

Presijecanje čeličnog užeta eksplozivom

Barić, Anja

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:169:040990>

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
Preddiplomski studij rudarstva

PRESIJECANJE ČELIČNOG UŽETA EKSPLOZIVOM

Završni rad

Anja Barić
R 4158

Zagreb, 2020.



KLASA: 602-04/20-01/98
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 16.09.2020.

Anja Barić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/98, UR.BR. 251-70-12-20-2 od 28.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

PRESIJECANJE ČELIČNOG UŽETA EKSPLOZIVOM

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu doc. dr. sc. Vječislav Bohanek, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

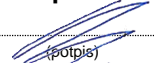

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Vječislav Bohanek

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske 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)

PRESIJECANJE ČELIČNOG UŽETA EKSPLOZIVOM

Anja Barić

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

Sažetak

Rezanje metala eksplozivom jedna je od mnogih primjena eksploziva. U radu je rezanje metala prikazano na primjeru presijecanja čeličnog užeta eksplozivom koje je bilo potrebno za skidanje gornjeg dijela Zagrebačke katedrale oštećene potresom.

Ključne riječi: eksplozivni naboj, rezanje metala, uže

Završni rad sadrži: 37 stranica, 2 tablice, 29 slika i 21 referenca.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF
Dr.sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OBRADA METALA EKSPLOZIVOM	2
2.1.	Zavarivanje metala eksplozivom	2
2.2.	Oblikovanje metala eksplozivom.....	3
2.3.	Popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom.....	5
2.4.	Kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom	5
2.5.	Povećanje tvrdoće metala eksplozivom	7
2.6.	Rezanje metala eksplozivom	7
3.	REZANJE METALA EKSPLOZIVOM.....	8
3.1.	Rezanje kontaktnim eksplozivnim nabojem	8
3.2.	Rezanje kumulativnim eksplozivnim nabojem.....	13
3.2.1.	Konusni kumulativni eksplozivni naboji	16
3.2.2.	Linijski kumulativni eksplozivni naboji.....	17
4.	REZANJE ČELIČNOG UŽETA EKSPLOZIVOMA	19
4.1.	Laboratorijsko testiranje	22
4.2.	In situ testiranje i konačno presijecanje užeta.....	25
5.	ZAKLJUČAK.....	27
6.	LITERATURA	28

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Proces zavarivanja metala eksplozivom (Akbari-Mousavi, Al-Hassani 2008)....	2
Slika 2-2. Konfiguracije koje se koriste za zavarivanje (Ćulić, 2018).....	3
Slika 2-3. Oblikovanje metala kontaktnom metodom (Bohanek, Dobrilović i Škrlec 2013).....	4
Slika 2-4. Oblikovanje metala nekontaktnom metodom (Bohanek, Dobrilović i Škrlec 2013).....	4
Slika 2-5. Načini postavljanja detonirajućeg štapina (Garcia-Jacomino et al. 2010)	5
Slika 2-6. Kompaktiranje praha primjenom klipa (Zohoor, Mehdipoor 2009).....	6
Slika 2-7. Kompaktiranje praha primjenom cilindra (Farinha et al. 2009).....	7
Slika 3-1. Postavljanje kontaktnog eksplozivnog naboja na čeličnu gredu (Headquarters, Department of the Army 2008)	8
Slika 3-2. Oblikovanje eksploziva C-4 (Softpedia, 2007)	9
Slika 3-3. Eksploziv u trakama (Texas machine gun and ordnance)	10
Slika 3-4. Detonacijski proces (Ester, 2005).....	11
Slika 3-5. Smjer udarnog vala ovisno o mjestu iniciranja eksplozivnog naboja (Headquarters, Department of the Army, 2008).....	12
Slika 3-6. jednostrano i dvostrano postavljanje eksplozivnog naboja.	13
Slika 3-7. Dijelovi kumulativnog eksplozivnog naboja (Bohanek, 2008)	14
Slika 3-8. Grafički prikaz odnosa dubine prodiranje i udaljenosti kumulativnog naboja od elementa čelične konstrukcije (Doig, 1998)	15
Slika 3-9. Mogući položaj detonatora (Doig, 1998)	16
Slika 3-10. Kumulativni mlazovi 35 μ s nakon detonacije (Doig, 1998)	16
Slika 3-11. Konusni kumulativni eksplozivni naboj (Zhang, 2016)	17
Slika 3-12. Rezanje metalne ploče primjenom linijskog kumulativnog rezača.	18
Slika 4-1. Zagrebačka katedrala poslije potresa (Večernji, 2020)	19
Slika 4-2. Unutrašnjost tornja (Bohanek i Dobrilović, 2020)	20
Slika 4-3. Dijelovi čeličnog užeta (CERTEx)	21
Slika 4-4. Čelično uže iz južnog tornja (Dobrilović i Bohanek, 2020).....	21
Slika 4-5. Čelično uže presječeno mason pentrita 29,32 g (Dobrilović i Bohanek, 2020) .	23
Slika 4-6. Čelično uže presječeno mason pentrita 20,00 g (Dobrilović i Bohanek, 2020) .	24
Slika 4-7. Čelično uže presječeno mason pentrita 10,00 g (Dobrilović i Bohanek, 2020) .	24
Slika 4-8. Konačno testiranje	25
Slika 4-9. Postavljanje eksplozivnog naboja na čelično uže (Bohanek i Dobrilović 2020)	26

Slika 4-10. Trenutak eksplozije (Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, 2020)..... 26

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Sastav eksploziva kompozicije C-4	10
Tablica 3-2. Eksplozivi koji se koriste za kumulativne naboje	17

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Simbol	Značenje	Jedinica
D	Brzina detonacije	(m/s)
U	Brzina produkata	(m/s)
P	Masa eksploziva	(lb)
R	Promjer eksploziva	(mm)
ρ	Gustoća	(g/cm ³)
p	Tlak detonacije	(kbar)

1. UVOD

Osim u vojne svrhe eksplozivi imaju sve širu civilnu primjenu. Koriste se za dobivanje mineralne sirovine i izradu podzemnih prostorija u rudarstvu, rušenje objekata i čeličnih konstrukcija u građevinarstvu, pri eksploataciji nafte i plina, geološkim istražnim radovima, rušenju stabala u šumarstvu, kod razminiravanja, u filmskoj industriji, u vatrometima, za obradu metala i u mnoge druge svrhe. Jedan od primjera primjene eksploziva je i rezanje metala eksplozivom koje je u radu prikazano na primjeru rezanja čeličnog užeta uporabom eksplozivnih naboja.

2. OBRADA METALA EKSPLOZIVOM

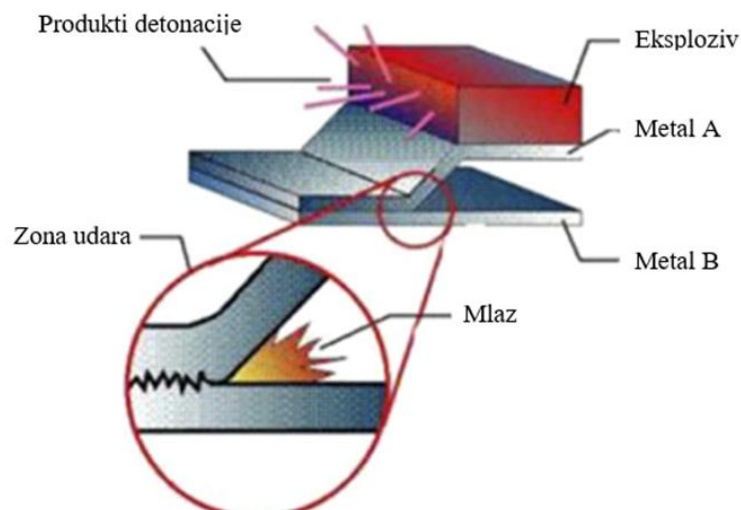
Jedna od mnogih primjena energije eksploziva je i obrada metala korištenjem eksploziva. Takva primjena započela je 1888. godine istraživanjima koje je izveo Charles Munroe. Međutim, većina značajnijih istraživanja provedena je pedesetih godina 20. stoljeća što je rezultiralo brojnim oblicima primjene energije eksploziva za obradu metala.

Razlikujemo sljedeće postupke obrade metala eksplozivom:

- zavarivanje metala eksplozivom,
- oblikovanje metala eksplozivom,
- popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom,
- kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom,
- povećanje tvrdoće metala eksplozivom i
- rezanje ili perforiranje metala eksplozivom.

