrzanog projektila

---

Rukavina, Leo

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:979907>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

**ZNAČAJKE EKSPLOZIJOM UBRZANOG PROJEKTILA**

Diplomski rad

Leo Rukavina

R262

Zagreb, 2021

## ZNAČAJKE EKSPLOZIJOM UBRZANOG PROJEKTILA

Leo Rukavina

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Kumulativni efekt se koristi kod eksplozivno oblikovanih projektila gdje se usmjeravanje i koncentracija detonacijskih udarnih valova u određenom smjeru koristi za formiranje projektila velike brzine. Osim u vojne svrhe gdje se projektili velike brzine koriste za onesposobljavanje oklopnih vozila, eksplozivno oblikovani projektili nude značajan potencijal za rušenje objekata jer im sposobnost djelovanja na daljinu omogućuje upotrebu u situacijama kada je opasno koristiti metode kontaktnog rušenja. Osim za rušenje eksplozivno oblikovani projektili koriste se za probijanje različitih prepreka i za zbrinjavanje ubojnih eksplozivnih sredstava.

U radu će biti prikazane metode rušenja i probijanja prepreka korištenjem EFP-a, te korištenje EFP-a u svrhu neutralizacije neeksplozivnih ubojnih sredstava.

Ključne riječi: EFP, kumulativni efekt, rušenja  
Završni rad sadrži: 61 stranice, 0 tablica, 40 slika, 0 priloga, i 46 reference.  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb  
Mentori: Dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF  
Dr. sc. Ime Prezime, izvanredni profesor RGNF  
Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF  
Dr. sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF

## CHARACTERISTICS OF EXPLOSION ACCELERATED PROJECTILE

Leo Rukavina

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

The cumulative effect is used in explosively shaped projectiles where the direction and concentration of detonation shock waves in a certain direction is used to form high-velocity projectiles. Except for military purposes where high-speed missiles are used to disable armored vehicles, explosively shaped projectiles offer significant potential for demolition because their ability to act remotely allows their use in situations where it is dangerous to use contact demolition methods. In addition to demolition, explosively shaped projectiles are used to break through various obstacles and for explosive ordnance disposal .

The paper will present methods of demolishing and breaking through obstacles using EFP, and the use of EFP for the purpose of neutralizing unexploded ordnance.

Keywords: EFP, cumulative effect, demolitions

Thesis contains: 61 pages, 0 tables, 40 figures, 0 appendixes, i 46 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Mario Dobrilović, PhD  
Associate Professor Name Surename, PhD

Reviewers: Mario Dobrilović, PhD  
Vječislav Bohanek, PhD  
Vinko Škrlec, PhD

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. EKSPLOZIJA-DETONACIJA .....	2
3. EKSPLOZIVI.....	3
3.1. Podjela eksplozivnih tvari.....	3
4. PRIMJENA EKSPLOZIVA U OBRADI METALA .....	5
4.1. Zavarivanje metala eksplozijom .....	5
4.1.1. Zavarivanje metalnih ploča eksplozijom .....	5
4.1.2. Zavarivanje metalnih cijevi eksplozijom.....	6
4.1.3. Spajanje krajeva metalnih cijevi eksplozijom .....	7
4.2. Oblikovanje metala eksplozijom .....	7
4.3. "Rezanje" materijala energijom eksplozije .....	7
5. EKSPLOZIVNI NABOJ .....	9
5.1. Koncentrirani eksplozivni naboj.....	9
5.2. Linijski (izduženi) eksplozivni naboji .....	9
5.3. Kumulativni eksplozivni naboji.....	9
5.3.1. Vrste kumulativnih naboja.....	11
6. OPĆENITO O EKSPLOZIVNO OBLIKOVANIM PROJEKTILIMA .....	12
6.1. Konstrukcija eksplozivno oblikovanih projektila .....	16
6.2. Probijanje zidova .....	23
6.3. Rušenje mostova.....	34
6.4. Zbrinjavanje ubojnih eksplozivnih sredstava .....	40
7. ZAKLJUČAK .....	47
8. LITERATURA.....	48

## POPIS SLIKA

<b>Slika 6-1</b> Osnovni dijelovi uređaja koji radi na principu kumulativnog naboja (James M. Ryan, 2011) .....	13
<b>Slika 6-2</b> Procesi stvaranja mlaza i grumena (Hicham Kemmoukhe, 2019) .....	13
<b>Slika 6-3</b> Radiografske snimke raspada mlaza kumulativnog naboja (Weickert, 1998) ....	14
<b>Slika 6-4</b> Poprečni presjek ciljnog bloka koji prikazuje dobiveni profil prodora kumulativnog naboja (William P. Walters, 2006).....	14
<b>Slika 6-5</b> Usporedba obloga kumulativnog naboja i eksplozivno oblikovanog projektila (EFP). Lijevo: Obloga kumulativnog naboja. Desno: EFP obloga (Weickert, 1998).....	15
<b>Slika 6-6</b> Razlika između kumulativnog naboja i eksplozivno oblikovanog projektila (French, 2010) .....	15
<b>Slika 6-7</b> Formiranje eksplozivno oblikovanog projektila (Weickert, 1998) .....	16
<b>Slika 6-8</b> Prikaz različitih vrsta preklapanja obloga (Weickert, 1998).....	17
<b>Slika 6-9</b> Simulacija formiranja eksplozivno oblikovanog projektila s „perajama“ (Liu, 2014).....	18
<b>Slika 6-10</b> Prikaz promjene brzine i oblika projektila promjenom debljine kućišta (Weickert, 1998).....	19
<b>Slika 6-11</b> Prikaz promjene karakteristika projektila s obzirom na promjenu oblika naboja (Weickert, 1998).....	19
<b>Slika 6-12</b> Prikaz projektila nakon redizajniranja obloge (Weickert, 1998).....	20
<b>Slika 6-13</b> EFP od Armco željeza. Gornji projektil: eksploziv sastava B. Donji projektil: Oktol (Weickert, 1998).....	21
<b>Slika 6-14</b> EFP od tantala. Gornji projektil: eksploziv sastava B. Donji projektil: Oktol (Weickert, 1998).....	21
<b>Slika 6-15</b> EFP stabilizirani otporom. Gornji projektil: rašireni rep. Srednji projektil: rep s perajama. Donji projektil: rep s perajama i šiljasti nos (Weickert, 1998).....	22
<b>Slika 6-16</b> Prag debljine eksploziva za probijanje ploče od 6 mm (Shirey, 1980).....	23
<b>Slika 6-17</b> Debljina ploče naspram debljine eksploziva (Shirey, 1980) .....	24
<b>Slika 6-18</b> Rezultati eksperimenta za određivanje odnosa mase punjenja i promjera rupa (Forsen, 1990).....	25
<b>Slika 6-19</b> Bezdimezionalni odnos težine naboja / promjera rupe (Lonnqvist, 1993).....	25
<b>Slika 6-20</b> Oštećenja armiranobetonskih zidova neobloženim eksplozivnim nabojima (Hader 1983).....	27

<b>Slika 6-21</b> Usporedba oštećenja od obloženih i neobloženih naboja (Hader, 1983) .....	27
<b>Slika 6-22</b> Primjer komercijalno dostupnih linearnih kumulativnih naboja (EBAD, 2021) .....	28
<b>Slika 6-23</b> Primjer korištenja kumulativnog naboja u dodiru sa zidom (Weickert, 1998) .	28
<b>Slika 6-24</b> Primjer uređaja za razbijanje zidova "Breachcase" za vojne primjene (slika lijevo) i rezultati njegovog djelovanja (slika desno) (Weickert, 1998).....	29
<b>Slika 6-25</b> Primjer linearnog kumulativnog naboja ispunjenog nitrometanom (slika gore) i rezultati njegovog djelovanja (slika dolje) (Weickert, 1998) .....	30
<b>Slika 6-26</b> Prikaz uređaja za rušenje - EFP promjera 300 mm (fotografiju omogućena od strane Organizacije za znanost i tehnologiju obrane, Australija) (Weickert, 1998).....	31
<b>Slika 6-27</b> Prikaz armiranobetonskih zidova probijenih eksplozivno oblikovanim projektilom (Weickert, 1998) .....	32
<b>Slika 6-28</b> Linearni EFP (slika lijevo) i ispaljeni projektil razbijen u nekoliko dijelova prikazan na radiogramu (slika desno) (Weickert, 1998) .....	33
<b>Slika 6-29</b> Šteta na armiranobetonskom zidu načinjena od strane linearnog EFP-a (Weickert, 1998).....	34
<b>Slika 6-30</b> C-4 eksploziv pričvršćen na čeličnu gredu (slika lijevo) i prikaz štete koju je eksploziv napravio (slika desno) (Weickert, 1998).....	35
<b>Slika 6-31</b> Prikaz kumulativnog naboja pričvršćenog za donju stranu armiranobetonske grede (slika lijevo) i šteta nastala otpucavanjem kumulativnog naboja (slika desno) (Weickert, 1998).....	36
<b>Slika 6-32</b> Penetracijski učinak linearnih kumulativnih naboja (Weickert, 1998) .....	36
<b>Slika 6-33</b> Prikaz komercijalno dostupnih ECT-a i primjer njihovog djelovanja (Sciencemadness Discussion Bord, 2020).....	37
<b>Slika 6-34</b> Shematski prikaz funkcioniranja LFT-a (Weickert, 1998).....	38
<b>Slika 6-35</b> Prikaz korištenja ekstrudiranog eksploziva (slika lijevo) i rezultat otpucavanja istoga (slika desno) (Weickert, 1998).....	39
<b>Slika 6-36</b> Prikaz uređaja "Powercone" (slika lijevo) i rezultati otpucavanja samoga uređaja (slika desno) (Weickert, 1998) .....	40
<b>Slika 6-37</b> Neutralizacija VS-50 mine pomoću pjene nitrometana (US Army .....	42
<b>Slika 6-38</b> Prikaz korištenja eksplozivnih diskova za neutralizaciju bombi (slika gore) i rezultat korištenja eksplozivnih diskova za neutralizaciju bombi (slika donja) (Weickert, 1998).....	43

<b>Slika 6-39</b> Prikaz postava RLSC testa za 105 mm HESH streljivo (slika gore) i rezultat RLSC testa (slika dolje) (Weickert, 1998) .....	45
<b>Slika 6-40</b> Penetracijski profil eksplozivno oblikovanog projektila u bloku od mekog čelika (Weickert, 1998).....	46

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$p$	Pa	tlak
$L$	m	duljina
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$v$	m/s	brzina
$d$	m	promjer rupe
$h$	m	debljina ploče
$Q$	kg	težina eksplozivnog naboja
$k$	J/kg	energija eksploziva
$p_x$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća eksploziva
$\sigma$	Pa	čvrstoća betona
$\sigma_c$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća betona



## 1. UVOD

Kumulativni efekt detonacije ostvaruje se usmjeravanjem i koncentracijom detonacijskih udarnih valova u određenom smjeru. To se postiže pomoću zakrivljene plohe na dnu eksplozivnog naboja. Detonacijski udarni valovi koji se šire propagiraju od mjesta iniciranja uzduž eksplozivnog naboja te dolaze na zakrivljenu plohu gdje se lome i usmjeravaju prema fokusu na uzdužnoj osi kumulativnog eksplozivnog punjenja. Fokusiranjem detonacijskih valova nastaje gusta struja odnosno snop detonacijskih udarnih valova sa znatno većim tlakom i brzinom širenja. Kao rezultat toga je znatno jače djelovanje detonacije u tom smjeru (Krsnik, 1989).

Kumulativni efekt detonacije koristi se za obavljanje određenog rada – miniranja u rudarstvu i naftnoj industriji; oblikovanje i zavarivanje metalnih elemenata; probijanje, rezanje i rušenje različitih objekata itd. (Sućeska, 2001).

Cilindrični eksplozivni naboj s konusnim udubljenjem (tzv. kumulativnom šupljinom) na jednom i detonatorom na drugom kraju poznat je pod nazivom kumulativni naboj.

Premda se kumulativni naboji najviše koriste u vojne svrhe (probijanje oklopa tenkova i drugih oklopljenih borbenih vozila), oni su našli široku primjenu i u gospodarstvu.

Konusni kumulativni naboji najviše se koriste u naftnoj industriji za perforiranje bušotina i u rudarstvu za specijalna miniranja. Dok su performanse konusnog kumulativnog naboja određene dubine penetracije kumulativnog mlaza u prepreku, performanse linijskog kumulativnog naboja određene su maksimalnom debljinom prepreke koju naboj može presjeći (odrezati). Savitljivi (fleksibilni) linijski kumulativni naboji koriste se za 'presijecanje' objekata sa sferičnom površinom – poput cijevi, spremnika za naftu itd.

Kumulativni efekt se koristi i kod eksplozivno oblikovanih projektila gdje se usmjeravanje i koncentracija detonacijskih udarnih valova u određenom smjeru koristi za formiranje projektila velike brzine. Osim u vojne svrhe gdje se projektili velike brzine koriste za onesposobljavanje oklopnih vozila, eksplozivno oblikovani projektili nude značajan potencijal za rušenje objekata jer im sposobnost djelovanja na daljinu omogućuje upotrebu u situacijama kada je opasno koristiti metode kontaktnog rušenja. Osim za rušenje eksplozivno oblikovani projektili koriste se za probijanje različitih prepreka i za zbrinjavanje ubojnih eksplozivnih sredstava.

## 2. EKSPLOZIJA-DETONACIJA

Prema Baumu i suradnicima (Baum et al., 1975) eksplozija se u općem smislu definira kao proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prijelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad. Rad koji izvrši eksplozija rezultat je naglog širenja plinova ili para, neovisno o tome jesu li oni postojali prije ili su nastali tijekom eksplozije. Najvažnije obilježje eksplozije jest nagli skok tlaka u sredini koja neposredno okružuje mjesto eksplozije. To je ujedno i uzrok snažnog razornog djelovanja eksplozije. Pojam eksplozije tako uključuje efekte koji prate, ili uključuju, brzo sagorijevanje i detonaciju, kao i sasvim fizičke procese (Sućeska, 2001).

Pod detonacijom se podrazumijeva vrlo brza kemijska reakcija kod koje eksplozivna materija prelazi iz čvrstog agregatnog stanja u plinovito. Na dodirnoj plohi plin/krti eksploziv, pri danoj temperaturi, brzina reakcije raste s povećanjem tlaka. Efekt zatvorenosti prostora oko dodirnih ploha sprječava širenje produkata eksplozije i time se povećava tlak koji će povećati brzinu reakcije (Ester, 2005). To je egzotermna reakcija pri kojoj se oslobađa velika količina topline i plinova.

Zbog velike brzine kemijske reakcije (2500-9000 m/s) u vrlo kratkom vremenu oslobađa se velika količina energije. Kemijska se reakcija jako ubrzava zbog visoke temperature koja se razvija pri detonaciji eksploziva. Za nekoliko milisekundi izvrši se kemijsko razlaganje eksploziva, tj. nestabilni spojevi i smjese prelaze u stabilne produkte koji nemaju nikakve sličnosti s prvobitnom eksplozivnom tvari (Krsnik, 1989). Ogromna snaga eksplozivnih tvari posljedica je velike brzine odvijanja eksplozivnog procesa.

Produkti detonacije su plinovi čiji volumen i tlak predstavljaju važne energetske karakteristike eksploziva koje utječu na snagu detonacije. Detonacijski tlak ovisi o početnom volumenu produkata eksplozije i temperaturi eksplozije. Količina oslobođene energije je mjerilo radne sposobnosti eksploziva.

Sasvim pojednostavljeno, to znači da eksplozivni proces čine dva stadija: (a) pretvorba nekog oblika energije u energiju stlačene tvari i (b) naglu ekspanziju stlačene tvari uz obavljanje mehaničkog rada.

### 3. EKSPLOZIVI

Kemijski spojevi kod kojih se pod djelovanjem nekog vanjskog impulsa (npr. topline, udara, trenja i sl.) može izazvati brza kemijska pretvorba praćena oslobađanjem topline i nastajanjem vrlo zagrijanih plinovitih produkata, nazivaju se eksplozivnim tvarima (Sućeska, 2001). Proces razlaganja eksplozivnih tvari odvija se po određenim kemijskim reakcijama, u ovisnosti o kemijskom sastavu eksploziva i uvjeta pod kojima je izvršena detonacija. Najčešće su to organski spojevi iz skupine nitrata, nitramina, nitroestera i sl, koji u pogledu brojnih fizičkih i kemijskih svojstava imaju sličnosti s ostalim organskim spojevima. U usporedbi s drugim energetske tvari (poput ugljena, nafte i sl.) eksplozivne se tvari razlikuju i po tome što one sadrže u svojim molekulama sve elemente potrebne za odvijanje eksplozivnih kemijskih reakcija (a najčešće su to elementi C, H, N i O). Drugim riječima, u eksplozivnoj kemijskoj pretvorbi eksplozivnih tvari ne sudjeluju (ili sudjeluju sasvim neznatno) kemijski elementi iz njezina okruženja, dok druge energetske tvari za sagorijevanje trebaju kisik iz zraka.

Za dovođenje eksploziva do detonacije potreban je početni impuls, tj. potrebno mu je dovesti određenu količinu energije u obliku toplotnog, mehaničkog ili eksplozivnog impulsa.

Detonacijska sposobnost eksploziva ocjenjuje se prema minimalnoj količini inicijalnog eksploziva s kojom se dotični eksploziv može dovesti do detonacije. Kao mjerilo detonacijske sposobnosti eksploziva uzima se kritična masa i kritični promjer eksploziva. Što je kritični promjer manji, detonacijska sposobnost eksploziva je bolja (Krsnik, 1989).

Na detonacijsku sposobnost eksploziva utječu:

- Kemijski sastav eksploziva
- Kritična masa i promjer eksploziva
- Gustoća eksploziva
- Granulometrijski sastav eksploziva
- Minersko-tehničke karakteristike eksploziva

#### 3.1. Podjela eksplozivnih tvari

Prema Esteru (2005) eksplozivne tvari mogu se razvrstati prema:

- Namjeni (gospodarske, vojne, pirotehničke)
- Kemijskom sastavu (eksplozivi senzibilizirani nitroderivatima, eksplozivi senzibilizirani neeksplozivnim sastojcima itd.)
- Konzistenciji (praškasti, smjese u rasutom stanju, lijevani, vodoplastični, plastični, emulzije i dr.)

- Brizantnosti
- Osjetljivosti i drugo

Treba podsjetiti da se pod pojmom „eksplozivne tvari“ misli i na eksplozivne tvari od kojih se izrađuju naboji za miniranje i eksplozivne tvari od kojih su izrađeni pogonski naboji kod raketa i drugih oružanih sustava, kao i na eksplozivne tvari koje se koriste u izradi pirotehničkih sredstava (Sućeska, 2001).