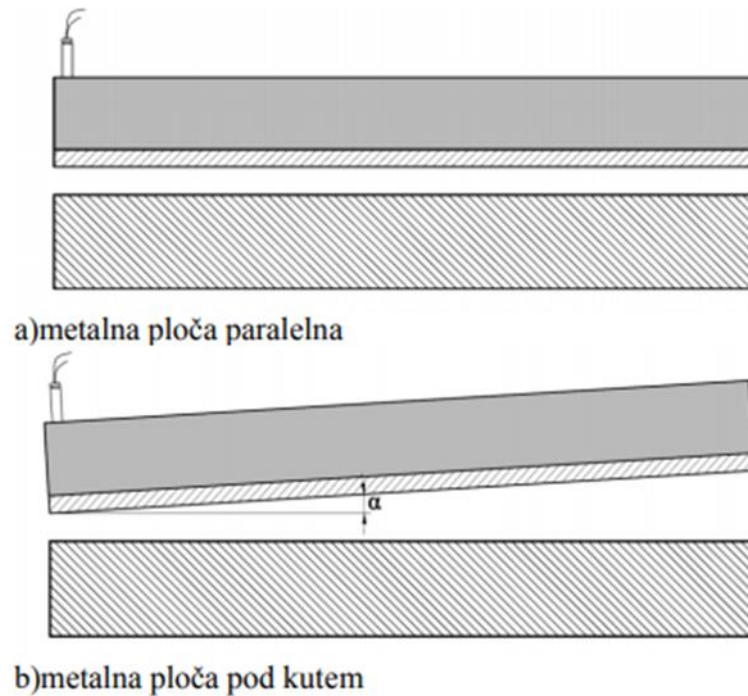
2.1. Zavarivanje metala eksplozivom

Kod procesa zavarivanja eksplozivom, koji je prikazan na slici 2-1., razlikuju se dvije ploče metala. Jedna je nepomična ploča koja može biti bilo koje debljine (metal B), dok se druga ploča (metal A) ubrzava detonacijom eksploziva i zavaruje na metalnu ploču B.



Slika 2-1. Proces zavarivanja metala eksplozivom (Akbari-Mousavi, Al-Hassani 2008)

Zavarivanje je uzrokovano detonacijom eksploziva i odvija se jako brzo. Proces možemo podijeliti u tri faze. Prva faza zavarivanja je detonacija eksplozivnog punjenja koja dovodi do druge faze tj. ubrzavanja metala A u smjeru metala B. Treća faza je spajanje (zavarivanje) metalnih ploča za koje se mogu koristiti dvije osnovne izvedbe. Kod prve izvedbe metalna ploča A koja ubrzava paralelna je ploči B na koju se zavaruje, a u drugoj izvedbi ploča koja ubrzava može biti pod određenim kutom (od 2° do 10°) u odnosu na ploču na koju se zavaruje. Konfiguracije su prikazane na slici 2-2.



Slika 2-2. Konfiguracije koje se koriste za zavarivanje (Ćulić, 2018)

Kako bi proces zavarivanja bio uspješan potreban je nastanak mlaza u točki spoja metalnih ploča. Mlaz ispred zavara uklanja oksidni sloj i nečistoće s površine metalne ploče te uzrokuje boranje materijala i spoja metala prilikom sudara. Kako bi došlo do zavarivanja ploča potrebno je djelovanje tlaka dovoljnog iznosa u određenom vremenu. Visoki tlak uzrokuje lokalne plastične deformacije u zoni vara.

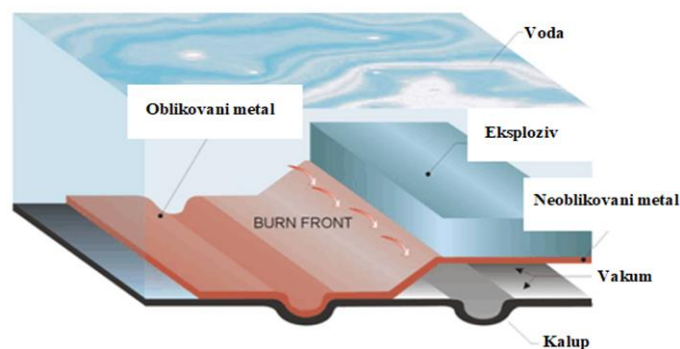
2.2. Oblikovanje metala eksplozivom

Oblikovanje metala eksplozivom obuhvaća skupinu metoda zasnovanih na plastičnoj deformaciji. Plastična deformacija kontinuuma je proces koji rezultira trajnom deformacijom.

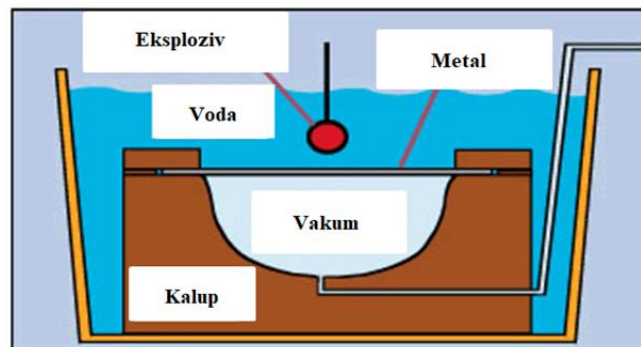
Proces plastične deformacije je ireverzibilan, a materijal zadržava kontinuitet i kompatibilnost, sa izuzetkom promjena u mikrostrukturi (Math, 1999).

Kod oblikovanja metala eksplozivom koristi se eksplozivni naboj koji stvara udarne valove usmjerene prema obradku. Takvi valovi deformiraju obradak vrlo velikim brzinama (od 100 m/s do 300 m/s).

Metode koje se koriste za oblikovanje metala eksplozivom su kontaktna metoda (Slika 2-3.) kod koje se eksploziv nalazi u neposrednom kontaktu s metalom koji se oblikuje, ali se zbog češćih odstupanja od traženih dimenzija manje koristi, i nekontaktna metoda (Slika 2-4.) kod koje su eksploziv i metal na određenoj udaljenosti.



Slika 2-3. Oblikovanje metala kontaktnom metodom (Bohanek, Dobrilović i Škrlec 2013)



Slika 2-4. Oblikovanje metala nekontaktnom metodom (Bohanek, Dobrilović i Škrlec 2013)

Prema sustavu koji se koristi oblikovanje metala eksplozivom dijeli se na zatvoreni sustav oblikovanja metala, otvoreni sustav oblikovanja metala i oblikovanje metala eksplozivom bez upotrebe kalupa. Zatvoreni sustav podrazumijeva smještanje eksplozivnog naboja unutar dvodijelnog kalupa. Takav sustav se primjenjuje kada postoje strogi zahtjevi za odstupanje dimenzija proizvoda. Kod otvorenog sustava oblikovanja samo je jedna strana kalupa koja je

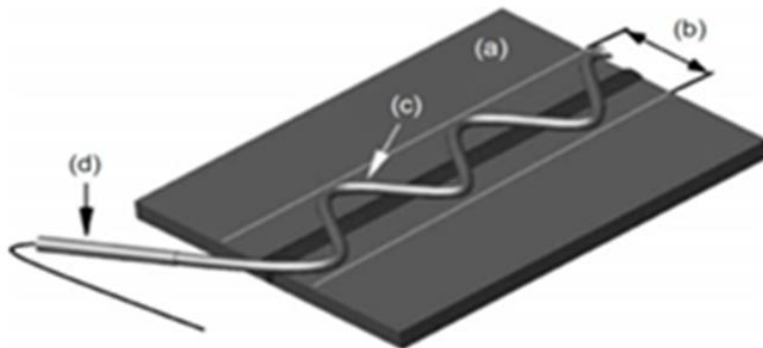
svojim dimenzijama i masom manja od jedne polovine kalupa zatvorenog sustava. Sustavom oblikovanja bez kalupa oblikuju se sferni oblici od tanjeg lima.

2.3. Popuštanje zaostalih napreznja eksplozivom

Deformacije nastaju prilikom zagrijavanja i hlađenja materijala. Kod nejednoliko zagrijanog metala dolazi do širenja toplog dijela, dok se hladni dio tome opire, uslijed čega nastaje plastična deformacija toplog dijela. Nakon hlađenja zagrijani dio se skraćuje, što izaziva zaostala napreznja i deformacije (Duspara, 2011).

Jedna od metoda popuštanja zaostalih napreznja je i popuštanje zaostalih napreznja upotrebom eksploziva. Do popuštanja dolazi uslijed djelovanja udarnog vala eksplozivnog naboja kao i topline nastale detonacijom.

Eksploziv se postavlja na spoj dvaju metala i okolicu spoja. To područje naziva se aktivna zona. Širina aktivne zone je zbroj širine zone plastičnih i elastično plastičnih deformacija. Za popuštanje se može koristiti eksploziv u trakama ili detonirajući štapin. Kod upotrebe eksploziva u trakama cijela aktivna zona prekrije se eksplozivom, a korištenjem detonirajućeg štapina, štapin se može postaviti u obliku sinusoide (Slika 2-5.) ili paralelno.



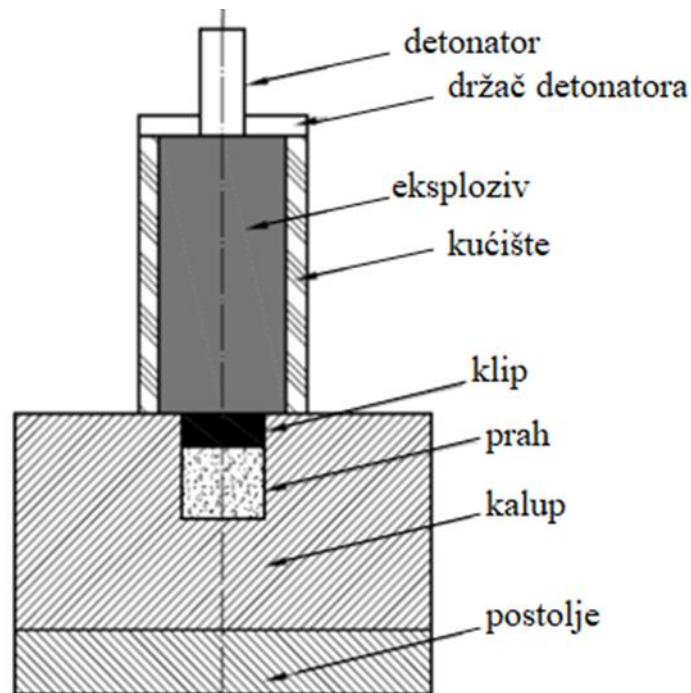
a) metal, b) aktivna zona, c) detonirajući štapin, d) detonator

Slika 2-5. Načini postavljanja detonirajućeg štapina (Garcia-Jacomino et al. 2010)

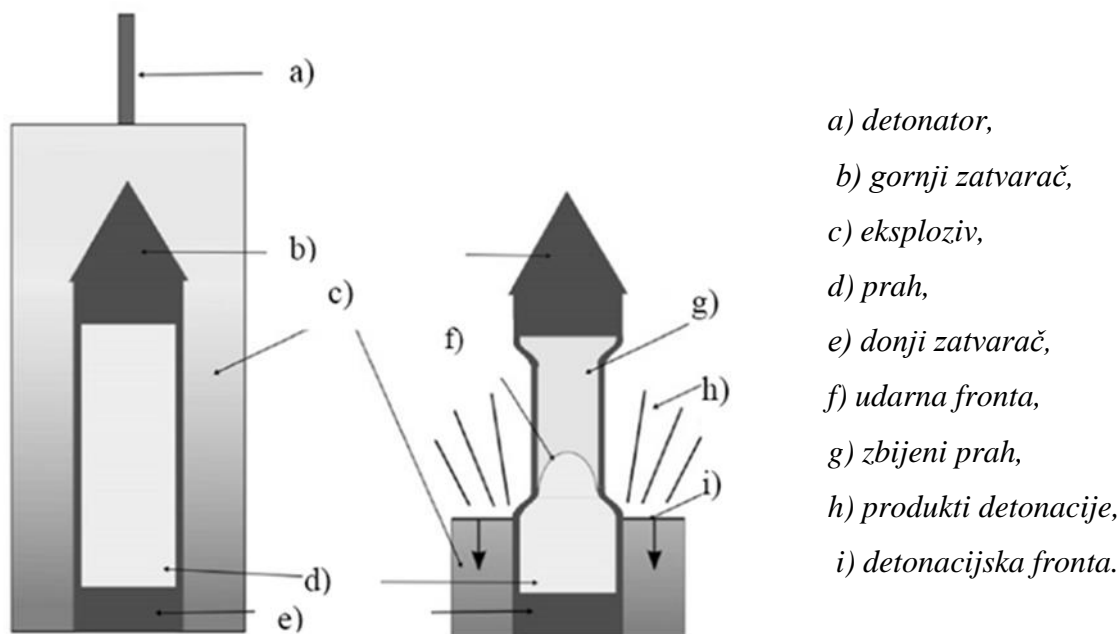
2.4. Kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom

Kompaktiranje praha eksplozivom je proces kojim se prah zbija u traženi element primjenom energije eksploziva. Djelovanjem udarnog vala detonacije eksploziva prahu se smanjuje volumen što rezultira povećanjem gustoće. Zbijanjem se gustoća praha približava maksimalnoj teoretskoj gustoći, a fizičko-mehanička svojstva metala se poboljšavaju.

Primjena ovakve metode, u odnosu na klasičnu, rezultira većom postignutom gustoćom i tvrdoćom obradka. Ujedno je brža i ekonomski isplativija od klasične metode kompaktiranja. Kompaktiranje se može izvesti primjenom udarnog klipa ili primjenom cilindra. Kod primjene udarnog klipa (Slika 2-6.) energija detonacije se prenosi na udarni klip koji zbija prah u kućište. Nedostatak takve metode je moguća pojava pukotina zbog jakog udarnog vala u materijalu. Kako bi se spriječio nastanak pukotina može se dodati element s vodom koji prenosi energiju detonacije na klip. Metoda s cilindrom (Slika 2-7.) zasniva se na cilindru izrađenom od rastezljivog materijala u koji se, s obje strane, zatvori metalni prah. Oko cilindra se postavlja sloj eksploziva koji se inicira s jednog kraja.



Slika 2-6. Kompaktiranje praha primjenom klipa (Zohoor, Mehdipoor 2009)



Slika 2-7. Kompaktiranje praha primjenom cilindra (Farinha et al. 2009)

2.5. Povećanje tvrdoće metala eksplozivom

Djelovanjem udarnog vala eksplozivnog naboja, u većini postupaka obrade metala eksplozivom, dolazi do promjene u mikrostrukturi i fizičko-mehaničkim svojstvima metala pa tako dolazi i do povećanja tvrdoće metala.

Povećanje tvrdoće metala eksplozivom može se izvesti tako da se eksplozivni naboj nalazi u kontaktu s metalom ili se mogu koristiti eksplozivom ubrzane metalne ploče čijom se energijom udara povećava tvrdoća metala.

2.6. Rezanje metala eksplozivom

Rezanje metala eksplozivom je detaljno opisano u nastavku rada. Svi utjecajni faktori, metode i primjeri navedeni su u nastavku na primjeru rezanja elemenata čeličnih konstrukcija, u prvom planu rezanje čeličnog užeta.

3. REZANJE METALA EKSPLOZIVOM

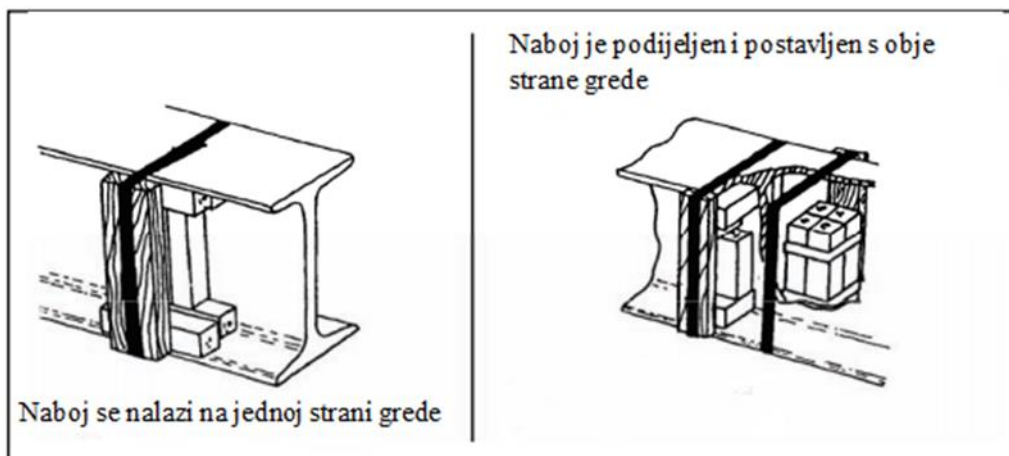
Rezanje metala primjenom eksplozivnih naboja može se, s obzirom na razlike u dinamici procesa rezanja, podijeliti u dvije kategorije:

- Rezanje korištenjem kontaktnih eksplozivnih naboja i
- Rezanje korištenjem kumulativnih eksplozivnih naboja

Uspješnost rezanja za obje metode ovisi o nizu čimbenika koji su za svaku metodu različiti. Dva važna čimbenika za odabir vrste i količine eksplozivnog naboja kod obje metode su ista, a to su dimenzije elementa metalne konstrukcije koji se reže i njegov sastav.