U praksi je uobičajena podjela eksplozivnih tvari u sljedeće skupine:

- Primarne (inicirajuće) eksplozivne tvari
- Sekundarne (brizantne) eksplozivne tvari
- Barute (potisne eksplozivne tvari)
- Pirotehničke smjese

Inicirajuće i brizantne eksplozivne tvari odlikuju se detonacijom kao osnovnim oblikom eksplozivne kemijske pretvorbe (iako brizantne eksplozivne tvari mogu u određenim uvjetima stabilno sagorijevati). Stoga se i njihovo djelovanje na okolinu očituje u vidu snažnog udara detonacijskih produkata i stvaranja udarnog vala.

Sućeska (2001) nam govori da se s kemijskog stajališta, tj. sa stajališta kemijskog sastava, eksplozivne se tvari mogu svrstati u dvije skupine:

- Jednokomponentne eksplozivne tvari
- Eksplozivne tvari tipa smjese (sačinjene od dviju ili više eksplozivnih tvari; eksplozivnih i neeksplozivnih tvari ili tvari koje su pojedinačno neeksplozivne, ali u smjesi postaju eksplozivne – npr. gorivo i oksidansi)

## 4. PRIMJENA EKSPLOZIVA U OBRADI METALA

Eksplozije danas imaju značajno mjesto ne smo u području sinteze novih materijala postupkom udarnog prešanja praškastih tvari nego i u području obrade metala – zavarivanju, rezanju, oblikovanju deformiranjem, očvršćivanju itd.

### 4.1. Zavarivanje metala eksplozijom

Primjenom energije eksplozije mogu se dobiti kompozitni materijali dobrih mehaničkih svojstva, visoke korozivne stabilnosti i otpornosti na različite agresivne sredine. Primjera radi, jedan od načina da se dobije materijal koji će imati dobra mehanička svojstva i visoku otpornost na agresivne medije, uz prihvatljivu cijenu, jest izrada takvog kompozitnog materijala čija će osnova biti od nekog jeftinijeg čelika, a površinski sloj koji je u kontaktu s agresivnom sredinom od visokolegiriranog čelika, slitine ili obojenih metala otpornih na agresivne sredine. Postupak prekrivanja osnovnog metala tankom metalnom pločom (listom) drugog metala naziva se plakiranje. Primjena eksploziva za dobivanje takvih dvoslojnih i višeslojnih kompozitnih materijala počinje prije 30-ak godina, a prije 20 godina u SAD se na taj način proizvodilo godišnje 50 tisuća tona dvoslojnih materijala (bimetala), u Švedskoj 20 tisuća tona itd. (Sućeska, 2001).

Energija eksplozije danas se koristi i za oblikovanje metala deformiranjem, za očvršćivanje površinskih slojeva metala, rezanje metalnih elemenata i sl. Svi ti podaci govore o tome koliko su eksplozivne tvari važne u području novih tehnologija temeljenih na udarnom opterećenju.

#### 4.1.1. Zavarivanje metalnih ploča eksplozijom

Zavarivanje metala eksplozijom temelji se na "ispaljivanju" detonacijom eksplozivnog naboja jedne metalne ploče u pravcu druge ploče (odnosno elementa) s kojim se želi spojiti. Pritom druga ploča može biti nepokretna (stacionarna) ili isto tako "ispaljena" detonacijom drugog eksplozivnog naboja.

U praksi se susreću dvije metode zavarivanja metalnih ploča eksplozijom:

- kutna metoda i
- paralelna metoda.

Kutna metoda sastoji se u tome da se metalna ploča (plakirajući list) postavlja pod malim kutom (2-10°) u odnosu na osnovnu ploču.

Na gornju površinu plakirajuće ploče stavlja se sloj eksplozivne tvari čijom će detonacijom ona biti "ispaljena" prema donjoj ploči. Eksploziv koji se koristi u tu svrhu mora

ispunjavati nekoliko specifičnih zahtjeva. Prije svega, on mora imati relativno malu detonacijsku brzinu (2000-3000 m/s), kako bi se dobila optimalna brzina plakirajuće pločice od 400-800 m/s, mora dobro poprimati oblik površine metalnog elementa koji se obrađuje, mora biti dovoljno siguran za rad itd. Naravno, teško je napraviti takvu eksplozivnu tvar koja će moći biti univerzalno primijenjena u svim uvjetima zavarivanje metala eksplozijom (Sućeska, 2001).

Nakon iniciranja eksplozivnog naboja kroz eksploziv započinje prostiranje detonacijskog vala. Kako se detonacijski val prostire kroz eksplozivni naboj, tako pod djelovanjem visokog tlaka detonacijskih produkata i udarnog vala dijelovi plakirajuće ploče zadobivaju veliku brzinu, a između plakirajuće i osnovne ploče formira se kut sudara.

U zoni sudara plakirajuće i osnovne ploče tlak dostiže vrijednost od preko 100 tisuća bara, što materijal u zoni sudara dovodi u stanje plastičnog tečenja. Prema nekim autorima pod djelovanjem visokog tlaka i visoke temperature u zoni sudara dolazi i do taljenja kontaktnih površina metala. Konačni rezultat takvog stanja u zoni sudara jest stvaranje čvrstog spoja između dviju ploča. Nastali spoj ima karakterističnu valovitu strukturu s uključcima rastaljenog metala.

Kod paralelne metode zavarivanja dvije metalne ploče koje se žele međusobno zavariti postavljaju se paralelno jedna u odnosu na drugu, s tim da između njih postoji određeni razmak.

Metodom paralelnog zavarivanja eliminiraju se problemi promjene parametara procesa zavarivanja i kvalitete zavarivanja duž ploče, što je problem koji se javlja kod kutne metode – posebice kada se radi o zavarivanju ploča veće površine. Stoga se kutna metoda i primjenjuje uglavnom za zavarivanje ploča manje površine.

Metodom paralelnog zavarivanja dobiva se jednolika kvaliteta zavarenog spoja po cijeloj površini ploče. Ovom je metodom moguće istodobno spajati i više metalnih ploča – tzv. višeslojno zavarivanje. Pri višeslojnom zavarivanju između plakirajućih ploča nasipa se metalni prah veličine čestica 150-200 mm, čime se postiže neophodni zazor (Sućeska, 2001).

#### 4.1.2. Zavarivanje metalnih cijevi eksplozijom

Temeljne zakonitosti koje važe za zavarivanje eksplozijom ravnih metalnih ploča važe i za zavarivanje cijevi, bez obzira na to što se zavarivanje cijevi odlikuje nizom specifičnosti vezanih ne samo za proces "ispaljivanja" cijevi eksplozijom nego i za konfiguraciju površina koje se pritom sudaraju.

Plakiranjem se izrađuju bimetalni elementi (dijelovi) različitih dimenzija – od svega nekoliko milimetara pa do nekoliko metara. Kada je u pitanju plakiranje cijevi, treba reći da ono podrazumijeva plakiranje vanjske i plakiranje unutarnje površine cijevi (Sućeska, 2001).

Bitna razlika između zavarivanja cijevi i zavarivanja ravnih metalnih ploča jest u tome što se u zazoru između cijevi, ispred točke dodira, nakupljaju čestice materijala otrgnute s površine cijevi. Izvjesna asimetrija pri sudaranju, koja je uvijek moguća, rezultira koncentriranjem čestica na pojedinim dijelovima površina cijevi koje se zavariju i nastajanjem defekata na zavarenom spoju.

#### 4.1.3. Spajanje krajeva metalnih cijevi eksplozijom

Spajanje, odnosno zavarivanje krajeva metalnih cijevi eksplozijom temelji se na istim načelima kao i zavarivanje. Postoje brojni načini spajanja metalnih cijevi, ovisno o tome jesu li njihovi krajevi istog promjera, jesu li cijevi izrađene od istog materijala, kakve su im dimenzije itd.

#### 4.2. **Oblikovanje metala eksplozijom**

Proces deformiranja ravnih metalnih ploča, tj. izrada dijelova različitih oblika i dimenzija iz ravne metalne ploče, ima najširu primjenu kada je u pitanju oblikovanje eksplozijom. Dok se konvencionalne metode oblikovanja metala deformiranjem odlikuju brzinama do 10 m/s, deformiranje eksplozijom, tj. impulsnim tehnologijama, odlikuje se brzinama deformiranja od 100-300 m/s.

Proces oblikovanja metalnih ploča eksplozijom obavlja se najčešće u bazenima ispunjenim vodom. Kako se deformiranje lima odvija brzinom 100-300 m/s, to zrak koji ispunjava matricu može znatno utjecati na proces deformacije, tj. može uzrokovati lokalne izbočine na izvučenom komadu, nedovoljnu deformaciju i sl. Stoga je nužno prije iniciranja eksplozivnog naboja iz matrice odstraniti zrak vakuum-pumpom (Sućeska, 2001).

Proces izvlačenja lima eksplozijom ovisi o nizu parametara, prije svega o vrsti i količini eksplozivnog naboja, udaljenosti eksplozivnog naboja od lima itd.

#### 4.3. **"Rezanje" materijala energijom eksplozije**

Sferičnim kumulativnim nabojem mogu se 'probiti', a linijskim kumulativnim nabojem 'rezati' (odnosno presjeći) različiti objekti, izrađeni od različitih materijala. Mehanizam djelovanja kumulativnog naboja na objekt u oba je slučaja isti – kinetička energija

detonacijskih produkata i materijala kumulativnog lijevka, fokusirana na malu površinu cilja, izaziva njegovo snažno deformiranje čiji je rezultat probijanje ili rezanje objekta.

Kumulativni se naboji ne primjenjuju samo u vojne svrhe (za probijanje tenkovskih oklopa) nego je značajna i njihova primjena u gospodarstvu. Sferični kumulativni naboji koriste se za perforiranje naftnih bušotina, sekundarno miniranje u rudarstvu itd. Linijski se kumulativni naboji mogu uspješno primijeniti za 'rezanje' elemenata mostova čelične konstrukcije, tj. za rušenje mostova čelične konstrukcije. Pri tom se isti učinak postiže neusporedivo manjom količinom eksploziva u usporedbi s količinom eksploziva potrebnom za klasični način rušenja – pomoću koncentriranih i linijskih eksplozivnih naboj. Savitljivi linijski kumulativni naboji koriste se i u vatrogastvu – za izradu prinudnih otvora u zidu, vratima, krovu i sl. Posebno važno mjesto linijski kumulativni naboji imaju u različitim sustavima raketa velikog dometa, raketa vojne namjene i raketa za svemirska istraživanja. Tako se npr. savitljivi linijski kumulativni naboji koriste u sustavima za odvajanje različitih pomoćnih elemenata pri startanju rakete, zatim u sustavu za odvajanje pojedinih stupnjeva raketnog motora (kod raketa koje imaju višestupanjske raketne motore), u sustavima za odvajanje pojedinih segmenata tijela (oplate) raketnog motora itd. (Sućeska, 2001).



## 5. EKSPLOZIVNI NABOJ

Eksplozivnim nabojem (ili punjenjem) uobičajeno je nazivati određenu količinu eksplozivne tvari čijom se detonacijom obavlja određeni rad – miniranje u rudarstvu i naftnoj industriji; oblikovanje i zavarivanje metalnih elemenata; probijanje, rezanje i rušenje različitih objekata itd. (Sućeska, 2001). Ovisno o namjeni eksplozivni naboji mogu biti različiti po obliku i dimenzijama, vrsti i količini eksploziva od kojega je naboj izrađen, mjestu i načinu postavljanja naboja pri miniranju itd. Uobičajeno je eksplozivne naboje, s obzirom na oblik, dijeliti u tri skupine:

- Koncentrirani eksplozivni naboj
- Linijski (izduženi) eksplozivni naboj
- Kumulativni eksplozivni naboj

Eksplozivni se naboji mogu izrađivati na različite načine. Način izrade eksplozivnog naboja ovisi proje svega o svojstvima eksplozivne tvari od koje se naboj izrađuje te o namjeni naboja.

### 5.1. Koncentrirani eksplozivni naboj

Eksplozivni naboji kod kojih je omjer najduže i najkraće stranice manji od 3:1 nazivaju se koncentriranim nabojima. Takvi se naboji koriste za komorna i kotlovska miniranja u rudarstvu.

### 5.2. Linijski (izduženi) eksplozivni naboji

Linijski (ili izduženi) eksplozivni naboji su kod kojih je omjer najduže i najkraće stranice veći od 3:1, a odnos između dvije kraće stranice manji od 3:1. primjerice, takvog su oblika naboji koji se koriste za miniranje plitkim i dubokim minskim bušotinama, za rušenje objekata itd.

### 5.3. Kumulativni eksplozivni naboji

Cilindrični eksplozivni naboj s konusnim udubljenjem (tzv. kumulativnom šupljinom) na jednom i detonatorom na drugom kraju poznat je pod nazivom kumulativni naboj. Kod takvih naboja kumulativna šupljina, koja može biti ne samo konusnog nego i hemisferičnog oblika, uzrokuje usmjeravanje energije detonacijskih produkata, što rezultira stvaranjem snažne lokalizirane sile koja je u stanju u prepri prouzročiti neusporedivo veće udubljenje nego što je to u stanju učiniti obični linijski ili koncentrirani naboj (Sućeska, 2001). Ovaj je

fenomen poznat i pod nazivima Monroeov efekt (SAD i Velika Britanija) i von Foersterov efekt (Njemačka), u spomen na njegove izumitelje.

Ako se kumulativna šupljina prekrije tankom metalnom oblogom, tzv. kumulativnim lijevkom, tada se pri detonaciji eksplozivnog naboja od metalne obloge i detonacijskih produkata stvara tzv. kumulativni mlaz. Metalna obloga pritom služi kao izvor teških molekula. Mehanizam stvaranja kumulativnog mlaza je sljedeći:

Nakon iniciranja eksplozivnog naboja detonatorom koji se nalazi na suprotnoj strani u odnosu na kumulativnu šupljinu, kroz eksploziv počinje gibanje detonacijskog vala, brzinom 3-9 km/s. Dolaskom prednje fronte detonacijskog vala do kumulativnog lijevka materijal lijevka biva podvrgnut udarnom djelovanju snažnog tlaka (100-400 kbara), zbog čega se počinje gibati – urušavati prema uzdužnoj osi simetrije kumulativnog naboja, sudarajući se na njoj. Taj sudar, zbog golemog tlaka, rezultira izvlačenjem materijala lijevka duž osi simetrije u kumulativni mlaz. Kako vrijednost detonacijskog tlaka znatno nadmašuje čvrstoću materijala lijevka (najčešće od bakra), on se ponaša poput tečnog nestišljivog fluida. Materijal lijevka urušava se postupno, od vrha konusa prema bazi. Pritom se od jednog dijela materijala lijevka formira kumulativni mlaz, a od drugog dijela kompaktni „malj“ – masivni sporiji dio koji prati mlaz (Sućeska, 2001).

Kumulativni mlaz nije „sijekuća plazma“ niti on „progorijeva sebi put kroz metalnu prepreku“, kao što se to često misli. Djelovanje mlaza na prepreku posljedica je u prvom redu njegove ogromne brzine (njegove kinetičke energije) a ne visoke temperature, kako se također često misli.

Kada kumulativni mlaz, krećući se brzinom od 5-10 km/s, dospije do prepreke, on uzrokuje istiskivanje (plastično tečenje) materijala prepreke u pravcu okomitom na os gibanja mlaza, prodirući tako prema unutrašnjosti prepreke. Pritom dolazi do radijalnog pomicanja materijala – zbijanja u stranu. To je djelovanje slično djelovanju jakog mlaza vode na pješčanu prepreku. Kako je vrijeme kontakata mlaza i prepreke izuzetno kratko to je prijenos topline s mlaza na prepreku vrlo ograničen. Drugim riječima, to znači da nema govora o tome da se mehanizam probijanja temelji na „taljenju materijala toplinom kumulativnog mlaza“, tj. „progorijevanju puta kroz prepreku“. Usmjereni i koncentrirani kinetički mlaz temeljni je uzrok snažnog djelovanja na prepreku (Sućeska, 1996; Walters i Zukas, 1989).

Grubi odnos nekih parametara kumulativnog mlaza jesu sljedeći: oko 20 % mase unutrašnjeg dijela kumulativnog lijevka ulazi u kumulativni mlaz, dok ostatak odlazi u „malj“; promjer mlaza iznosi oko 1/20 promjera baze lijevka; brzina čela mlaza je reda

veličine brzine detonacije upotrijebljenog eksploziva (najčešće 6-9 km/s), dok je brzina „malja“ oko 1/10 brzine čela mlaza (Walters i Zukas, 1989).

Sposobnost kumulativnog mlaza da probije neku prepreku ovisi o nizu čimbenika: o vrsti eksplozivnog naboja (eksplozivi s većim detonacijskim tlakom i većom detonacijskom brzinom postižu veću probojnost), obliku i dimenzijama kumulativnog naboja, materijalu lijevka i kutu kumulativne šupljine, debljini kumulativnog lijevka itd. Za isti kumulativni naboj najbolja se probojnost postiže kada se naboj nalazi na stanovitoj udaljenosti od prepreke. Taj razmak, koji je nužan kako bi se postiglo najbolje fokusiranje kumulativnog lijevka i detonacijskih produkata, obično iznosi 3-6 promjera naboja, ovisno o konstrukciji naboja.

Suvremeni kumulativni naboji koji se koriste u vojne svrhe mogu probiti homogenu ploču izrađenu od pancirnog čelika debljine i preko 6 promjera (kalibra) naboja.

Za izradu kumulativnih naboja koriste se visokobrizantni eksplozivi jednolike gustoće koji se lako modeliraju. Takva svojstva posjeduju pentolit i drugi plastični eksplozivi (Krsnik, 1989).

### 5.3.1. Vrste kumulativnih naboja

Premda se kumulativni naboji najviše koriste u vojne svrhe (probijanje oklopa tenkova i drugih oklopljenih borbenih vozila), oni su našli široku primjenu i u gospodarstvu. S obzirom na oblik i dimenzije kumulativni naboji koji se koriste u gospodarstvu mogu se podijeliti u sljedeće skupine (Barbour, 1981):

- Konusni kumulativni naboji
- Linijski kumulativni naboji
- Savitljivi linijski kumulativni naboji

Konusni kumulativni naboji najviše se koriste u naftnoj industriji za perforiranje bušotina i u rudarstvu za specijalna miniranja.