3.1. Rezanje kontaktnim eksplozivnim nabojem

U početku se rezanje kontaktnim eksplozivnim nabojima koristilo samo u vojne svrha, a kasnije se primjena proširuje i na civilne potrebe. Eksploziv se postavlja u kontakt s elementom koji se reže.. Na slici 3-1. prikazano je postavljanje eksplozivnog naboja na čeličnu gredu.



Slika 3-1. Postavljanje kontaktnog eksplozivnog naboja na čeličnu gredu (Headquarters, Department of the Army 2008)

U dodirnoj površini eksploziva i čelika mogu postojati šupljine ispunjene zrakom ili vodom koje smanjuju silu udarnog vala. Kako bi se takve šupljine izbjegle najčešće se koriste plastični eksplozivi i eksplozivi u trakama.

Primjer plastičnog eksploziva je eksploziv kompozicije C-4. C-4 je plastični eksploziv bijele boje i gustoće oko 1,4 g/cm³. Detonirajuća brzina C-4 iznosi 7400 m/s. Ovakav plastični eksploziv je 1/3 puta snažniji od TNT-a. Iako su zapakirani blokovi C-4 u polučvrstom stanju kada se makne plastični omot eksploziv je gibak i pogodan za oblikovanje. Međutim prilikom oblikovanja eksploziva treba imati na umu da se oblikovanjem i gnječenjem smanjuje gustoća eksploziva što rezultira smanjenom brzinom detonacije, a smanjenjem brzine detonacije značajno se smanjuje i snaga eksploziva. Sastav eksploziva kompozicije C-4 prikazan je u tablici 3-1. Slika 3-2. prikazuje oblikovanje eksploziva C-4.

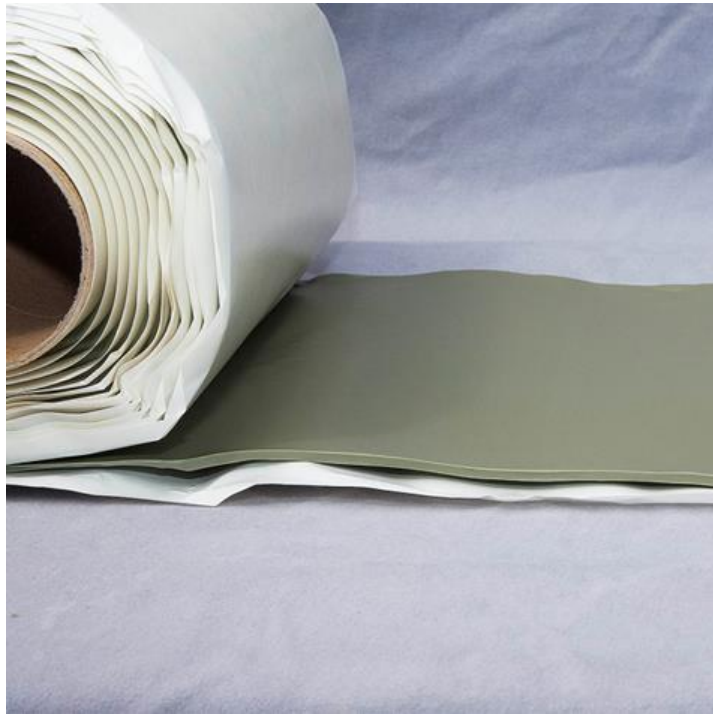
Tablica 3-1. Sastav eksploziva kompozicije C-4 (Dennis, 1965)

Sastojci			Postotak
RDX			91
Poliizobutilen			2,1
Motorno ulje			1,6
Dietilheksil			5,3
C-4			100



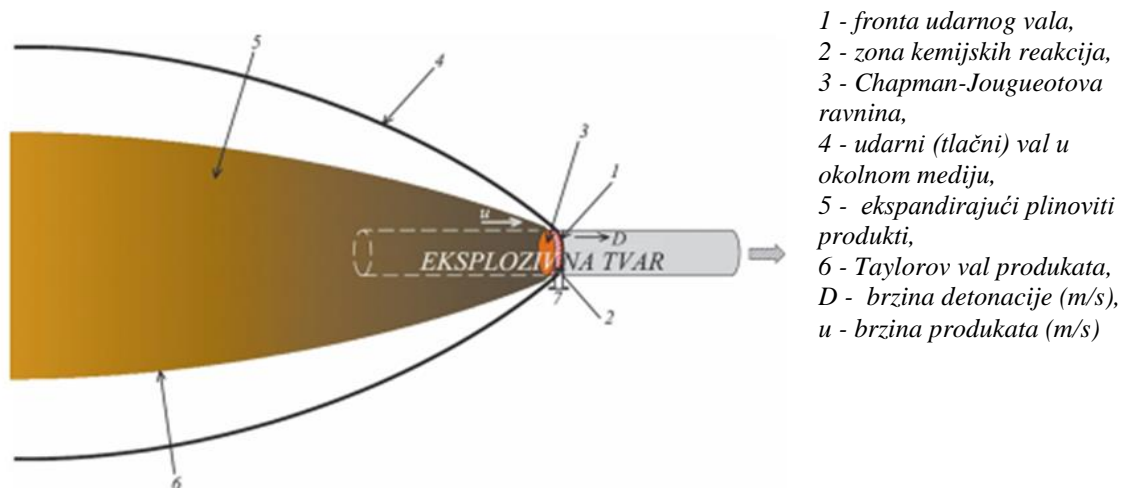
Slika 3-2. Oblikovanje eksploziva C-4 (Softpedia, 2007)

EL506A-5 fleksibilni eksploziv crvene boje primjer je eksploziva u trakama. Takav eksploziv je smjesa pentaeritritol tetranitrata (85%) i elastomernog veziva koje daje fleksibilnost i mogućnost oblikovanja u temperaturnom rasponu od -18° do 55° C. Traka širine 25 cm i dužine 50 cm ima debljinu od 0,5 cm i gustoću 1,48 g/cm³. Brzina detonacije iznosi oko 7200 m/s. Na slici 3-3. nalazi se primjer izgleda eksploziva u trakama.



Slika 3-3. Eksploziv u trakama (Texas machine gun and ordnance)

Rezanje čelika, ili bilo kojeg drugog metala, kontaktnim eksplozivnim nabojem započinje detonacijom. Detonacijom se eksploziv u kratkom vremenskom roku iz čvrste tvari pretvara u komprimirani plin pod ekstremno visokim tlakom (reda veličine 105 bara). Faktori koji utječu na brzinu detonacije su vrsta eksploziva, njegova gustoća i dimenzije. Tlak stvara udarni val koji postoji samo nekoliko mikrosekundi u bilo kojoj određenoj točki i može slomiti i pomjeriti predmete koji mu se nađu na putu. Stvaranje udarnog vala prilikom detonacije prikazano je na slici 3-4.