Dok su performanse konusnog kumulativnog naboja određene dubine penetracije kumulativnog mlaza u prepreku, performanse linijskog kumulativnog naboja određene su maksimalnom debljinom prepreke koju naboj može presjeći (odrezati). Treba napomenuti da je debljina proboja kumulativnog mlaza manja od debljine prepreke koju kumulativni naboj može presjeći.

Savitljivi (fleksibilni) linijski kumulativni naboji koriste se za 'presijecanje' objekata sa sferičnom površinom – poput cijevi, spremnika za naftu itd.

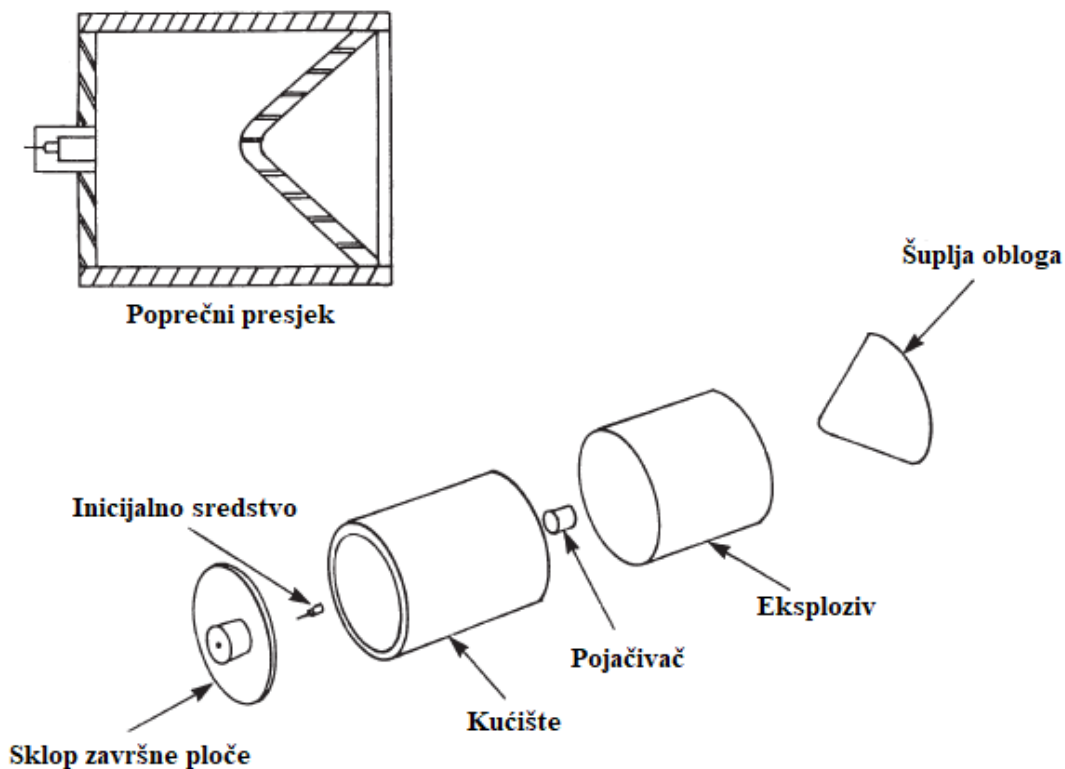
## 6. OPĆENITO O EKSPLOZIVNO OBLIKOVANIM PROJEKTILIMA

Postoje različite tehnike rušenja struktura koja uključuju upotrebu eksploziva. Jedna grupa metoda koristi energiju eksploziva za lansiranje projektila ili za izravni kontakt s određenom konstrukcijom.

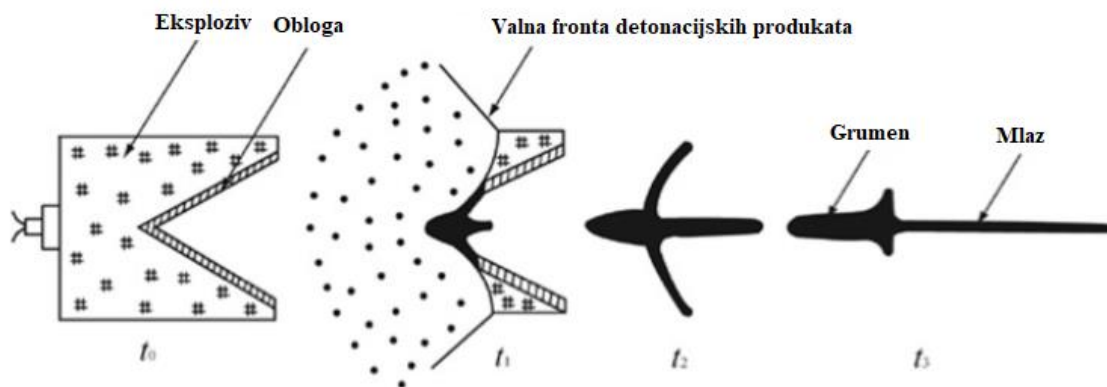
Eksplozivi pogodni za rušenje dostupni su u brojnim oblicima: tekućina, kaša, pjena, gel, kuglice, s bazom plastike (u sloju i bloku), lijevani i prešani. Takvi se eksplozivi nalaze u širokoj industrijskoj i vojnoj primjena: zavarivanje eksplozivima, oblikovanje, zbijanje praha, drobljenje stijena, stvaranje mlaza ili projektila u obliku naboja ili eksplozivno oblikovanih projektila (EFP). Za rušenje se mogu koristiti u izravnom kontaktu ili kao punilo za kumulativni naboj ili EFP uređaja koji proizvode projektil velike brzine koji se koristi za rezanje ili rušenje konstrukcije.

Povijesno gledano, različite metode rušenja koristile su eksplozive u rasutom stanju u dodiru s konstrukcijom i / ili njezinim nosivim elementima kako bi proizvele potreban učinak. U 1800-ima otkriveno je da šupljina ili udubljenje u naboju koji je u izravnom kontaktu sa strukturom uzrokuje "fokusirani" učinke eksplozije. To je dovelo do izraza "kumulativni naboj". Usljedila su usavršavanja metode pri čemu je udubljenje (izvorno izvedeno ručno) nastalo pritiskom eksploziva o inertan kalup. Oblaganje udubljenja metalom dodatno je povećalo performanse. Kako su kumulativni naboji bili razvijani s učinkovitom sposobnošću rezanja, zamijenjene su mnoge stare metode rušenja. Istraživanje kumulativnih naboja dovelo je do razvoja naboja koji je formirao projektil velike brzine, pa otuda i izraz "eksplozivno oblikovan projektil". Eksplozivno oblikovani projektili nude značajan potencijal za rušenje u budućnosti, jer im sposobnost djelovanja na daljinu omogućuje upotrebu u situacijama kada je opasno koristiti metode kontaktnog rušenja (Weickert, 1998).

Osnovni dijelovi uređaja koji radi na principu kumulativnog naboja prikazani su na slici 6-1. Uređaj se sastoji od inicijalnog sredstva, pojačnika, pojačivača i eksplozivnog naboja smještenog u tijelo naboja s pločicom na jednom kraju i šupljom oblogom na drugom kraju. Nakon pokretanja, detonacijski val napreduje te udara u oblogu, a pri tome proizvedeni visoki tlakovi plinova uzrokuju da se obloga ponaša kao fluid te se savija oko osi simetrije. Kad obloga dosegne os simetrije, unutarnji sloj materijala tvori mlaz velike brzine (približno 15-20% mase košuljice), dok ostatak mase stvara metalni grumen male brzine koji se naziva malj. Procesi stvaranja mlaza i malja metalnog grumena prikazani su na slici 6-2.

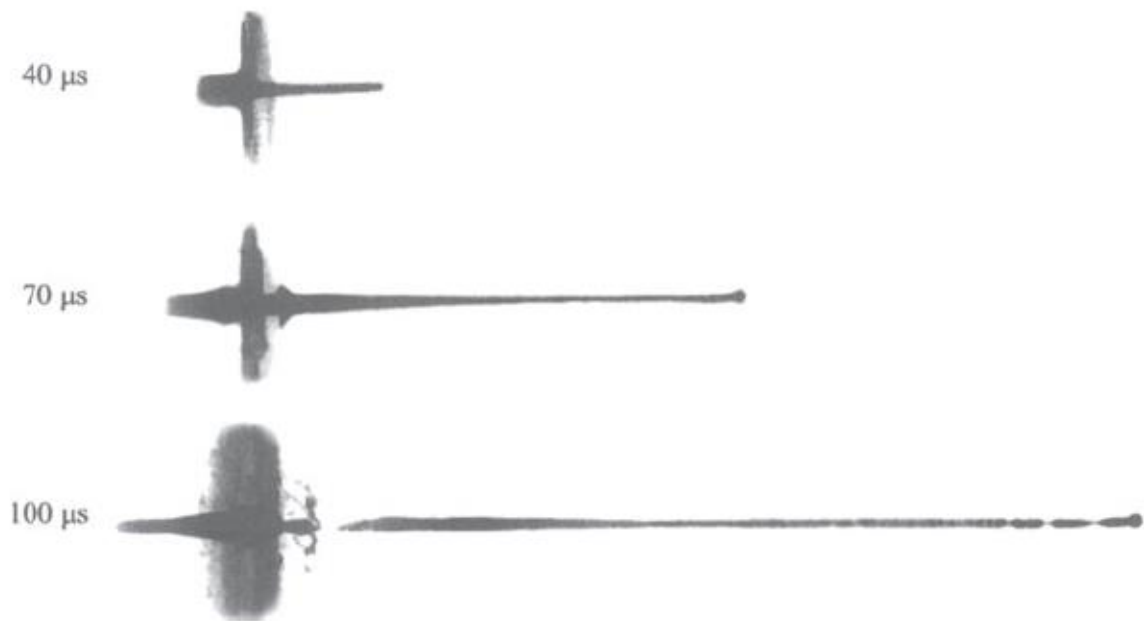


Slika 6-1 Osnovni dijelovi uređaja koji radi na principu kumulativnog naboja (James M. Ryan, 2011)



Slika 6-2 Procesi stvaranja mlaza i grumena (Hicham Kemmoukhe, 2019)

Kako se mlaz kumulativnog naboja formira kontinuirano se produžuje zbog gradijenta brzine. Tipično se brzina mlaza kreće od 7 km/s do 10 km/s na vrhu do 1 km/s do 2 km/s na repu. Gradijent brzine rezultat je varijacije omjera mase eksploziva / košuljice duž košuljice. Zbog tog gradijenta duž duljine mlaza dolazi do procesa istežanja i na kraju se mlaz raspada. Sekvencijalne radiografske snimke raspada mlaza prikazane su na slici 6-3.



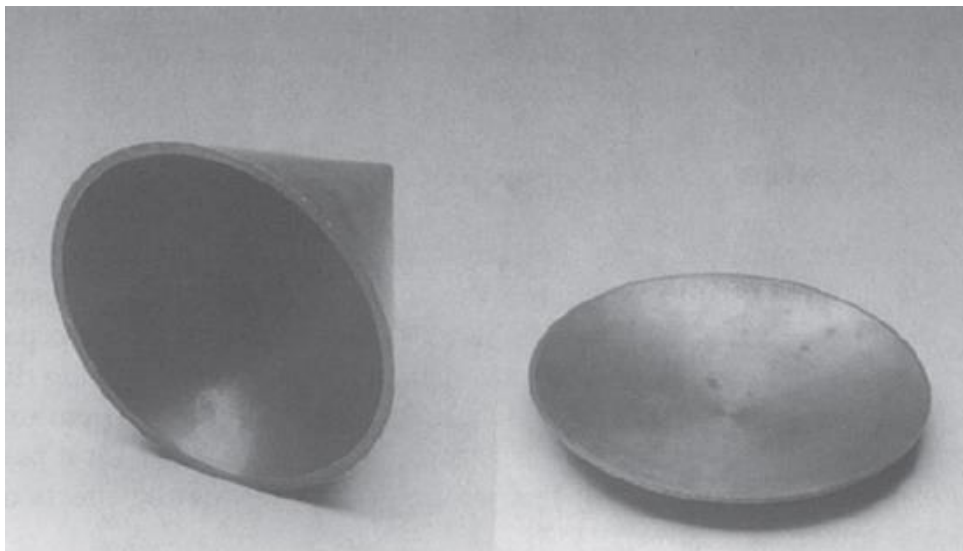
**Slika 6-3** Radiografske snimke raspada mlaza kumulativnog naboja (Weickert, 1998)

Kasnije se čestice mlaza razmiču i mlaz se izdužuje, smanjujući tako svoju prodornu učinkovitost. Stoga postoji optimalna udaljenost od cilja kako bi se maksimalizirao prodor. Ova odstojna udaljenost obično iznosi 5-6 promjera naboja za konusni naboj i rezultira dubinom prodiranja većom od 6 promjera u čeliku. Na slici 6-4 prikazan je profil prodora kumulativnog naboja u čeličnim pločama. Različite geometrijske značajke kumulativnih naboja te različiti materijali obloge se koriste za proizvodnju kumulativnih naboja brojnih primjena (Weickert, 1998).



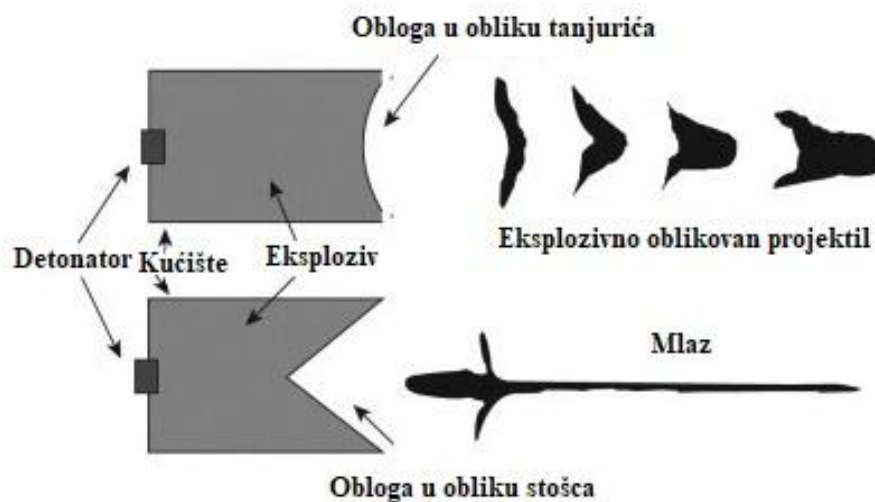
**Slika 6-4** Poprečni presjek ciljnog bloka koji prikazuje dobiveni profil prodora kumulativnog naboja (William P. Walters, 2006)

Konstrukcija naprave za stvaranje eksplozivno oblikovanih projektila sličan je onom za stvaranje kumulativnog naboja, osim što je obloga konkavnog oblika, a ne stožasta (slika 6-5).



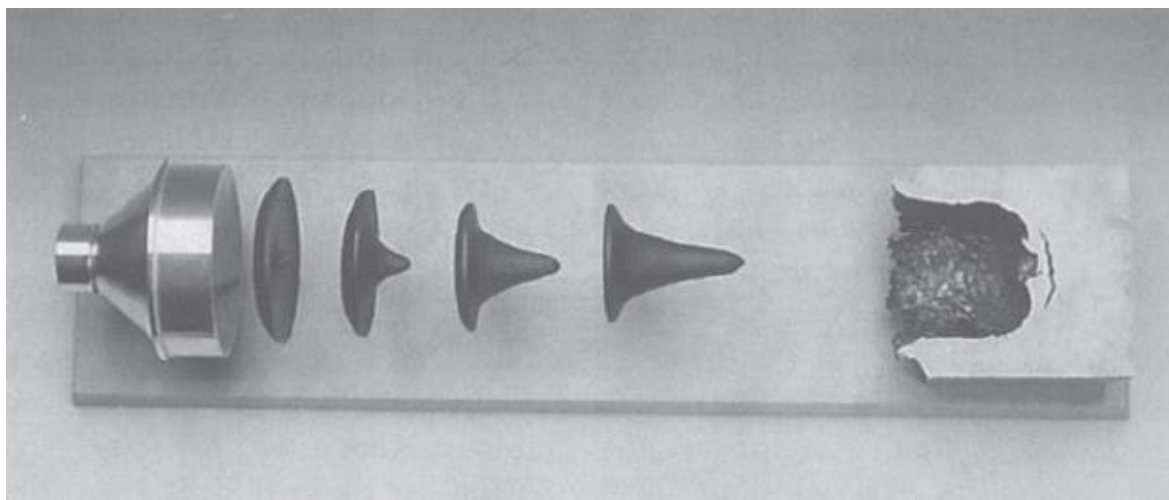
**Slika 6-5** Usporedba obloga kumulativnog naboja i eksplozivno oblikovanog projektila (EFP). Lijevo: Obloga kumulativnog naboja. Desno: EFP obloga (Weickert, 1998)

Na slici 4-6 prikazana je usporedba procesa formiranja mlaza kumulativnog rezača i kumulativnog projektila. Osim razlike u korištenom obliku obloge prikazana je i razlika u nastalim projektilima, odnosno prikazan je eksplozivno oblikovan projektil dobiven korištenjem blago zaobljene konkavne obloge u obliku tanjurića i mlaz dobiven detonacijom kumulativnog naboja kod kojega se koristi obloga stožastog oblika.



**Slika 6-6** Razlika između kumulativnog naboja i eksplozivno oblikovanog projektila (French, 2010)

Detonacija eksploziva urušava cijelu oblogu u jedan projektil velike brzine (slika 6-7.) obično 2-3 km / s. Tako da udaljenost s koje EFP uređaj može djelovati može biti veća od 100 m. U usporedbi s uređajima koji rade na principu kumulativnog naboja, dubina prodiranja EFP-a (0,8-1 promjera) mnogo je manja, no promjer probušenja u meti je znatno veći. Slično kumulativnim nabojima, tijekom godina se koristilo mnogo različitih dizajna obloga i materijala za izradu EFP-a za različite primjene.



**Slika 6-7** Formiranje eksplozivno oblikovanog projektila (Weickert, 1998)

Ovo poglavlje pokriva tri područja primjene u rušenju: (i) probijanje zida; (ii) rušenje mosta; i (iii) zbrinjavanje ubojnih eksplozivnih sredstava (ZES). Budući da eksplozivno oblikovani projektili predstavljaju najnoviju tehniku rušenja, prvi odjeljak detaljno pokriva mehaniku EFP-a. Ostale tehnologije opisane su ovisno o primjeni.

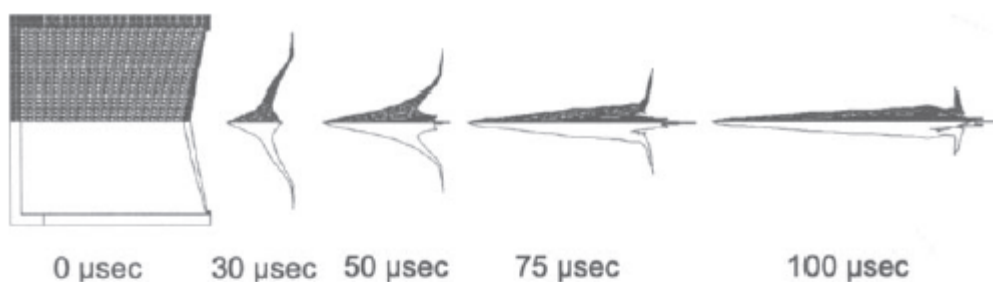
### 6.1. Konstrukcija eksplozivno oblikovanih projektila

Izvedba eksplozivno oblikovanih projektila uključuje mnoge parametre koji utječu na karakteristike projektila. Fizička i detonacijska svojstva eksploziva, obloga i materijala kućišta su neki od ovih parametara. Ostali su parametri geometrijski, poput oblika obloge, dimenzija kućišta, promjera naboja, itd. Uspješno dizajniran EFP imati će svojstva koja mu daju sposobnost da savlada određenu strukturu, odnosno prepreku koja ima određenu primjenu (Weickert, 1998).

Postoji nekoliko tehnika za dobivanje EFP-a određenog oblika. Jedna od tehnika je preklapanje ruba obloge prema naprijed (slika 4-8 gore) ili unatrag (slika 4-8 sredina) s obzirom na središte obloge. Alternativno, obloga se može preklopiti u oblik slova "W" (slika 4-8 dolje). Svaka od ovih vrsta oblika projektila može se postići izvedbom konture obloge i



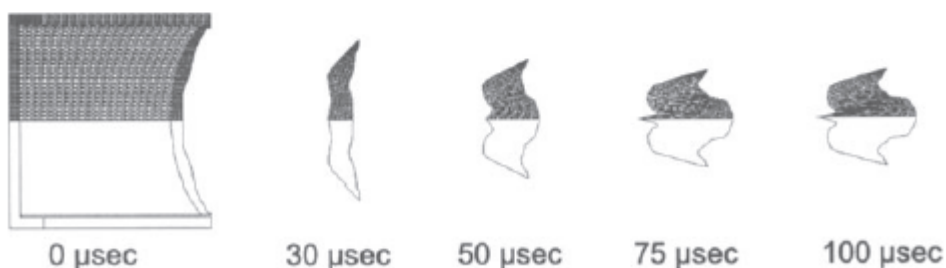
/ ili oblikom eksplozivnog punjenja. Izvedba koja će se koristiti ovisi o određenoj primjeni. Općenito, unaprijed preklapljene obloge rezultiraju duljim EFP-ovima u usporedbi s unazad preklapljenim oblogama i stoga imaju veću sposobnost prodiranja, međutim gradijent brzine u projektilu obično uzrokuje njihovo razbijanje na nekoliko dijelova, što ograničava njihov domet. Unazad preklapljene obloge rezultiraju projektilom boljih aerodinamičkih karakteristika i samim time većim dometom. Budući da većina primjena EFP tehnologije zahtijeva dugo zadržavanje i dubok prodor u strukturu (metu), većina istraživanja provedena je na izvedbi s unatrag preklapljenim oblogama.



**Simulacija preklapanja ruba obloge prema naprijed**



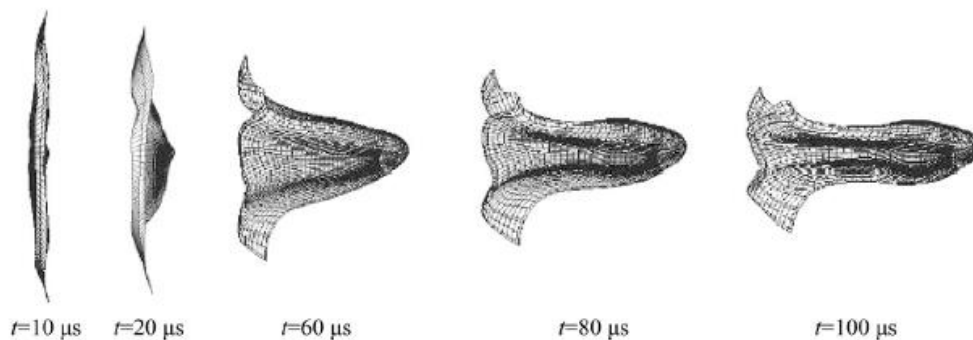
**Simulacija preklapanja ruba obloge prema natrag**



**Simulacija preklapanja ruba obloge u obliku slova "W"**

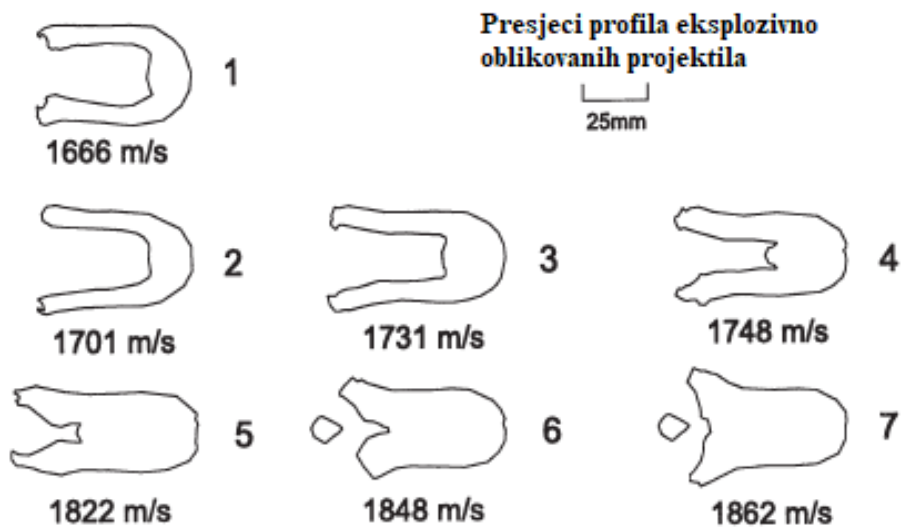
**Slika 6-8** Prikaz različitih vrsta preklapanja obloga (Weickert, 1998)

Parametri izvedbe projektila odabiru se ovisno o namjeni naprave. Optimizacija EFP-a zahtijevaju eksperimentalna ispitivanja. Međutim, zbog velikog broja parametara koji kontroliraju stvaranje EFP-a, pristup temeljen na pokušajima i pogreškama uskoro postaje vrlo skup. Nadalje, brzina odvijanja događaja otežava dubinsko razumijevanje mehanike samo analitičkim i eksperimentalnim sredstvima. Stoga se EFP-i projektiraju pomoću tehnika numeričkog modeliranja u kombinaciji s rezultatima eksperimenata. Oni omogućuju dizajneru da istražuje i suzi broj parametara prije pokusa i pružaju uvid u mehaniku koja upravlja različitim fazama formiranja i prodiranja EFP-a u metu. Najteži aspekt numeričkog modeliranja je simuliranje ponašanja materijala obloge pri vrlo visokim napreznjima i brzinama prirasta napreznja. Sofisticirani konstitutivni modeli koji uključuju toplinsko omekšavanje, radno otvrdnjavanje, učinke brzine napreznja i jednadžbe stanja ugrađeni su u računalne kodove. Rezultati simulacija su podložni potrebi kalibriranja eksperimentalno dobivenim rezultatima. Unatoč tim ograničenjima, numeričko modeliranje vrlo se uspješno koristi u EFP dizajnu. Na slici 4-9 dan je primjer modeliranja eksplozivno oblikovanog projektila s „perajama“. Prilikom ispitivanja promatran je utjecaj pojedinih parametara na aerodinamičku stabilnost projektila. „Peraje“ poboljšavaju aerobalističke karakteristike i smanjuju otpor zraka eksplozivno oblikovanim projektilima (Liu, 2014).



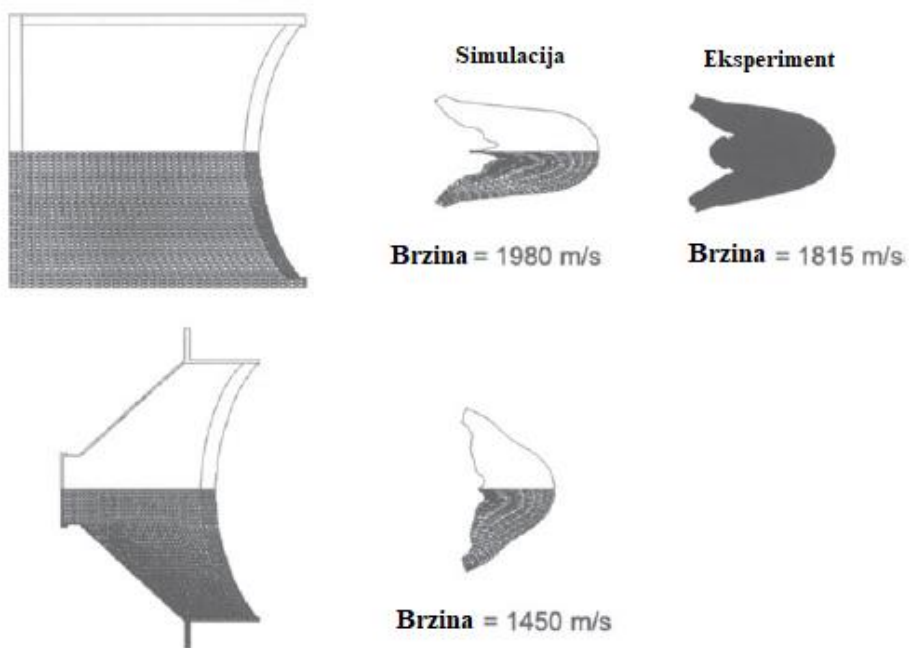
**Slika 6-9** Simulacija formiranja eksplozivno oblikovanog projektila s „perajama“ (Liu, 2014)

Konačni rezultat djelovanja EFP naprave je projektil velike brzine s određenim karakteristikama oblika i brzine. Svi konstrukcijski parametri, bilo geometrijski bilo materijalni, utječu na ove karakteristike. Unutar geometrijskih karakteristika, izvedba oblika obloge može se koristiti za izradu EFP-a određenog oblika. Međutim, jednako je važna geometrija kućišta ili zatvaranja. Jednostavnom promjenom debljine kućišta EFP naprave, rezultirajuća brzina i oblik projektila značajno se mijenjaju, kao što je prikazano na slici 6-10.

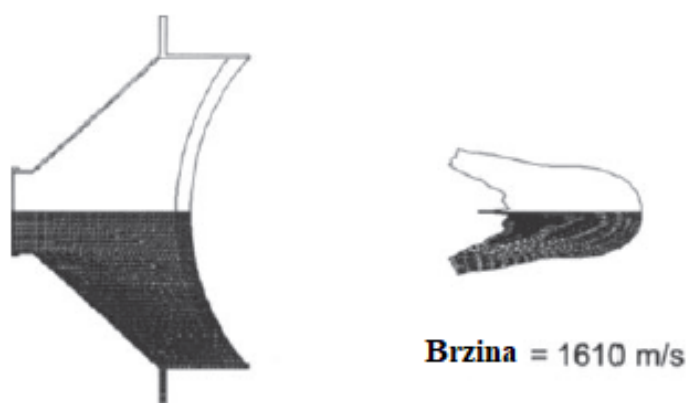


**Slika 6-10** Prikaz promjene brzine i oblika projektila promjenom debljine kućišta (Weickert, 1998)

Slično tome, promjena od cilindričnog naboja do konusnog naboja (radi smanjenja količine eksploziva) i stanjivanje kućišta (radi smanjenja težine), značajno utječe na karakteristike projektila koji je oblikovan kao što je prikazano na slici 6-11. Redizajniranjem profila obloge moguće je proizvesti isti oblik EFP-a, ali s nižom brzinom kao što je prikazano na slici 6-12.



**Slika 6-11** Prikaz promjene karakteristika projektila s obzirom na promjenu oblika naboja (Weickert, 1998)



**Slika 6-12** Prikaz projektila nakon redizajniranja obloge (Weickert, 1998)

Materijali koji se koriste za komponente naboja također definiraju EFP karakteristike. Na slikama 6-13 i 6-14 prikazana su četiri EFF-a iz pokusa zadržavanja projektila u mekom sredstvu koji su koristili naboje promjera 100 mm s identičnom geometrijom (kućište i obloga). Slomljeni EFP (slika 4-14 (dolje)) zapravo je bio netaknut tijekom leta, ali je pukao tijekom postupka zadržavanja u mekom sredstvu. Eksploziv za naboje bila je kompozicija B ili Oktol. Obloge su izrađene od Armco željeza ili tantala. Brizantniji eksploziv (Oktol) snažnije pogoni oblogu, što rezultira duljim tijelom EFP-a. Tantalna obloga stvara duži i gotovo ispunjen EFP u odnosu na Armco željezo EFP koji je šupalj. Primijetite razliku u brzini za EFP kao rezultat karakteristika materijala (posebno gustoće).

**Brzina = 1463 m/s**



**Brzina = 1618 m/s**

**Slika 6-13** EFP od Armco željeza. Gornji projektil: eksploziv sastava B. Donji projektil: Oktol (Weickert, 1998)

**Brzina = 848 m/s**



**Brzina = 957 m/s**

**Slika 6-14** EFP od tantala. Gornji projektil: eksploziv sastava B. Donji projektil: Oktol (Weickert, 1998)

U mnogim izvedbama eksplozivno oblikovanih projektila, cilj je proizvesti dugi projektil tipa štapa kako bi se povećala sposobnost proboja cilja. Međutim, dugački je projektil u svojoj osnovi nestabilan u letu. Ova nestabilnost može se ispraviti stabilizacijom pomoću

rotacije ili otporom (Weickert, 1986). Stabilizaciju rotacijom teško je postići kod EFP, pa stoga većina izvedbi EFP-a koristi stabilizaciju otporom. Rani projektili koji su koristili ovu tehniku imali su rašireni rep na projektilu, kao što je prikazano na slici 6-15 (gore). Razvijene su i izvedbe koje koriste peraje na repu projektila umjesto raširenog repa (Weimann, 1993a). Ova značajka smanjuje aerodinamički otpor projektila.



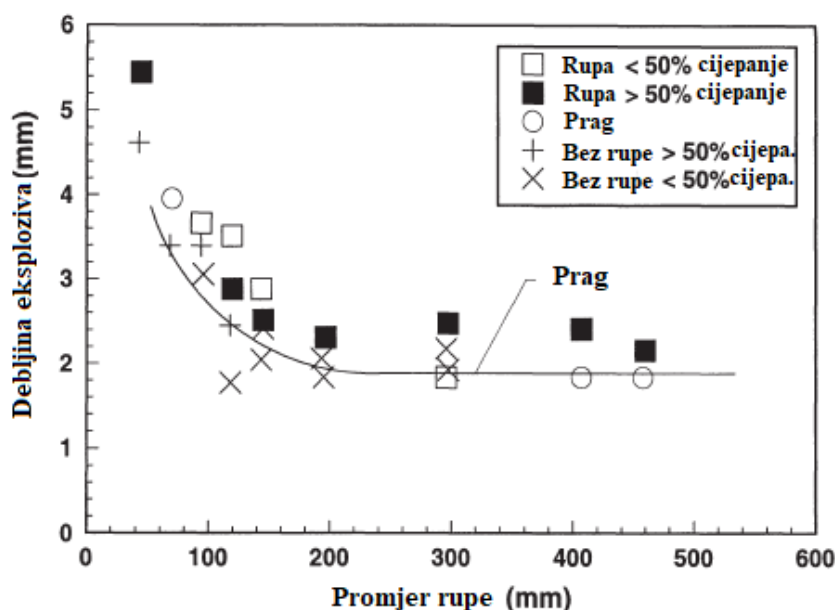
**Slika 6-15** EFP stabilizirani otporom. Gornji projektil: rašireni rep. Srednji projektil: rep s perajama. Donji projektil: rep s perajama i šiljasti nos (Weickert, 1998)

EFP sa šest peraja prikazan je na slici 6-15 (sredina). Aerodinamičke performanse mogu se dodatno poboljšati zamjenom tupog nosa na EFP-u sa šiljastim nosom kao što je prikazano na slici 6-15 (dolje) (Weickert i Gallagher, 1996).

## 6.2. Probijanje zidova

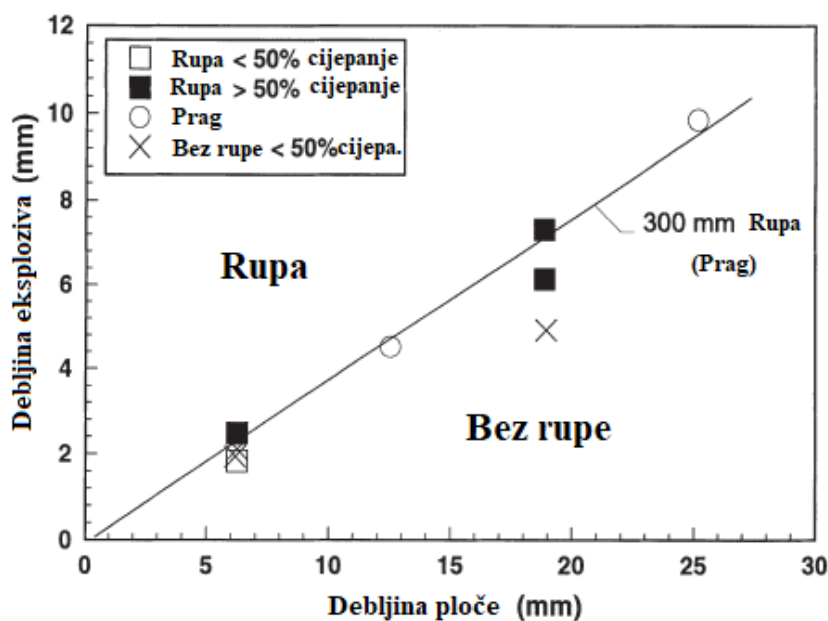
Postoje razne primjene, civilne i vojne, koje zahtijevaju brzi pristup kroz zid zgrade ili građevine. Probijanje zidova može se postići upotrebom eksploziva u rasutom stanju ili eksplozivnih naprava, poput oblikovanih nabojaja ili eksplozivno oblikovanih projektila. Odabrana tehnika ovisila bi o vrsti strukturnog materijala, na primjer; čelik, zidani ili armirani beton.