Slika 3-4. Detonacijski proces (Ester, 2005)

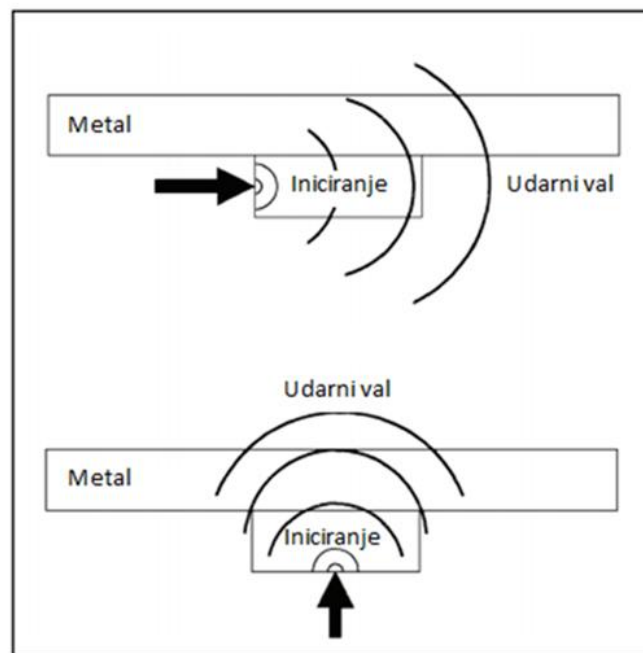
Eksplozivni naboji u direktnom kontaktu s čvrstim materijalom proizvode tri destruktivna učinka:

- Deformacija – Udarni val deformira površinu ispod eksploziva. U čeliku on uzrokuje udubljenje veličine površine eksplozivnog naboja.
- Lomljenje – Udarni val također uzrokuje odlamanje djelića čelika ispod naboja, a ako je naboj dovoljno velik odlamanje se može dogoditi na suprotnoj strani čelične konstrukcije. Zbog razlike u gustoći zraka i čelika, ako je strana suprotno od strane na kojoj se nalazio eksploziv slobodna, udarni val reflektira se kao napetost na slobodnoj strani i zbog napetosti čelika dolazi do odlamanja. Na čeličnoj ploči odlomljeni dio može biti veličine i oblika eksplozivnog naboja.
- Radijalno pucanje – Ako je naboj dovoljno velik plinovi koji se šire mogu na čvrsti predmet stvoriti pritisak koji će uzrokovati pucanje i savijanje. Naboj može saviti čelik u suprotnu stranu od mjesta eksplozije.

Snaga eksplozije ovisi o masi eksploziva i detonacijskim svojstvima eksploziva. Razorni učinak ovisi o smjeru eksplozivne sile. Da bi se postigao što jači udarni val eksplozivni naboj mora imati optimalni odnos kontaktne površine i debljine. Ako se izračunata količina naboja nanese pretanko neće biti dovoljno prostora da udarni val dostigne punu brzinu prije nego što pogodi metu. S druge strane, nanese li se debeli sloj eksploziva koji prekriva malu površinu predmeta koji se reže doći će do velikih bočnih gubitaka energije.

Razorni učinak eksplozivnog naboja ovisi i o položaju naboja u odnosu na veličinu, oblik i konfiguraciju metala. Za najbolji učinak odabiru se eksplozivi koji se što bolje mogu prilagoditi obliku i veličini konstrukcije. Svaki razmak između eksploziva i metala ispunjen zrakom ili vodom smanjit će silu udarnog vala. Upravo zbog svoje prilagodljivosti površini i jednostavnom dobivanju željene veličine najčešće se koriste plastični eksplozivi i eksplozivi u trakama. Također eksplozivni naboj može se postaviti na jednu stranu elementa čelične konstrukcije ili na obje strane. U nastavku poglavlja te dvije metode uspoređene su na primjeru čeličnog užeta.

Kako bi rezanje bilo uspješno potrebno je ispravno postaviti naboj. Naboj se postavlja cijelom dužinom željenog reza u što intimniji kontakt. Ukoliko se koristi eksploziv koji se ne može sam zalijepiti za metal koriste se posebne trake koje omogućuju postavljanje. Također je bitno da detonator bude okomito na element koji se reže kako bi se iskoristila puna snaga udarnog vala. Smjer udarnog vala ovisno o mjestu iniciranja prikazan je na slici 3-5..



Slika 3-5. Smjer udarnog vala ovisno o mjestu iniciranja eksplozivnog naboja (Headquarters, Department of the Army, 2008)

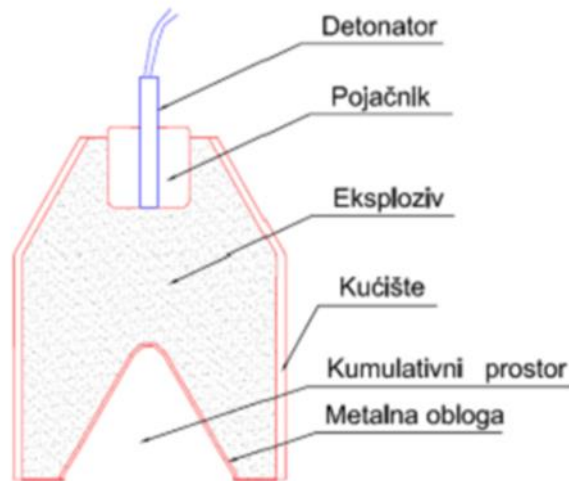
Prilikom rezanja metala eksplozivom proračunata količina eksplozivnog naboja postavlja u obliku jednog ili dva međusobno odvojena nasuprotna eksplozivna naboja. Na slici 3-6 dan je primjer jednostranog i dvostranog postavljanja eksplozivnog naboja.



Slika 3-6. Jednostrano i dvostrano postavljanje eksplozivnog naboja.

3.2. Rezanje kumulativnim eksplozivnim nabojem

Kumulativni eksplozivni naboj radi na način da usmjerava oslobođenu energiju eksploziva u točku ili pravac u obliku kumulativnog mlaza. Koriste se za rezanje ili probijanje različitih materijala. Kumulativni naboji se obzirom na oblik dijele na konusne kumulativne eksplozivne naboje ili perforatore i linijske (linearne) kumulativne naboje ili rezače. Na slici 3-7. prikazani su dijelovi kumulativnog eksplozivnog naboja.



Slika 3-7. Dijelovi kumulativnog eksplozivnog naboja (Bohanek, 2008)

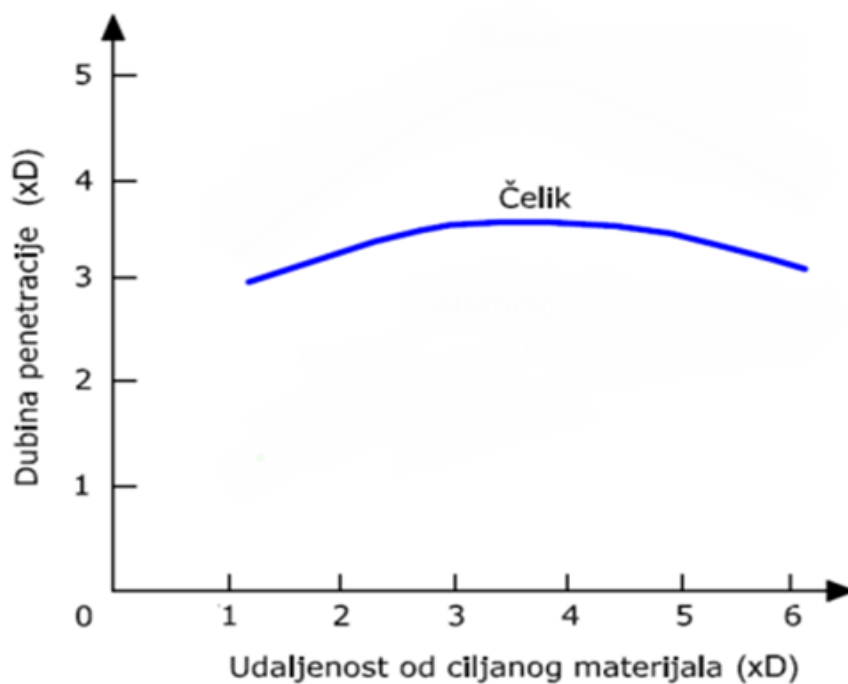
Kumulativni prostor povećava učinak udarnog vala izazvanog detonacijom eksploziva. Učinak se također povećava oblaganjem kumulativnog prostora metalom te odmicanjem naboja od mete koja se reže. Materijal obloge kumulativnog rezača je jako važan element kumulativnog punjenja. Oblik i materijal obloge utječu na uspješnost rezanja. Općenito, pri većim dimenzijama obloge, veća je i sposobnost prodiranja kumulativnog rezača. (Zukas et al, 1998). Obloge su najčešće izrađene od metala, a mogu biti i bimetalne, tj. napravljene od dvaju različitih metala. Najčešći metali su bakar, aluminij, olovo i srebro.

Za eksplozivno punjenje koriste se eksplozivi koji imaju veliku brzinu i tlak detonacije. Eksplozivi koji oslobađaju veću energiju detonacije više ubrzavaju materijal obloge i on ima veću kinetičku energiju (Gradiški, 2011). U tablici 3-2. navedeni su eksplozivi koji se koriste za kumulativne naboje kao i njihova svojstva.