Eksplozivi u rasutom stanju mogu se koristiti u obliku slojeva ili blokova za probijanje zida. Uobičajeni parametar koji se određuje je količina eksploziva potrebna za stvaranje potrebne veličine rupe u određenoj meti. Na primjer, Shirey (1980) istražio je reakciju mekih čeličnih ploča na lomljenje eksplozivnim nabojima u obliku kružnih diskova u izravnom kontaktu s pločom. Određeni su pragovi eksplozivne debljine potrebni za probijanje čeličnih ploča u rasponu debljina od 6 mm do 25 mm. Utvrđeno je da je za određenu debljinu ploče granična eksplozivna debljina funkcija promjera rupe, odnosno proboja (nešto manja od promjera eksplozivnog diska) kako je prikazano na slici 6-16 (Weickert, 1998).



Slika 6-16 Prag debljine eksploziva za probijanje ploče od 6 mm (Shirey, 1980)

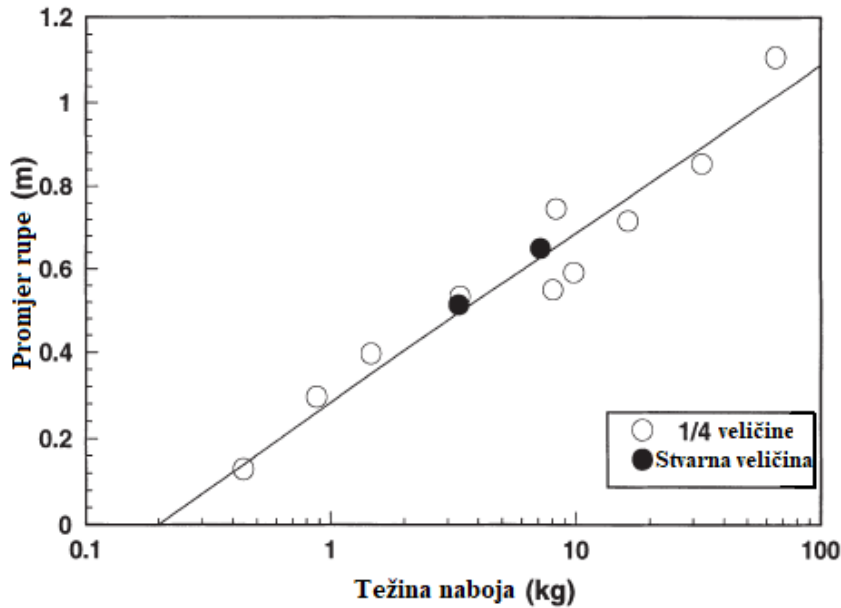
Za rupe velikog promjera (iznad kritične vrijednosti) eksplozivna debljina je konstantna. Kako promjer rupe postaje manji, rubni efekti detonirajućeg eksploziva postaju značajni, a povećava se debljina eksploziva potrebna za stvaranje proboja. Odnos između debljine ploče i praga eksplozivne debljine (za promjere rupa iznad kritične vrijednosti) je linearan, kao što je prikazano na slici 6-17.



Slika 6-17 Debljina ploče naspram debljine eksploziva (Shirey, 1980)

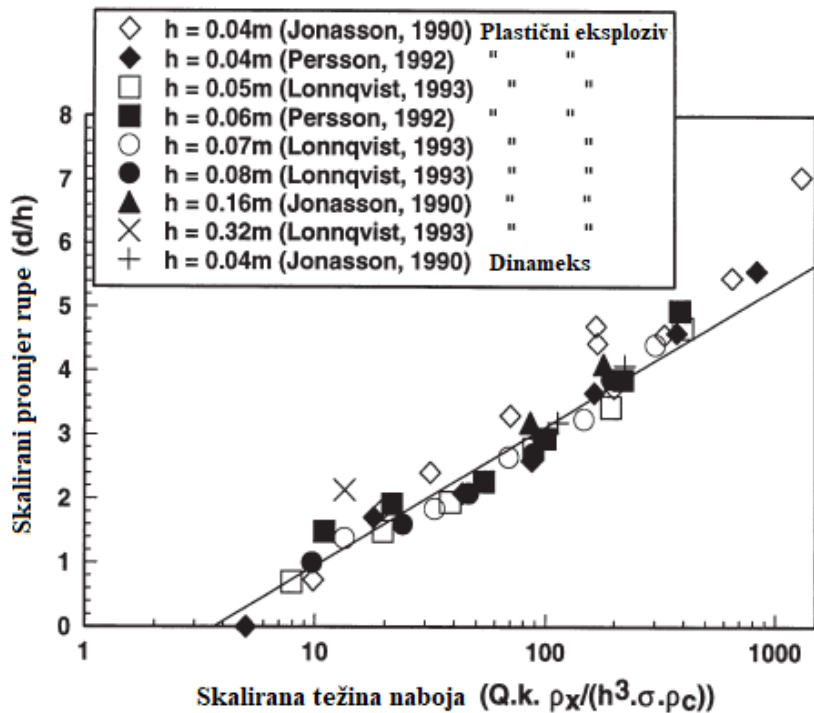
Niz eksperimenata za određivanje odnosa mase punjenja / promjera rupe za armiranobetonske ciljeve izveo je Jonasson, a izvijestio Forsen (1990). U pokusima su hemisfere eksploziva detonirane u izravnom kontaktu s armiranobetonskim ciljevima u mjerilu jedne četvrtine stvarne veličine i u punoj veličini kako bi se istražilo ponašanje skaliranja. Rezultati pokusa dati su na slici 6-18. Postoji linearni odnos između promjera rupe i logaritma mase eksplozivnog punjenja. Također su prikazani skalirani rezultati. Ispitivanja su također provedena sa sfernim, kubičnim i cilindričnim nabojima. Utvrđeno je da su ove konfiguracije naboja dale približno iste rezultate kao i hemisferični naboji (Weickert, 1998).





Slika 6-18 Rezultati eksperimenta za određivanje odnosa mase punjenja i promjera rupe (Forsen, 1990)

Ovo istraživanje proširio je Lonqvist (1993) kako bi uključio dodatne parametre i razvio bezdimenzionalni odnos težine naboja / promjera rupe. Provedeni su dodatni eksperimenti i podaci su kombinirani s prethodnim radovima Jonassona i Perssona. Rezultati su dati na slici 6-19.



Slika 6-19 Bezdimenzionalni odnos težine naboja / promjera rupe (Lonqvist, 1993)

$$\frac{d}{h} = 0,919 \ln\left(\frac{Qk\rho_x}{h^3\sigma\rho_c}\right), \quad (6-1)$$

gdje su:

d = promjer rupe (m),

h = debljina ploče (m),

Q = težina eksplozivnog naboja (kg),

k = energija eksploziva (J/kg),

$\rho_x$  = gustoća eksploziva ( $\text{kg/m}^3$ ),

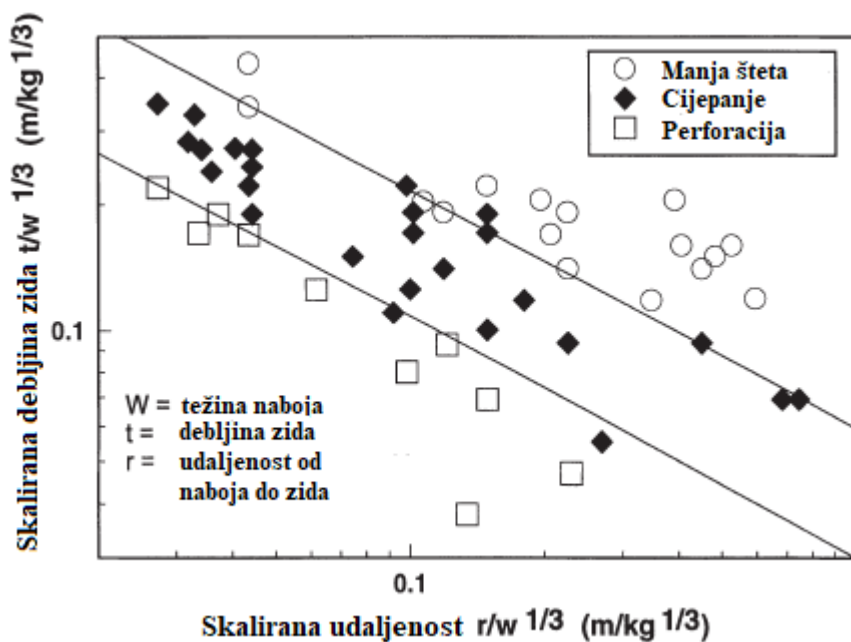
$\sigma$  = čvrstoća betona (Pa),

$\rho_c$  = gustoća betona ( $\text{kg/m}^3$ ).

Do lomljenja armiranobetonskih zidova eksplozivima u rasutom stanju može doći i kada eksplozivni naboj nije u dodiru s konstrukcijom. Ovo nije tipična situacija za rušenje građevina, međutim važno je iz sigurnosnih razloga u područjima u kojima se rukuje eksplozivima ili eksplozivnim uređajima, na primjer u tvornici streljiva. Za ovu vrstu situacije važna je obrada betona sa stražnje strane zida. Razina oštećenja armiranobetonskog zida od eksplozivnog naboja uglavnom je funkcija veličine naboja, udaljenosti od naboja do zida (odstojanje) i debljine stjenke. Ostali sekundarni parametri uključuju čvrstoću betona i ojačanje. Fizički procesi koji se događaju kada se odstojanje smanjuje su sljedeći:

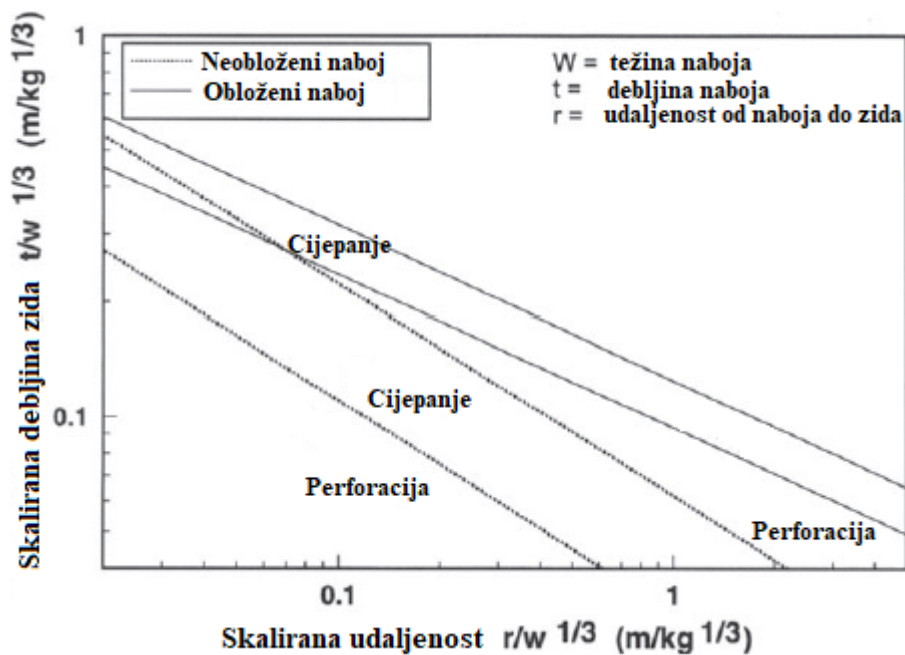
- (i) male pukotine i površinski krater;
- (ii) otklon zida i značajne pukotine;
- (iii) cijepanje na stražnjoj površini zida;
- (iv) prodiranje i
- (v) perforacija i ekstremno savijanje materijala za ojačanje.

Ti su procesi tipično povezani s kategorijama oštećenja jer je teško kvantificirati učinke svih parametara koji su uključeni. Hader (1983) koristi tri kategorije; Manja oštećenja, cijepanje i perforacija. Rezultati ispitivanja s neobloženim eksplozivnim nabojima dati su na slici 6-20. Logaritamski grafik omogućuje da razgraničenje kategorija oštećenja bude predstavljeno paralelnim ravnim crtama.



Slika 6-20 Oštećenja armiranobetonskih zidova neobloženim eksplozivnim nabojima (Hader 1983)

U drugoj seriji ispitivanja korišteni su naboji s metalnom oblogom. Usporedba rezultata kategorije oštećenja neobloženog i obloženog naboja prikazana je na slici 6-21. Najvažniji zaključak sa ove slike je da obloženi naboj rezultira perforiranjem armiranobetonskih zidova na udaljenostima do deset puta većim od neobloženog naboja iste težine.



Slika 6-21 Usporedba oštećenja od obloženih i neobloženih naboja (Hader, 1983)

Sljedeća tehnika za probijanje zida je uporaba linearnog kumulativnog naboja. Ova vrsta punjenja daje dugi rez u meti, obično duboko 1-2 širine grla. Linearni kumulativni naboji mogu se konstruirati pomoću plastičnog eksploziva i lima ili su komercijalno dostupni u širokom rasponu veličina i vrsta (primjeri na slici 6-22).



**Slika 6-22** Primjer komercijalno dostupnih linearnih kumulativnih naboja (EBAD, 2021)

Kumulativni naboji primjenjuju se u dodiru sa zidom u "cookie cutter" rasporedu i uklanjaju dio materijala sa zida. Primjer ove tehnike prikazan je na slici 6-23. Ovaj proizvod, koji se prestao proizvoditi, dizajniran je za upotrebu od strane vatrogasaca za odzračivanje zapaljenih zgrada.



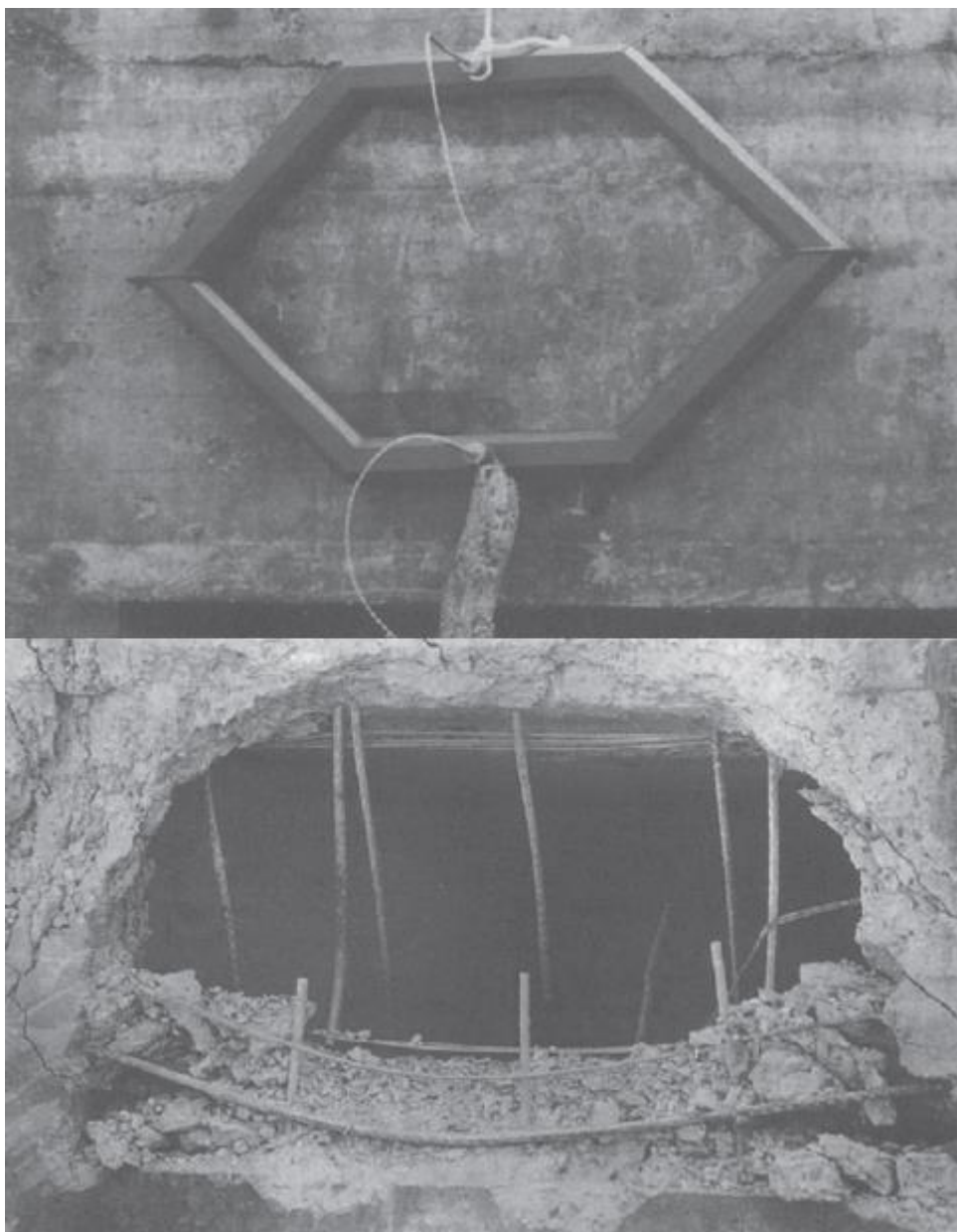
**Slika 6-23** Primjer korištenja kumulativnog naboja u dodiru sa zidom (Weickert, 1998)

Uređaj za razbijanje zida "Breachcase" za vojne primjene prikazan je na slici 6-24. Dva odsječka linearnog oblika naboja u obliku slova U smještene su u sklopivo kućište za skladištenje i transport. Kada je uređaj potreban, on se jednostavno otvori, tvoreći pravokutni naboj, pozicioniran se uza zid i daljinski aktiviran (Weickert, 1998).



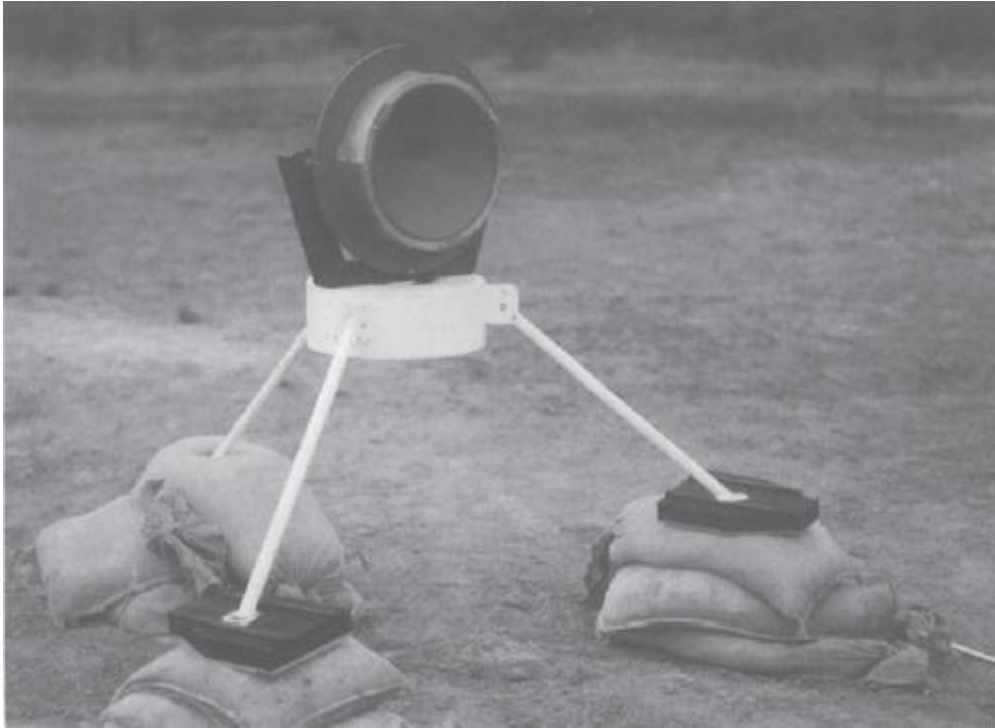
**Slika 6-24** Primjer uređaja za razbijanje zidova "Breachcase" za vojne primjene (slika lijevo) i rezultati njegovog djelovanja (slika desno) (Weickert, 1998)

Linearni kumulativni naboji ispunjeni nitrometanom također su korišteni za probijanje zida kao što je prikazano na slikama 6-25. Naboj (širina grla 8 cm, šest dijelova duljine 46 cm) probio je rupu široku približno 205 cm i visoku 128 cm kroz armirani beton debeo 45 cm.



**Slika 6-25** Primjer linearnog kumulativnog naboja ispunjenog nitrometanom (slika gore) i rezultati njegovog djelovanja (slika dolje) (Weickert, 1998)

U situacijama kada izravni kontakt naboja nije moguć, eksplozivno oblikovani projektili mogu se koristiti zbog njihove sposobnosti daljinskog djelovanja. Na slici 6-26 prikazan je uređaj za rušenje - EFP promjera 300 mm koji proizvodi unazad preklopljeni projektil.



**Slika 6-26** Prikaz uređaja za rušenje - EFP promjera 300 mm (fotografiju omogućena od strane Organizacije za znanost i tehnologiju obrane, Australija) (Weickert, 1998)

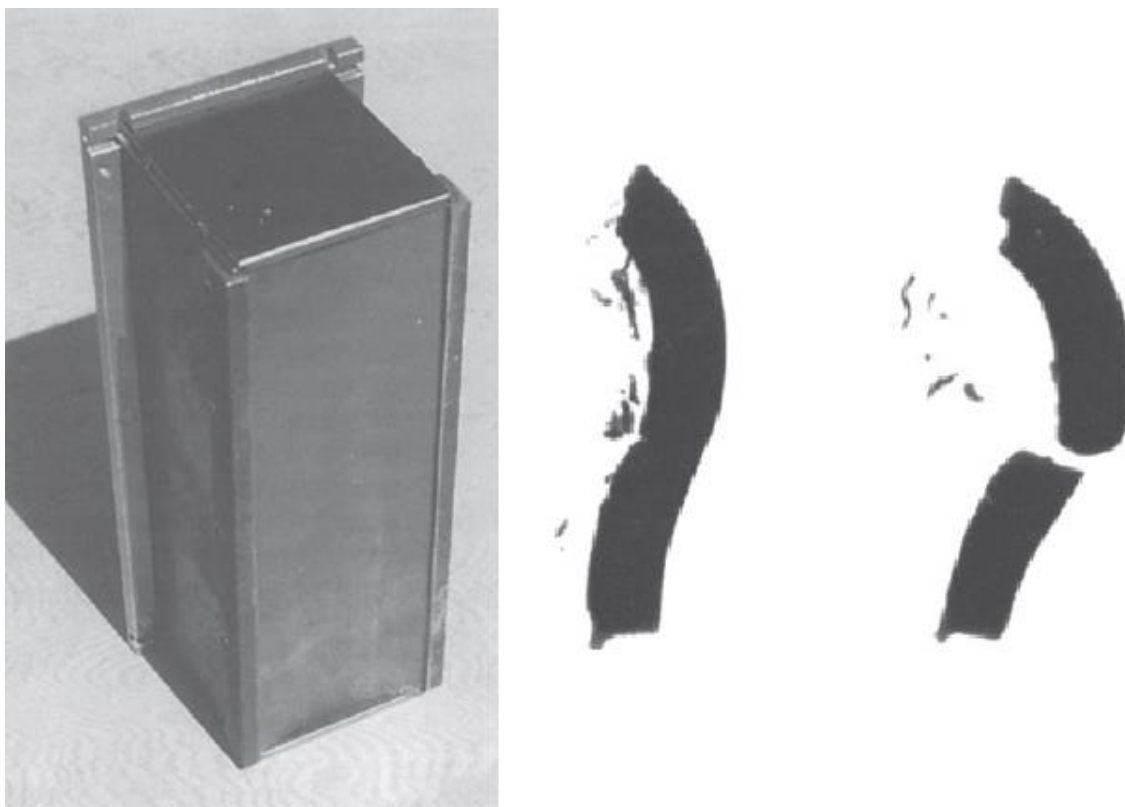
Ovaj uređaj ima značajnu probojnu moć kod probijanja armiranog betona kao što je prikazano na slici 6-27. EFP je probio prva dva betonska zida s dovoljno zaostale energije da sruši treći zid (nije prikazan).



**Slika 6-27** Prikaz armiranobetonskih zidova probijenih eksplozivno oblikovanim projektilom (Weickert, 1998)

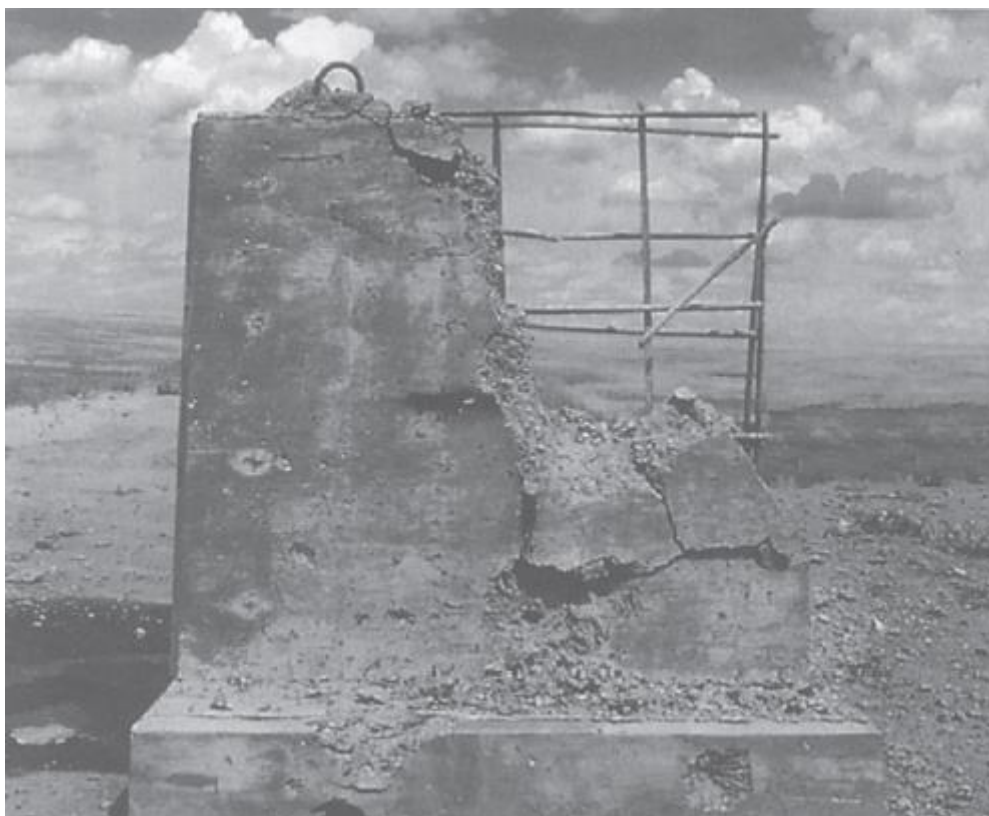
Slično kumulativnim nabojima, može se proizvesti linearni naboj. Primjer linearnog EFP uređaja (8 cm x 8 cm x 25 cm) prikazan je na slici 6-28 (lijevo). Sastoji se od čeličnog kućišta, bakrene obloge i eksplozivnog punjenja od 2,5 kg sastava B (Weickert, 1998).





**Slika 6-28** Linearni EFP (slika lijevo) i ispaljeni projektil razbijen u nekoliko dijelova prikazan na radiogramu (slika desno) (Weickert, 1998)

Testna ispaljivanja uređaja s ravnim inicijalnim sustavom rezultirala su projektilom koji se razbio u nekoliko dijelova kao što je prikazano na radiogramu (slika 6-28 desno). Iako se projektil slomio, značajna šteta je napravljena na 200 mm debeloj armiranobetonskoj meti udaljenoj 8 m (slika 6-28). Da bi se poboljšale performanse ovog linearnog EFP testnog uređaja, kako bi proizvodio jedan projektil, potreban bi bio usmjerivač vala u eksplozivu ili složeniji dizajn obloge. Na slici 6-29 prikazana je šteta na armiranobetonskom zidu načinjena od strane linearnog EFP-a.



**Slika 6-29** Šteta na armiranobetonskom zidu načinjena od strane linearnog EFP-a (Weickert, 1998)

### 6.3. Rušenje mostova

Tehnike rušenja mostova ovise o mnogim čimbenicima, kako tehničkim, tako i taktičkim. U civilne svrhe cilj bi bio ukloniti stari dotrajali most. U ovom slučaju, cilj bi bio izrezati most na dijelove koji se mogu lako ukloniti. Važno aspekt eksplozivnih rušenja je kolateralna šteta na obližnjim objektima. Vojni cilj ovisio bi o konkretnoj situaciji. Jedan od primjera bio bi stvaranje praznine u konstrukciji mosta dovoljno velike da se preko nje ne može prijeći jurišnom opremom za premošćivanje, čime se onemogućuje promet vozila. Glavni tehnički parametri rušenja uključuju: dizajn mosta, građevinske materijale i dimenzije ključnih elemenata konstrukcije. Eksplozivi u rasutom stanju, kumulativni naboji, eksplozivno oblikovani projektili ili njihove kombinacije mogu se koristiti za rušenje mostova (Weickert, 1998).

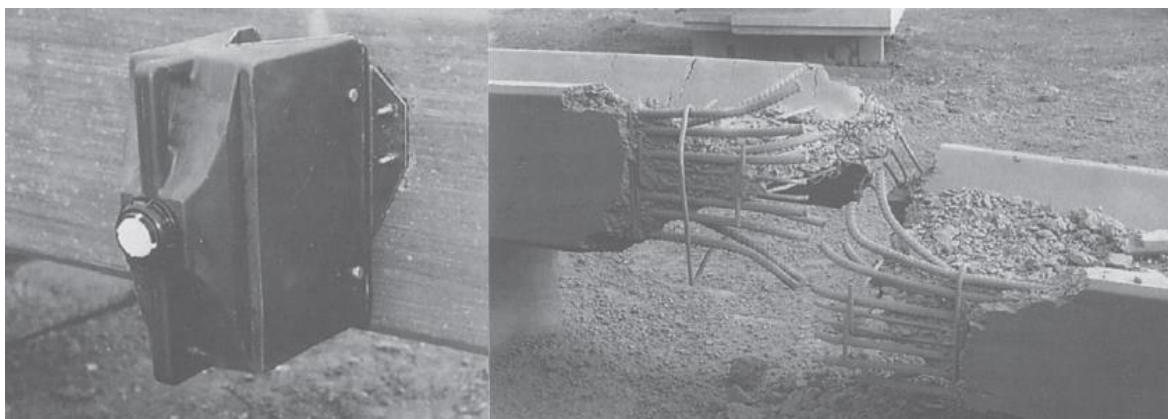
Eksplozivi u rasutom stanju mogu se primijeniti na rušenje mosta pomoću nekoliko metoda. Velike količine eksploziva mogu se jednostavno natovariti na površinu mosta i aktivirati se, uzrokujući uklanjanje određenog raspona mosta ili urušavanje cijeloga mosta. Efikasnije korištenje eksploziva može se postići ciljanjem ključnih elemenata mosta. Uklanjanjem ovih elemenata most se može srušiti pod vlastitom težinom. Primjer rezanja

čelične grede pomoću eksploziva C4 prikazan je na slici 6-30. Korištenje eksploziva u rasutom stanju za uništavanje armiranobetonskog elementa mosta obično skida beton s elementa, a armatura ostaje netaknuta. Ovisno o izvedbi mosta, ovo bi moglo biti dovoljno da se most uruši pod vlastitom težinom, inače bi za rezanje armature trebao biti upotrijebljen sekundarni postupak (na primjer linearni kumulativni naboj). Postoje razne priručne formule za izračunavanje količine eksploziva potrebne za uklanjanje cjelokupnog betona za zadani radijus iz punjenja (Weickert, 1998).



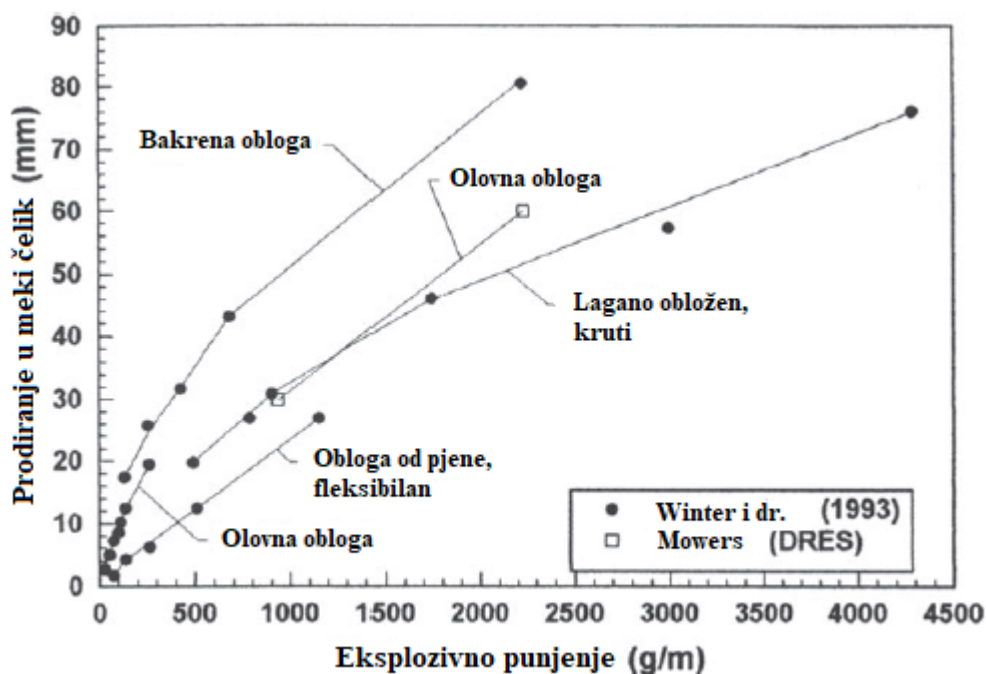
**Slika 6-30** C-4 eksploziv pričvršćen na čeličnu gredu (slika lijevo) i prikaz štete koju je eksploziv napravio (slika desno) (Weickert, 1998)

Linearni kumulativni naboji također se mogu koristiti za učinkovito rušenje mostova. Masivni linearni kumulativni naboj mogu se postaviti na kolnički zastor mosta i kada se aktiviraju, presjeći kolnički zastor i grede ispod. Alternativno, veliki linearni kumulativni naboj mogu se montirati na donju stranu greda mosta na prirubnici, kao što je prikazano na slici 6-31 (lijevo), za kumulativni naboj od 10 kg na armiranobetonskoj gredi. Ova je greda za eksperiment okrenuta na bok. Izrezano je sve ojačanje, osim malih šipki na vrhu grede.



**Slika 6-31** Prikaz kumulativnog naboja pričvršćenog za donju stranu armiranobetonske grede (slika lijevo) i šteta nastala otpucavanjem kumulativnog naboja (slika desno) (Weickert, 1998)

Radovi Joachima (1983, 1985) pružaju korisne informacije o konstrukcijskim parametrima linearnih kumulativnih naboja slične veličine, prikladne za ovu primjenu. Mali kumulativni naboji također se mogu koristiti u rasporedu sličnom onomu C4 naboja prikazanim ranije, gdje su naboji postavljeni na tijelo i priрубnicu grede. Postoje mnoge veličine i vrste linearnih kumulativnih naboja, ovisno o proizvođaču i primjeni. Tipični rezultati performansi prodiranja prikazani su na slici 6-32.



**Slika 6-32** Penetracijski učinak linearnih kumulativnih naboja (Weickert, 1998)

Za primjere sa složenom geometrijom poželjno je imati linearni kumulativni naboj koji je fleksibilan i može se oblikovati tako da odgovara ciljanoj površini. Naboji obloženi olovom manjih veličina mogu se saviti ručno, što kod većih naboja nije moguće. Ovaj je zahtjev doveo do razvoja fleksibilnog linearnog kumulativnog naboja nazvanog Explosive Cutting Tape (slika 6-33). Proizvod se sastoji od obloge od bakrenog praha u plastičnom matriksu s plastičnim eksplozivom. Obložni materijal je zatvoreni stanični pjenasti polietilen (Winter i dr. 1993).