Tablica 3-2. Eksplozivi koji se koriste za kumulativne naboje (Bohanek, 2008)

	70 % HMX 30 % TNT	50 % PETN 50 % TNT	C-4	SEMTEX
Gustoća, ρ (g/cm ³)	1,80	1,67	1,40	1,61
Brzina detonacije, D (m/s)	8300	7470	7400	6800
Tlak detonacije, p (kbar)	310	233	192	186

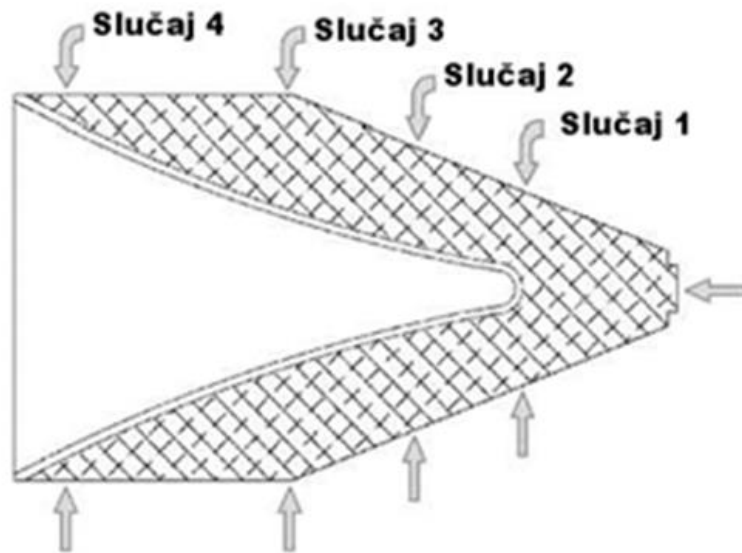
Učinak rezanja, kao što smo već spomenuli, poboljšava se udaljavanjem naboja od obradka. Naravno učinak se poboljšava samo do određene udaljenosti koju nazivamo optimalnom. Prema udaljenosti od obradka kumulativni naboji se dijele na naboje s odmakom i naboje bez odmaka. Na slici 3-8. grafički je prikazan odnos dubine prodiranja i udaljenosti kumulativnog naboja od elementa čelične konstrukcije.



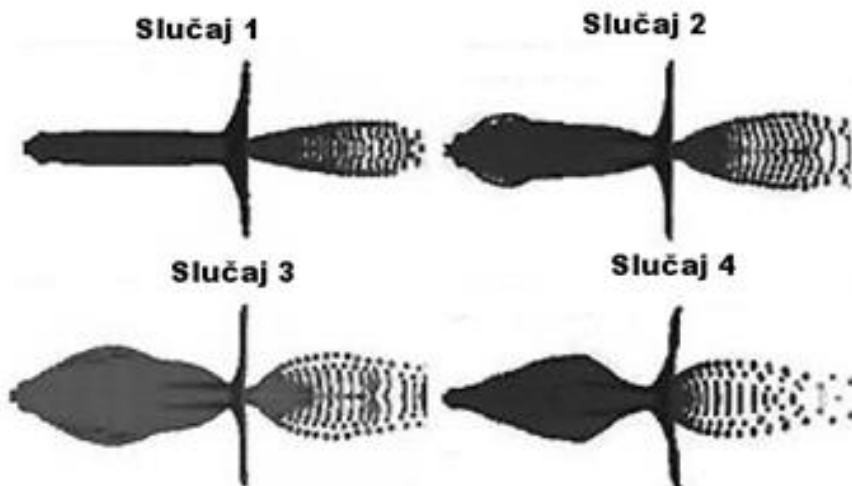
Slika 3-8. Grafički prikaz odnosa dubine prodiranja i udaljenosti kumulativnog naboja od elementa čelične konstrukcije (Doig, 1998)

Kod rezanja kumulativnim nabojem položaj detonatora također utječe na učinak rezanja. Kada se koristi samo jedan detonator on se smješta na suprotnu stranu kumulativne šupljine. Ponekad

se za iniciranje eksplozivnog naboja koriste i dva detonatora koja se iniciraju u isto vrijeme. Na slici 3-9. prikazani su mogući položaji detonatora, a na slici 3-10. učinak položaja detonatora na kumulativni mlaz.



Slika 3-9. Mogući položaj detonatora (Doig, 1998)

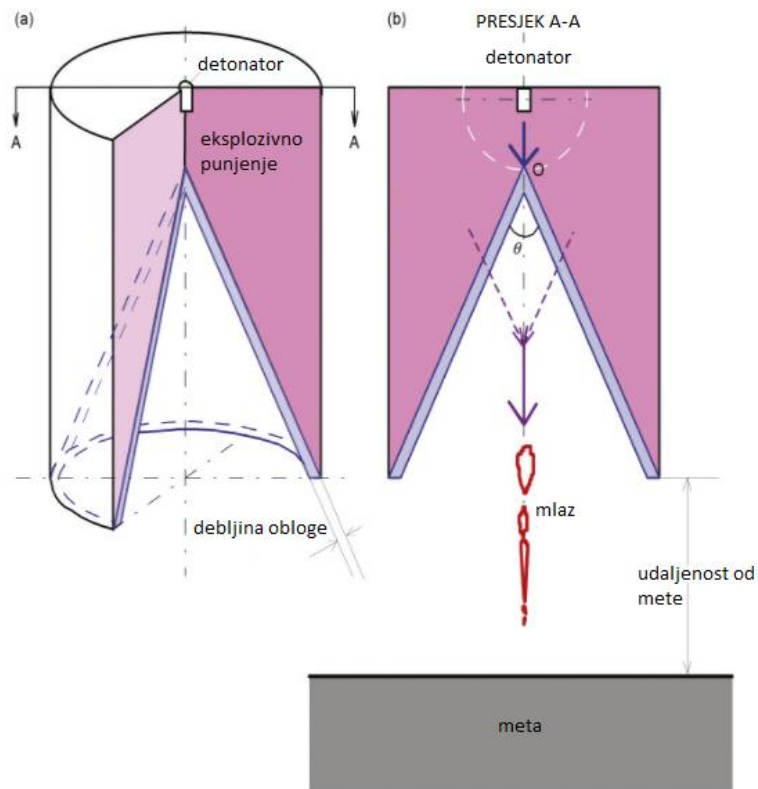


Slika 3-10. Kumulativni mlazovi 35 μ s nakon detonacije (Doig, 1998)

3.2.1. Konusni kumulativni eksplozivni naboji

Konusni kumulativni eksplozivni naboji ili perforatori služe za jednoosno probijanje materijala na koji djeluju. Sastoje se od eksploziva smještenog u posebno dizajnirano čelično kućište i prekrivenog metalnom konusnom oblogom. Detonacijom takvih naboja oslobađa se mlaz pod

visokim tlakom i jako velikoj brzini. Na slici 3-11. prikazani su dijelovi konusnog kumulativnog eksplozivnog naboja.



Slika 3-11. Konusni kumulativni eksplozivni naboj (Zhang, 2016)

3.2.2. Linijski kumulativni eksplozivni naboji

Kumulativni naboji kod kojih je jedna dimenzija, obično duljina, značajno veća od drugih nazivaju se linijski (linearni) kumulativni rezači (linear shaped charge-LSC). Linijski kumulativni rezači koriste se u različitim granama industrije te se primjenjuju unutar pojedinih tehnologija za rezanje metala, primjerice kod rušenja čeličnih konstrukcija, odvajanja iskorištenih spremnika goriva raketa, probijanja otvora u preprekama u vatrogastvu i slično (Sućeska, 2001).

Iniciranjem naboja formira se detonacijska fronta koja napreduje u pravcu kumulativnog prostora. Tlak detonacije potiskuje oblogu i ona se pod utjecajem visoke temperature i tlaka pretvara u mlaz. Nakon nastanka mlaza, on se izduljuje i na kraju raspada.

Nakon prodiranja mlaza u materijal, materijal ima istu masu kao i prije djelovanja naboja jer se djelovanjem mlaza na metal čestice metala bočno razmiču i povećava se gustoća materijala oko

reza, masa ostaje nepromijenjena. Primjer rezanja metalne ploče linijskim kumulativnim nabojem prikazan je slikom 3-12



Slika 3-12. Rezanje metalne ploče primjenom linijskog kumulativnog rezača.

4. REZANJE ČELIČNOG UŽETA EKSPLOZIVOMA

U potresu koji je 22.3.2020. zadesio Zagreb osim brojnih drugih građevina oštećena je i Zagrebačka katedrala. Dok se gornji dio južnog tornja katedrale u potpunosti slomio i srušio, sjeverni je također bio znatno oštećen i prijetila je opasnost njegovog rušenja. Rušenje dijela tornja dodatno bi nanijelo štetu katedrali i njenoj okolici te ga je zato bilo potrebno sigurno ukloniti. Na slici 4-1. prikazana je Zagrebačka katedrala poslije potresa i prije skidanja vrha sjevernog tornja.