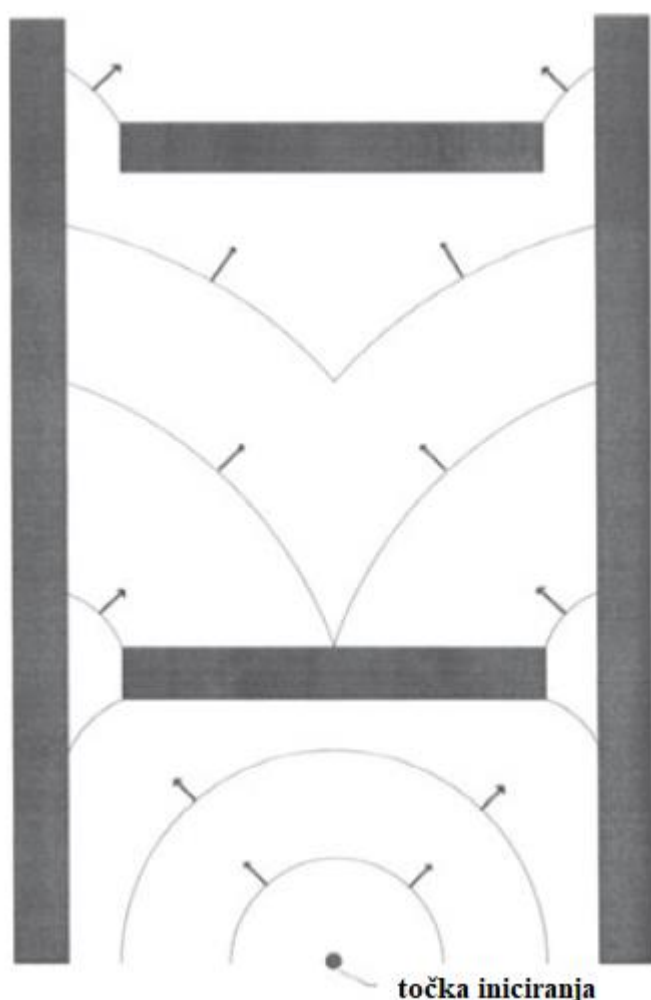


**Slika 6-33** Prikaz komercijalno dostupnih ECT-a i primjer njihovog djelovanja (Sciencemadness Discussion Bord, 2020)

Druga metoda rušenja čeličnih greda ili ploča je korištenje visokog tlaka, koji nastaje sudaranjem udarnih valova, za lomljenje metalne mete. Postoji nekoliko proizvoda temeljenih na ovom konceptu, Shock-wave Refraction Tape (SRT) i Ladder Fracture Tape (LFT). SRT se sastoji od zakrivljene trake magnetne gume s malim utorom na donjoj strani, kako bi se potaknulo pucanje mete. Ovisno o eksplozivnom opterećenju, na gumenoj traci je od jednog do četiri sloja eksploziva (slika 6-34). Za naboje s više od jednog sloja eksploziva, veća brzina detonacije gornjeg sloja eksploziva, u usporedbi s donjim slojem

eksploziva, koristi se za pojačavanje fokusiranja valova. SRT uzrokuje stvaranje područja visokog tlaka u meti, nakon čega slijedi relaksacija tlaka, koja lomi metu.

Ladder Fracture Tape sastoji se od trake od neoprenske gume s kanalima koji se mogu napuniti plastičnim eksplozivom (Masinskas i van Leeuwen, 1987). Nakon što se kalup ispuni eksplozivom, izbočena guma nalikuje prečkama i šinama na ljestvama. Detonacijom eksploziva s jednog kraja ljestava stvara se val koji putuje oko oba kraja prečke i dijeli se na dva vala koji se sudaraju natrag u središtu ljestvi, kao što je prikazano na slici 6-34. To uzrokuje stvaranje područja visokog tlaka koje se nastavlja do sljedeće barijere, a zatim se postupak ponavlja. Prelamanje valova u metu uzrokuje cijepanje površine i prijelom ciljane ploče ispod središnje linije LFT-a.



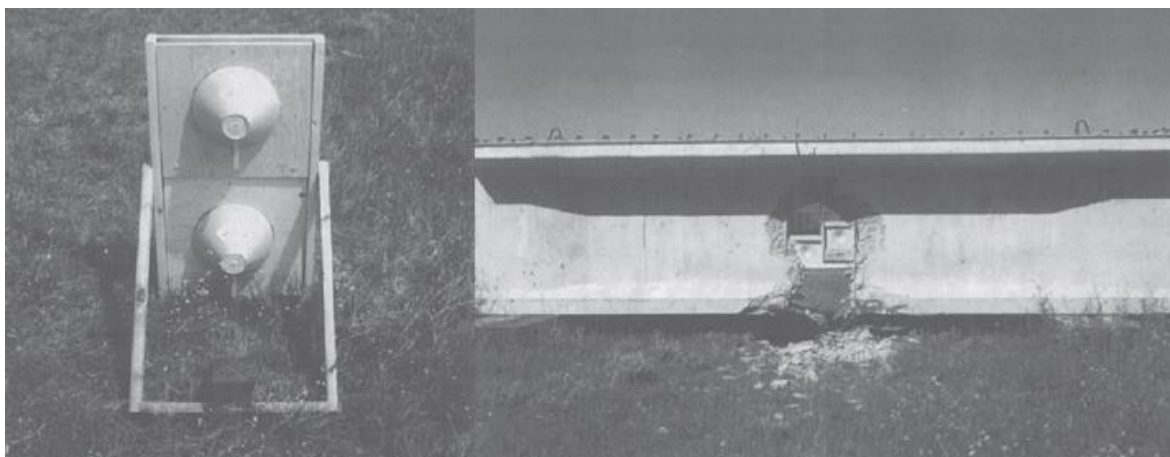
**Slika 6-34** Shematski prikaz funkcioniranja LFT-a (Weickert, 1998)

Jedna od posljednjih tehnika rušenja mostova odnosno slamanja grede korištenjem izravnog dodira s objektom koji želimo rušiti je uporaba ekstrudiranog eksploziva koji se može primijeniti izravno na tijelu i prirubnici grede kako je prikazano na slici 6-35.



**Slika 6-35** Prikaz korištenja ekstrudiranog eksploziva (slika lijevo) i rezultat otpucavanja istoga (slika desno) (Weickert, 1998)

Nedostatak naboja s izravnim kontaktom je taj što se moraju pričvrstiti na gredu mosta ili na dio koji se ruši. To može biti posebno dugotrajno i opasno za osoblje koje raspoređuje naboje. U tehnika rušenja mosta s odstojanja ovi nedostaci mogli bi se ukloniti korištenjem eksplozivno oblikovanih projektila koji su ispaljeni daljinski s određene udaljenosti od mete (deseci metara). Projektil bi probio beton i izrezao dio armature, u osnovi uklanjajući svu nosivost grede. Kad bi se to primijenilo na svim nosivim gredama mosta, most bi se srušio pod vlastitom težinom. Ovu tehniku istraživali su Worswick i sur. (1989.) pomoću EFP uređaja nazvanog "Powercone", razvijenog za rudarsku industriju. Utvrđeno je da su uređaji učinkoviti u razbijanju velikih presjeka armiranog betona. Na slici 6-36 prikazan je uređaj "Powercone" i rezultati otpucavanja dva Powercone uređaja u 1,5 m duboku armirano-betonsku gredu T-presjeka debljine 0,35 m.



**Slika 6-36** Prikaz uređaja "Powercone" (slika lijevo) i rezultati otpucavanja samoga uređaja (slika desno) (Weickert, 1998)

#### 6.4. Zbrinjavanje ubojnih eksplozivnih sredstava

U najopćenitijem smislu, izraz zbrinjavanje ubojnih eksplozivnih sredstava (ZUES) odnosi se na neutralizaciju eksplozivnih naprava. To uključuje mnoge vrste vojnih uređaja kao što su bombe, bojeve glave, minobacači i mine, kao i civilne uređaje poput terorističkih bombi. Iako su neke tehnike neutralizacije primjenjive na obje vrste, ova će rasprava biti ograničena na komercijalno proizvedene vojne uređaje. U neutralizaciji terorističke bombe tehnika koja se može primijeniti je razoružavanje detonatora, na primjer, pomoću eksplozivne tekućine (Petrousky i sur., 1990), dok je za vojne primjene poželjno neutralizirati glavni eksplozivni naboj. Opseg se dalje smanjuje tako da obuhvaća samo neeksplozivna ubojna sredstva (NUS), a ne i demilitarizaciju ubojnih sredstava. Razlog tome je što se tehnike demilitarizacije ubojnih sredstava potpuno razlikuju od neutralizacije NUS-a, na primjer, korištenjem kavitacijskih mlaznica vode za ispiranje eksploziva iz zastarjelog streljiva (Conn, 1986).

Tehnika koja se koristi za neutraliziranje NUS-a ovisi o mnogim čimbenicima kao što su veličina i vrsta ubojnih sredstava, mehanizam spajanja, vrsta eksplozivnih materijala sadržanih u bojnem sredstvu, ako je potrebna detonacija /deflagracija / izgaranje, blizina važnih postrojenja i vrijeme dodijeljeno za izvršenje neutralizacije. Razmatranje ovih čimbenika određuje treba li koristiti projekte, rasute eksplozive, eksplozivne trake, oblikovane naboje ili eksplozivno oblikovane projekte (Weickert, 1998).

Prva stavka koju treba razmotriti je mjesto NUS-a. Ako u blizini nema važnijih građevina i sve se osoblje može zaštititi od eksplozije i fragmenata, tada je najjednostavnija metoda koja se može upotrijebiti pod uvjetom da u blizini, pričvršćeno na ili unutar sredstva nema



mina iznenađenja, jest upotreba eksplozivnog punjenja u rasutom stanju (blok, sloj, ekstrudirani ili pjenasti) u kontaktu s bojnim sredstvima. Detonacija eksploziva prouzročit će iniciranje detonacije brizantnog punjenja NSU-a. Ako NUS iz različitih razloga nije moguće aktivirati in situ, tada su na raspolaganju dvije mogućnosti. Prvo je učiniti NUS sigurnim uklanjanjem ili neutralizacijom mehanizma iniciranja i transportom NUS-a na drugo mjesto na kojem će se neutralizirati. Druga opcija je neutraliziranje NUS-a in situ, ali korištenje metode koja je manje nasilna od detonacije.

Da bi se eksplozivno sredstvo učinilo sigurnim, osigurač mora biti uklonjen s uređaja ili mora biti nefunkcionalan. Uklanjanje osigurača s predmeta kao što su nagazne mine izuzetno je teško jer je sigurnosni mehanizam unutar mine. Iako je neutralizacija osigurača u nagaznoj mine moguća kumulativnom nabojem, teško je utvrditi stanje osigurača nakon ispaljivanja kumulativnog naboja. Za predmete poput granata 105 mm, osigurač strši s prednje strane kućišta, što ga čini jednostavnijim za osiguranje. Za ovu se primjenu mogu koristiti kumulativni naboji, ali situacija je slična kao i s nagaznim minama teško procijeniti stanje osigurača nakon iniciranja kumulativnog naboja. To su demonstrirali Chick i sur. (1994) gdje je na spoj osigurača i kućišta granate 105 mm ispaljen kumulativni naboj konvencionalnog oblika promjera 38 mm. Veći dio osigurača ostao je pričvršćen na granatu s eksplozivnim komponentama osigurača u nepoznatom stanju. Druga tehnika za neutralizaciju osigurača je uređaj za razoružavanje. Jedna od ovih vrsta uređaja koristi čahuru kalibra 0.50 za ispaljivanje cilindričnog projektila na osigurač (Vande Kieft i Bines, 1989.). Wyatt (1990) daje recenzije o ostalim vrstama uređaja za razoružavanje. Preferirana situacija je potpuno odvajanje osigurača od granate, čime se eliminira mogućnost funkcioniranja osigurača i detonacije granate. U tu su se svrhu vrlo uspješno koristili eksplozivno oblikovani projektili (Chick i sur., 1994). EFP uklanja osigurač iz granate bez paljenja eksplozivnog naboja koji se nalazi u granati. Budući da EFP-ovi imaju sposobnost daljinskog djelovanja, postupak osiguravanja provodi se bez potrebe za rukovanjem granatom, što je značajna prednost u odnosu na nekoliko drugih tehnika.

Nakon što se granata učini sigurnom, sljedeći je korak uklanjanje glavnog eksplozivnog punjenja. Jedna od tehnika je upotreba bušaćeg alata za izrezivanje rupe u kućištu granate. Ovo je prilično spor postupak i kao rezultat toga razvijeni su razni naboji za bušenje kako bi se stvorila rupa u kućištu granate čija je debljina stijenke do 12 mm bez pokretanja reakcije eksploziva, odnosno iniciranja naboja [de Jong i Kodde (1992)]. Jednom kada se u kućištu izreže rupa, tada se eksploziv može izvaditi, odnosno delaborirati iz granate i odložiti na

siguran način. To može biti prilično dugotrajan postupak, nekoliko sati, ovisno o veličini granate.

Ishod tehnike odabrane za neutraliziranje NUS-a in situ ovisit će o mnogim čimbenicima kao što je gore spomenuto. Mogući ishodi su senzibilizacija, sagorijevanje, prelazak sagorijevanja u deflagracija, prelazak deflagracije u detonaciju i detonacija eksplozivnog naboja. Jasno je da senzibilizacija eksplozivnog punila nije poželjan ishod. Na drugom kraju spektra detonacija obično nije poželjna (osim u posebnim okolnostima) zbog velikog utjecaja na okoliš. Željeni rezultat je spaljivanje ili deflagracija. Materijali ili uređaji koji daju ove rezultate su eksplozivi u rasutom stanju, projektili, kumulativni naboji, linearni kumulativni naboji, eksplozivne trake i eksplozivno oblikovani projektili (Weickert, 1998).

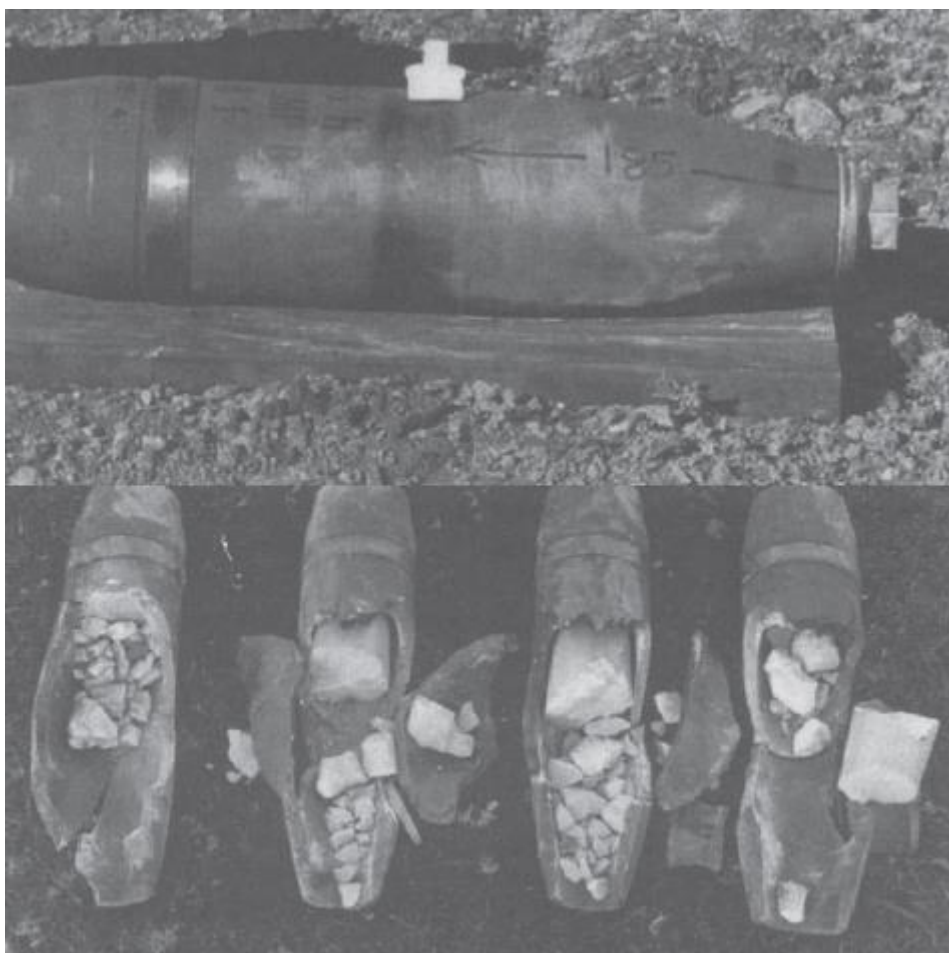
Kao što je prethodno spomenuto, eksplozivi u rasutom stanju mogu se koristiti za iniciranje detonacije brizantnog punjenja NUS-a. Na primjer, slika 6-37 prikazuje upotrebu eksplozivne pjene nitrometana koja se primjenjuje za neutralizaciju nagazne mine. Ova vrsta eksploziva uspješno se koristi za detonaciju raznih bombi i podstreljiva.



**Slika 6-37** Neutralizacija VS-50 mine pomoću pjene nitrometana (US Army Night Vision and Electronic Sensors Directorate (NVESD), 2003)

Eksploziv u rasutom stanju također se može koristiti za izazivanje deflagracija u bombi. Hubbard i Tomlinson (1989.b) koristili su hrpe eksplozivnih diskova ili kvadrata da bi uzrokovali deflagraciju izazvanu šokom u bombama. Ova tehnika razbija municiju na nekoliko dijelova, a veliki dijelovi nereagiranoeg eksploziva ostaju nakon događaja.

Postavljanje i rezultati ove vrste eksperimenta prikazani su na slici 6-38. Važan aspekt ove tehnike je odzračivanje plinova iz reakcijskog eksploziva. Ako je eksplozivni naboj u disku premali, tada se u streljivu može razviti višak tlaka, što rezultira nasilnom deflagracijom. Učinak odzračivanja detaljno je proučio Graham (1986). Ti su učinci važni i za ostale tehnike o kojima se govori u nastavku.