Slika 4-1. Zagrebačka katedrala poslije potresa (Večernji, 2020)

Plan je bio spustiti dio tornja dizalicom, ali prije spuštanja on se morao odvojiti od ostatka katedrale. Kako je statika tornja bila poremećena i sigurnost ljudi koji bi radili na njegovom uklanjanju bila narušena, odlučeno je da je najsigurnije rješenje za odvajanje dijela tornja od ostatka zgrade kontrolirana eksplozija.

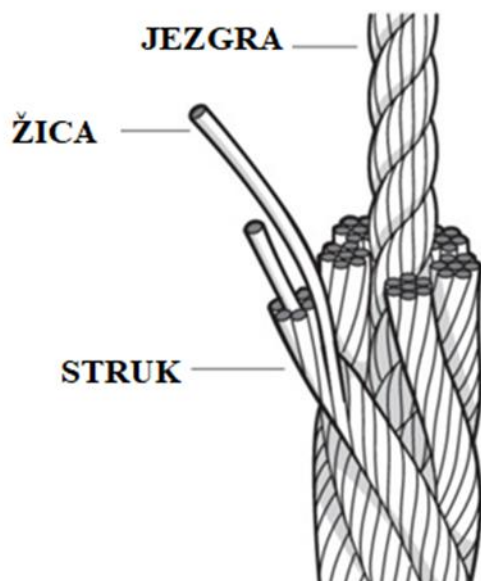
Kako bi se dio tornja odvojio bilo je potrebno u isto vrijeme oslabiti sidrene klinove, koji su spajali dva kamena segmenta, i prerezati čelično uže koje je spajalo vrh tornja s protuutegom i

na taj način stabiliziralo toranj. Promjer užeta je bio 15mm. Na slici 4-2. prikazana je unutrašnjost tornja prije njegova uklanjanja, u sredini tornja vidljivo je čelično uže koje je bilo potrebno presjeći.



Slika 4-2. Unutrašnjost tornja (Bohanek i Dobrilović, 2020)

Čelično uže sastoji se od više čeličnih elemenata. Svako čelično uže sastoji se od nekoliko strukova a svaki struk od nekoliko vanjskih i unutarnjih žica. Na slici 4-3. Prikazani su dijelovi užeta na slici 4-4. primjerak čeličnog užeta uzetog s južnog tornja



Slika 4-3. Dijelovi čeličnog užeta (CERTEX)



Slika 4-4. Čelično uže iz južnog tornja (Dobrilović i Bohanek, 2020)

Postupku rezanja užeta eksplozivom prethodilo je laboratorijsko testiranje i in situ testiranje.

4.1. Laboratorijsko testiranje

Sva testiranja rađena su na uzorcima uzetim iz južnog tornja, a koristili su se uzorci užeta različitih duljina. Kao eksploziv koristio se eksploziv pentrit koji je za potrebe ispitivanja izvađen iz detonirajući štapina. Postoje veći broj formula, uglavnom iz vojnog područja, za izračun mase eksplozivnog punjenja za presijecanje čeličnog užeta jedna od njih je i formula koju koristi US Army :

$$P = \frac{R^2}{1,34} \quad (4-$$

1)

Gdje je:

P - masa eksploziva u lb

R - promjer eksploziva u inch

Ukoliko se primjeni gore navedena formula potrebna masa eksploziva za uspješno presijecanje užeta iznosila bi nešto više od 100 grama. U pravilu formule koje se koriste u vojnoj praksi daju mase eksploziva koje su u pravilu znatno veće od potrebnih. Tome svjedoči i istraživanje koje je izveo James A. Dennis upotrebom eksploziva C-4 za presijecanje užeta. Testirale su se metoda rezanja s jednim eksplozivnim nabojem i metoda s dva eksplozivna naboja na dva različita užeta od ojačanog čelika. Prvo uže bilo je promjera 2,5 cm i sastojalo se od 6 strukova, a svaki struk tvorilo je 19 čeličnih žica, tj. uže se sastojalo od 114 čeličnih žica. Drugo uže bilo je promjera od 1,25 do 2,5 cm i sastojalo se od 7 strukova, svaki struk sastojao se od 7 žica, sveukupno uže je tvorilo 49 čeličnih žica. Nakon provedenih testiranja pokazalo se da je u 9 od 19 testova s dva naboja uže u potpunosti prerezano koristeći 34-72% količine eksploziva izračunatog po formuli. U 8 od 10 preostalih testova prerezane su sve osim 1-3 žice čeličnog užeta, no presijecanje se smatra uspješnim samo ako su sve žice prerezane. Korištenjem jednog naboja samo u 1 od 6 testova uže je potpuno prerezano, u dva testa prerezane su sve osim jedne žice. U usporedbi s testovima s dva naboja, u testu s jednim nabojem korišteno je 65-72% ukupne izračunate količine eksploziva.

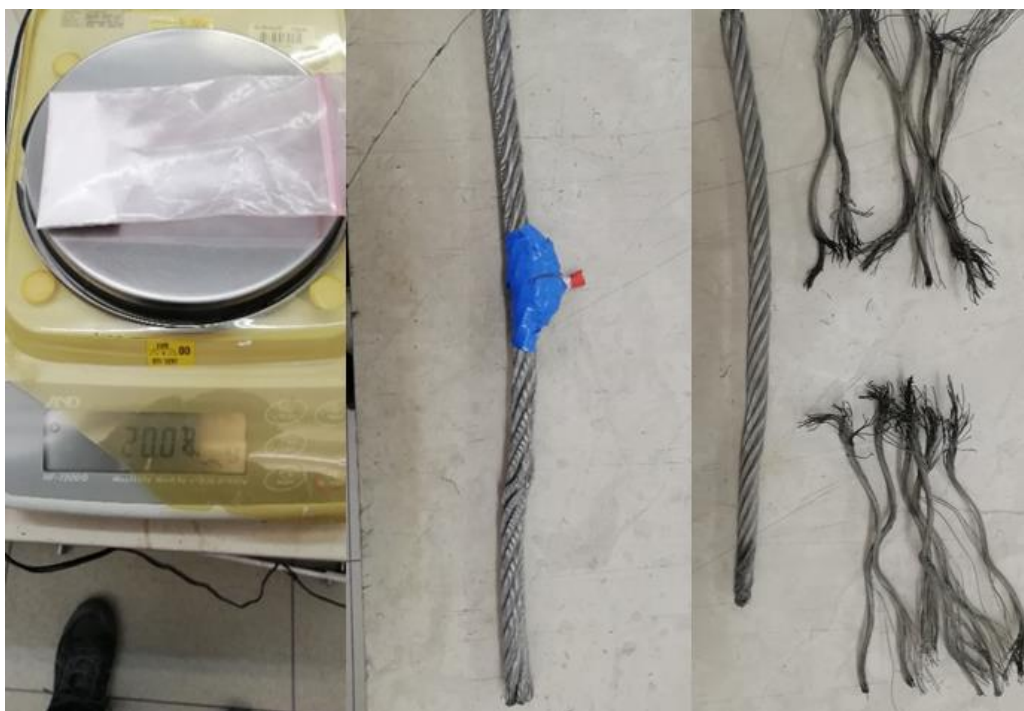
Obzirom na sve navedeno testiranje je započeto s masom eksplozivnog punjenje od 30g, točnije 29,32g. Obzirom da je uže uspješno presječeno u potpunosti masa eksploziva se postupno smanjivala.

Prvo testiranje napravljeno je s masom pentrita 29,32 g. Rezultat je u potpunosti presječeno uže kao što je vidljivo na slici 4-5.