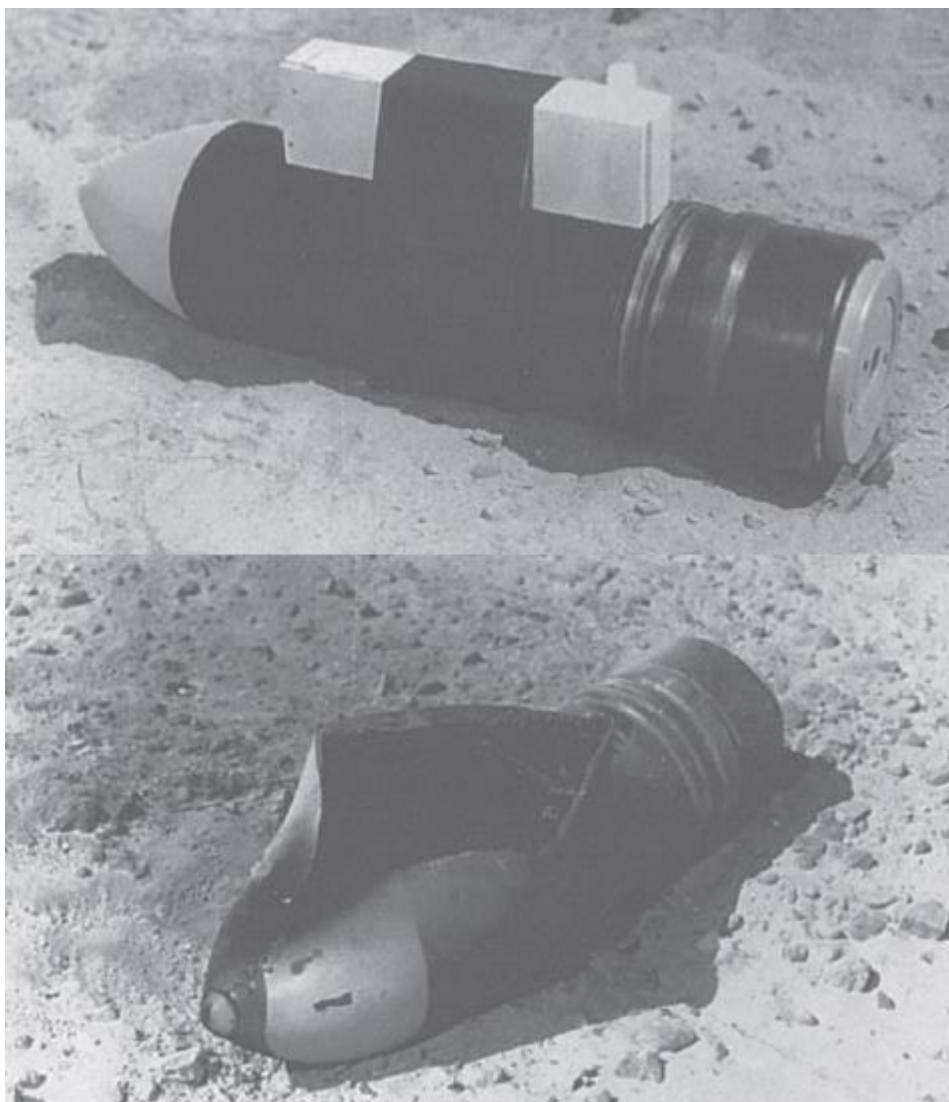


**Slika 6-38** Prikaz korištenja eksplozivnih diskova za neutralizaciju bombi (slika gore) i rezultat korištenja eksplozivnih diskova za neutralizaciju bombi (slika donja) (Weickert, 1998)

Djelovanje na NUS-a uporabom projektila predstavlja još jednu metodu neutralizacije. Howe i sur. (1981) proučavali su odgovor zatvorenih eksplozivnih punjenja na djelovanje pravilnih kružnih cilindara i eksplozivno pogonjenih letećih ploča. Hubbard i Tomlinson (1989.a) provodili su eksperimente s nizom projektila od 7,62 mm do 30 mm kojima su djelovali na razne bombe i projekte. Postignut je niz ishoda, u rasponu od nikakve reakcije do detonacije. Većina eksperimenata proizvela je deflagracije s različitim stupnjevima reakcije.

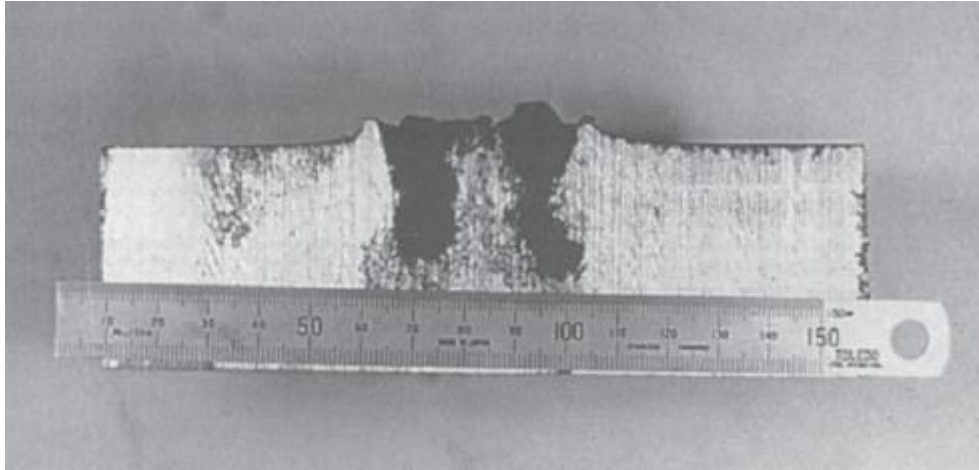
Značajan broj istraživanja proveden je na temu interakcije kumulativnih nabojâ s municijom [Held, 1987a, b, 1989; Chick and Hatt, 1981; Chick i sur., 1986a, b, c]. Primjenjiv je i na procjenu ranjivosti i na ZUES. U Chickovom radu utvrđeno je da je prag detonacije / neuspjeha vrlo osjetljiv na debljinu pokrova ili kućišta. Kao i kod udara projektila, može se postići čitav niz ishoda. Kao rezultat ovog istraživačkog napora, razvijen je protokol za procjenu opasnosti za kumulativni mlaz municije koja sadrži energetske materijale (Chick i Frey, 1990).

Linearni kumulativni naboji i eksplozivne trake dostupni su u širokom rasponu vrsta i veličina. Ovi uređaji mogu se koristiti za stvaranje proreza u municije i stvaranje otvora odgovarajuće veličine tako da se smanji rizik od ubrzanja reakcije eksplozivnog punjenja zbog unutarnjeg tlaka u streljivu. Iako su ove vrste punjenja uspješne u otvaranju potrebnog otvora u municiji, one obično ne pale eksplozivno punjenje, pa je za uklanjanje eksploziva potrebna druga tehnika. Elegantno rješenje u jednom koraku za ovaj problem razvio je Winter (1996). Koristio je linearni kumulativni naboj s reaktivnim materijalom obloge (RLSC). Kad je aktiviran, RLSC presijeca municiju i pali eksplozivno punjenje. Prikladnim dimenzioniranjem RLSC moguće je dovoljno odzračivanje produkata eksplozije i eksplozivno punjenje jednostavno izgara. Rezultati ove metode za 105 mm HESH streljivo (High Explosive Squash Head) prikazani su na slici 6-39.



**Slika 6-39** Prikaz postava RLSC testa za 105 mm HESH streljivo (slika gore) i rezultat RLSC testa (slika dolje) (Weickert, 1998)

Već je raspravljeno kako se eksplozivno oblikovani projektili mogu koristiti za uklanjanju osigurača iz NUS-a. Međutim, oni se također mogu koristiti za otvaranje kućišta municije i stvaranje sporog sagorijevanja ili u nekim slučajevima deflagracije (Chick i sur., 1994). Jedna od značajnih prednosti korištenja EFP-a u tu svrhu je ta što sposobnost daljinskog djelovanja ove vrste uređaja omogućuje neutralizaciju NUS-a bez dolaska u kontakt ili ometanja NUS-a. Pokazalo se da je novi dizajn EFP-a vrlo uspješan u izrezivanju diska u municiji i izazivanju sporog sagorijevanja eksplozivnog punjenja u jednoj operaciji. Profil prodiranja u blok predmeta ove vrste EFP-a prikazan je na slici 6-40. Ti su eksperimenti provedeni na relativno kratkim udaljenostima od dva do deset promjera naboja.



**Slika 6-40** Penetracijski profil eksplozivno oblikovanog projektila u bloku od mekog čelika (Weickert, 1998)

Van Bree (1995) proveo je istraživanje EFP-a u svrhu zbrinjavanja bombi na zahtjevnoj udaljenosti od 30 m. Tijekom ovog ispitivanja testiran je širok spektar GP bombi s EFP-ima kalibra 56 mm i 75 mm, što je rezultiralo reakcijom deflagracije. Stvarna udaljenost odstupanja korištena za ove eksperimente nije navedena u radu.

## 7. ZAKLJUČAK

Razne primjene eksplozivno oblikovanih projektila, civilne i vojne, uključuju probijanje raznih prepreka kao što su armiranobetonski zidovi, rušenje mostova armiranobetonske ili čelične konstrukcije te zbrinjavanje ubojnih eksplozivnih sredstava kao što su bombe, mine ili bojeve glave.

Izvedba EFP naprave omogućava promjenu karakteristika projektila. Promjenom materijala obloge, debljine kućišta ili vrste eksploziva korištenog za eksplozivno punjenje mijenja se probojna moć projektila i njegova aerodinamička svojstva. To su samo neki od parametara čija promjena utječe na promjenu karakteristika projektila. Zbog takve mogućnosti promjene karakteristika EFP naprave se mogu izvesti tako da mogu probiti prepreke različitih debljina s različitih udaljenosti.

Osim velike probojne moći koja EFP-u omogućava proboj kroz više od samo jedne prepreke EFP naprave imaju sposobnost djelovanja na daljinu.

Veliki potencijal za rušenje objekata EFP naprave imaju baš zbog svoje sposobnosti djelovanja na daljinu što im omogućava upotrebu u situacijama kada je opasno koristiti metode kontaktnog rušenja, ali i kada iz nekog razloga metode kontaktnog rušenja nije moguće izvesti.

Sposobnost djelovanja na daljinu EFP naprava, osim kod rušenja objekata, koristi se i predstavlja značajnu prednost kod neutralizacije neeksplozivnih ubojnih sredstava. Zbog mogućnosti daljinskog djelovanja izbjegava se dolazak u kontakt ili ometanje NSU-a čime se povećava sigurnost samog postupka neutralizacije.

Može se zaključiti kako EFP naprave nude značajan potencijal za rušenje objekata u budućnosti zbog svoje sposobnosti djelovanja na daljinu, velike probojne moći i mogućnosti promjene karakteristika projektila. Sposobnost daljinskog djelovanja značajna je i za korištenje EFP-a u svrhu neutralizacije neeksplozivnih ubojnih sredstava.

## 8. LITERATURA

1. Barbour, R.T. 1981. Pyrotechnics in Industry. New York: McGraw-Hill.
2. Baum, F.A.; Orlenko, N.L.; Stanjukovič, K.P.; Čelišev, V.I.; Šehter, B.I. 1975. Fizika vzriva. Moskva: Nauka.
3. Chick, M.e. and Hatt, D.J. 1981. Metal jet initiation of bare and covered explosives: summary of the mechanism, empirical model and some applications. DSTO Materials Research Laboratory, Melbourne, Victoria, Report MRL-R-830.
4. Chick, M., Bussell, T., Frey, R.B., and Boyce, G. 1986a. Initiation of munitions by shaped charge jets. Proceedings of the Ninth International Symposium on Ballistics, Shrivenham, UK.
5. Chick, M., Bussell, T., Frey, R.B., and Boyce, G. 1986b. Assessment of shaped charges for use in explosive ordnance disposal. DSTO Materials Research Laboratory, Melbourne, Victoria, Report MRL-R-1026.
6. Chick, M.e., Wolfson, M.G., and Learmonth, L.A. 1986c. A calibrated test for the assessment of the sensitivity of explosives to shaped charge jets. DSTO Materials Research Laboratory, Melbourne, Victoria, Report MRL-R-I016.
7. Chick, M. and Frey, R.B. 1990. Towards a methodology for assessing the terminal effect of a jet strike on munitions. 12th International Symposium on Ballistics, San Antonio, TX.
8. Chick, M., Bussell, T., Lam, C.P., McQueen, D., and McVay, L. 1994. An investigation into low environmental impact ordnance disposal methods with ballistic discs. Twenty-Sixth DOD Explosives Safety Seminar, Miami, FL.
9. Conn, A.F. 1986. An automated explosive removal system using cavitating water jets. Minutes of the Twenty-Second Explosives Safety Seminar, Anaheim, CA.



10. de Jong, E.G. and Kodde, H.H. 1992. The development of a punching charge for application as a explosive ordnance disposal technique-period 1986-1990. TNO Prins Maurits Laboratory, The Netherlands, PML1992-100.
11. EBAD. 2021. Linear Shaped Charge (LSC). URL:<https://www.ebad.com/linear-shaped-charge-lsc/> (21.6.2021)
12. Ester, Z., 2005. Miniranje I. - Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko- geološko- naftni fakultet.
13. Forsen, R. 1990. Experiments used for comparison of blast damage to full-scale and one fourth scale reinforced concrete structures. 24th DoD Explosives Safety Seminar, Saint Louis, ML.
14. French, M.; Wright, A. 2010. Developing mine blast resistance for composite based military vehicles. UK: QinetiQ. Woodhead Publishing Limited.
15. Graham, K.J. (1986). Explosive response to fragments: Venting studies. Naval Weapons Centre, China Lake, NWC TP 6456.
16. Hader, H. 1983. Effects of bare and cased explosive charges on reinforced concrete walls. Symposium Proceedings, The Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures, U.S. Air Force Academy, CO.
17. Held, M. 1987a. Experiments of initiation of covered, but unconfined high explosive charges by means of shaped charge jets. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 12.
18. Held, M. 1987b. Discussion of the experimental findings from the initiation of covered, but unconfined high explosive charges by means of shaped Charge Jets. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 12.
19. Held, M. 1989. Analysis of shaped charge jet induced reaction of high explosives. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 14.

20. Hicham Kemmoukhe; Saša Savić; Slavica Terzić; Miodrag Lisov; Narimane Rezgui; Housseyn Sedra. 2019. Improvement of the Shaped Charge Jet Penetration Capability by Modifying the Liner Form Using AUTODYN-2D. *Scientific Technical Review*, Vol.69, No.1, pp.10-15
21. Howe, P.M., Watson, J.L., and Frey, R.B. (1981). The response of confined explosive charges to fragment attack. *Proceedings of the Seventh Symposium (International) on Detonation*, Annapolis, MD.
22. Hubbard, P.J. and Tomlinson, R. 1989a. Ballistic attack of a variety of explosive filled munitions. *Proceedings of the 11 th International Symposium on Ballistics*, Brussels, Belgium.
23. Hubbard, P.J. and Tomlinson, R. 1989b. Explosiveness and shock-induced deflagration studies of large confined explosive charges. *Proceedings of the Ninth Symposium (International) on Detonation*, Portland, OR.
24. James M. Ryan, Adam J. Brooks, Jon Clasper, Mark Midwinter, Timothy J. Hodgetts, Peter F. Mahoney (eds.). 2011. *Ryan's Ballistic Trauma: A Practical Guide*. Springer-Verlag London.
25. Jian-qing LIU\*, Wen-bin GU, Ming LU, Hao-ming XU, Shuang-zhang WU. 2014. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China.
26. Joachim, C.E. 1983. Rapid runway cutting with shaped charges. *Symposium Proceedings, The Interaction of Non-Nuclear Munitions With Structures*. US Air Force Academy, CO.
27. Joachim, C.E. 1985. Linear shaped charge penetration. *Proceedings of the Second International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures*, Panama City Beach, FL.

28. Krsnik, J. 1989. Miniranje. Zagreb: Rudarsko, geološko, naftni fakultet.
29. Lonnqvist, L. 1993. The effects of high explosives in contact with reinforced concrete slabs. Proceedings of the Sixth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures, Panama City Beach, FL.
30. Masinskas, J.J. and van Leeuwen, E.H. 1987. Theoretical investigation of the wave shaping process in a section of ladder fracture tape. DSTO Materials Research Laboratory, Melbourne, Victoria, Report MRL-R -1081.
31. Petrousky, J.A., Backofen, I.E., and Butz, D.J. 1990. Shaped charge with explosively driven follow through. United States Patent 4955939.
32. Sciencemadness Discussion Board. 2020. Explosive cutting tape. URL:<http://www.sciencemadness.org/talk/files.php?pid=626416&aid=78035> (25.6.2021)
33. Shirey, D.L. 1980. Breaching of structural steel plates using explosive disks. The Shock and Vibration Bulletin.
34. Sućeska, M. 1996. Izračunavanje parametara kumulativnog mlaza primjenom jednodimenzionalnog analitičkog modela. Strojarsstvo 38 89-96.
35. Sućeska, M. 2001. Eksplozije i eksplozivi: njihova mirnodopska primjena. Zagreb: Brodarski institut.
36. US Army Night Vision and Electronic Sensors Directorate (NVESD). 2003. Final scientific and technical report on the high-performance hand-held foamed nitromethane system. Fort Belvoir, V.
37. van Bree, J.L.M.J. (1995). Disposal of GP bombs by EFP attack. 15th International Symposium on Ballistics, Jerusalem, Israel.

38. Vande Kieft, L.J. and Bines, A.L. 1989. Expendable dearmor evaluation. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. Memorandum Report BRL-MR-3772.
39. Walters, W.P.; Zukas, J.A. 1989. Fundamentals of Shaped Charges. New York: John Wiley & Sons.
40. Weickert, C.A. 1986. Spin stabilization of self-forging fragments. Ninth International Symposium on Ballistics, Shrivenham, UK.
41. Weickert, C.A. and Gallagher, P.J. 1996. Ogive-nosed, finned, explosively formed projectiles. 16th International Symposium on Ballistics, San Francisco, CA.
42. Weickert, C.A. 1998. Explosive Effects and Applications. New York, NY: Springer.
43. Weimann, K. 1993. Flight stability of EFP with star shaped tail. 14th International Symposium on Ballistics, Quebec, Canada.
44. William P. Walters; Laszlo J. Kecskes; Justin E. Pritchett. 2006. Investigation of a Bulk Metallic Glass as a Shaped Charge Liner Material. U.S. Army Research Laboratory Weapons and Materials Research Directorate Aberdeen Proving Ground
45. Winter, P.L., Thornton, D.M., and Learmonth, L.A. 1993. The application of linear shaped charge technology to explosive demolition of structures. Dynamic Loading and Manufacturing and Service, The Institute of Engineers of Australia, Melbourne.
46. Worswick, M.J., Mackay, D.J., McQuilkin, A., Weickert, C.A., Storrie, T., and Mowers, S. 1989. Investigation of explosively formed projectiles impacting concrete. Proceedings of the Fourth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures, Panama City Beach, FL.



KLASA: 602-04/21-01/100  
URBROJ: 251-70-11-21-2  
U Zagrebu, 13.09.2021.

Leo Rukavina, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/100, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 22.04.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### ZNAČAJKE EKSPLOZIJOM UBRZANOG PROJEKTILA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Mario Dobrilović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomске ispite:

(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)