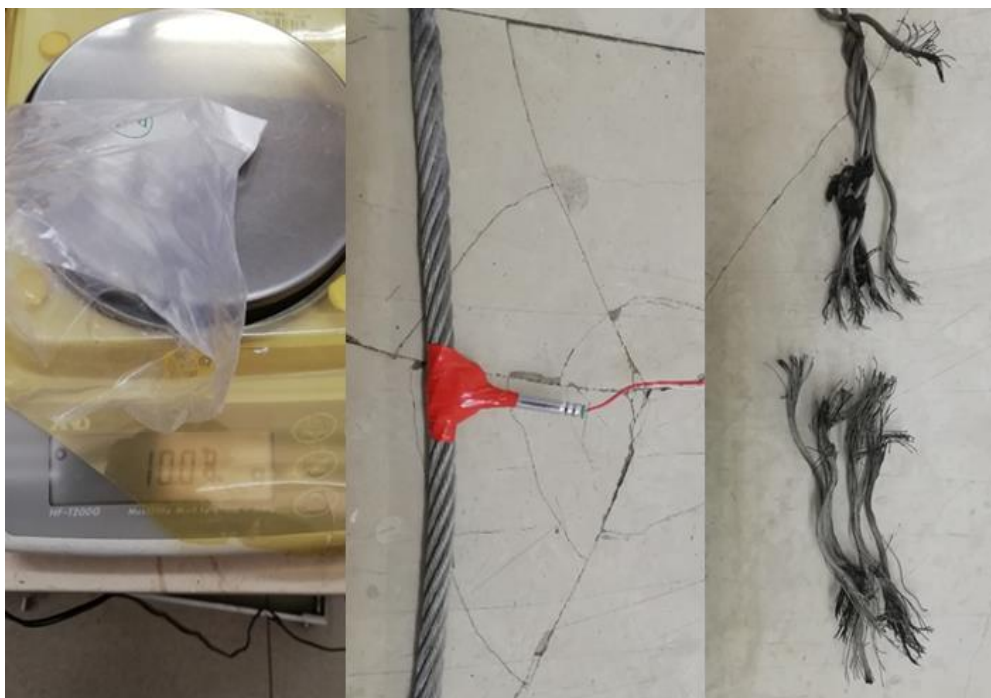
Slika 4-5. Čelično uže presječeno masom pentrita 29,32 g (Dobrilović i Bohanek, 2020)

Drugi uzorak pripremljen je s masom pentrita 20,00 g. Uže presječeno kao što je vidljivo na slici 4-6.



Slika 4-6. Čelično uže presječeno mason pentrita 20,00 g (Dobrilović i Bohanek, 2020)

Zadnje testiranje napravljeno je s masom pentrita od 10,00 g. Na slici 4-7. vidljivo je da je i ta količina eksploziva presjekla uže.



Slika 4-7. Čelično uže presječeno mason pentrita 10,00 g (Dobrilović i Bohanek, 2020)

Sva testiranja izvedena su u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu.

4.2. In situ testiranje i konačno presijecanje užeta

Nakon provedene analize laboratorijskih testiranja provedena su zadnja testiranja u dvorištu Zagrebačke katedrale čija je svrha bila potvrditi rezultate dobivene laboratorijskim ispitivanjima te provjeriti utjecaj detonacije eksplozivnog naboja na konstruktivne elemente katedrale. Na slici 4-8 prikazan je postav testiranja kao i uspješno presječeno uže nakon testiranja. Uže je omotano spužvom kako bi se prigušio zvuk koji nastaje detonacijom eksplozivnog naboja.



Slika 4-8. Konačno testiranje

Zadnja testiranja izvedena su 16. travnja, dan prije skidanja tornja i doneseni su sljedeći zaključci. Za presijecanje čeličnog užeta promjera 15 mm količina eksploziva je 15 g, a koristit će se plastični eksploziv PEP 500 koji će se inicirati električnim detonatorom.

Dana 17. travnja uklanjanje tornja započelo je postavljanjem eksploziva. Na slici 4-9. prikazano je postavljanje eksplozivnog naboja na čelično uže.



Slika 4-9. Postavljanje eksplozivnog naboja na čelično uže (Bohanek i Dobrilović 2020)

Nakon što je eksploziv postavljen, toranj zakačen za dizalicu i osiguran prostor oko katedrale sve je bilo spremno za miniranje koje se odvijalo oko 18. Odmah nakon miniranja bila je vidljiva uspješnost presijecanja užeta, a skidanje je počelo nekoliko minuta nakon što je potvrđeno da su oslobođeni svi metalni klinovi. Trenutak eksplozije prikazan je na slici 4-10.



Slika 4-10. Trenutak eksplozije (Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, 2020)

5. ZAKLJUČAK

Za presijecanje čeličnog užeta pri skidanju dijela sjevernog tornja Zagrebačke katedrale potrebno je bilo provesti niz testiranja kojima bi se odredila optimalna količina potrebna za uspješno presijecanje. Vidljivo je da proračuni mogu poslužiti samo kao orijentir pri odabiru mase eksplozivnog punjenja dok su za konačni odabir mase punjenja presudni empirijski podaci. Naime upotrijebljena količina eksploziva za rezanje užeta iznosila je manje od 15% od mase eksploziva dobivenog proračunom. Najvažniji parametri za uspješno rezanje su promjer samog užeta i odabir vrste i količine eksploziva kojim bi se postigao što bolji kontakt s užetom. Uspješno skidanje tornja katedrale samo je još jedan primjer važnosti eksploziva u civilnoj upotrebi.

6. LITERATURA

Akbari-Mousavi S.A.A, Barrett L.M., Al-Hassani S.T.S., 2008. Explosive welding of metal plates. Journal of materials processing technology, 29(1), str. 1-19.

Bohanek, V.; Dobrilović, M.; Škrlec, V. 2013. Primjena energije eksploziva pri obradi metala. Rudarsko-Geolosko-Naftni Zbornik, 26, str. 29-37

Bohanek, V.; Dobrilović, M. 2020. Blasting technology for removal of the part of northern tower of Zagreb cathedral. Newsletter of European Federation of Explosive Engineers (u postupku objave)

Bohanek, V., 2008. Kumulativni naboji i njihova upotreba. Seminarski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko naftni fakultet.

CERTEX. Technical description. URL: <https://www.certex.se/en/support/steel-wire-ropes/technical-description> (22.8.2020.)

Čugura, I., 2010. Mjerenje parametara kumulativnog mlaza linijskog kumulativnog rezača. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko naftni fakultet.

Ćulić, P., 2018. Optimiranje parametara pri zavarivanju metala eksplozivom. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko naftni fakultet.

Dennis, J., 1965. Steel cutting with high-explosive charges. Report 1839. Virginia, USA: U. S. Army Engineer Research and Development Laboratories.

Dobrilović, M.; Bohanek, V. 2020. Rezultati ispitivanja rezanja užeta eksplozivom. Zagreb: Rudarsko-geološko naftni fakultet, Laboratorij za ispitivanje eksplozivnih tvari.

Doig A., 1998. Some Metallurgical Aspects of Shaped Charge Liners. Journal of Battlefield Technology, Vol. 1(1), str. 1-12.

Dorneanu, L. 23.6.2007. The most powerful non-nuclear explosives in the world. *Softpedia news*. URL: <https://news.softpedia.com/news/The-Most-Powerful-Non-nuclear-Explosives-in-the-World-58104.shtml> (20.8.2020.)

Ester, Z. (2005): *Miniranje I.: eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja*. Rudarsko–geološko–naftni fakultet, 176 pp, Zagreb.

Farinha A.R., Mendesb. R., Barandab J., Calinasa R. & Vieiraa M. T. (2009): Behaviour of Explosive Compacted/Consolidated of Nanometric Copper Powders, *Journal of Alloys and Compounds*, 483, 235-238.

Garcia-Jacomino J. L., Burgos Sola J., Cruz-Crespo A., Alvarez Luna M. & Garcia Arteaga J. (2010): Use of Explosives in the Reduction of Residual Stresses in the Heated Zone of Welded Joints, *Welding International* 24, (12), 920-925.

Gradiški, K., 2011. Utjecajni parametri kumulativnog mlaza linearnog rezača. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko naftni fakultet.

Headquarters, department of the army, 2007. Explosives and demolitions. Field manual 3-34.214.

Klen, F. 17.4.2020. Povijesni pothvat Hrvatske vojske uklanjanja tornja zagrebačke katedrale. *Ministarstvo obrane Republike Hrvatske*. URL: <https://www.morh.hr/povijesni-pothvat-hrvatske-vojske-uklanjanja-tornja-zagrebacke-katedrale/> (3.9.2020.)

Pavičić, D. 22.3.2020. Zagrebačka katedrala ostala bez južnog tornja. *Večernji list*. URL: <https://www.vecernji.hr/vijesti/video-snimka-iz-zraka-zagrebacka-katedrala-ostala-bez-juznog-tornja-1387923> (3.9.2020.)

Texas machine gun and ordnance. Flexible sheet explosives (detasheet). URL: <https://txmgo.com/index.php/shop/retail-explosives-sales/product/200-flexible-sheet-explosives-detasheet> (20.8.2020.)

Zhang, Z., 2016. *Rock fracture and blasting: Special blasting techniques*. Oxford, Ujedinjeno Kraljevstvo: Butterworth-Heinemann.

Zohoor, M. & Mehdipoor, A. (2009): Explosive Compaction of Tungsten Powder Using a Converging Underwater Shock Wave, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4201-4206.