Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnoga procesa linearnih eksplozivnih naboja

Bohanek, Vječislav

Doctoral thesis / Disertacija

2013

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:419426

Rights / Prava: Attribution-NoDerivs 3.0 Unported/Imenovanje-Bez prerada 3.0

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Vječislav Bohanek

MODEL NASTAJANJA I ANALIZA DJELOVANJA KUMULATIVNOGA PROCESA LINEARNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2013.

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF MINING, GEOLOGY
AND PETROLEUM ENGINEERING

Vječislav Bohanek

MODEL OF CUMULATIVE PROCESS FORMING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF LINEAR SHAPED EXPLOSIVE CHARGES

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2013

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Vječislav Bohanek

MODEL NASTAJANJA I ANALIZA DJELOVANJA KUMULATIVNOGA PROCESA LINEARNIH EKSPLOZIVNIH NABOJA

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Mario Dobrilović

Zagreb, 2013.

Doktorski rad izrađen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor: doc.dr.sc. Mario Dobrilović

U sklopu znanstvenog projekta:

„Emulzijski eksplozivi, inicijalna sredstva i djelovanje miniranja na okoliš“, uz potporu Ministarstva, znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske,

projekt br. 195-1951825-1819, voditelj projekta: doc. dr. sc. Mario Dobrilović.

Doktorski rad sadrži: 156 stranica teksta, 125 slika, 17 tablica i 5 priloga.

Zahvale

Veliko hvala prof. dr. sc. Zvonimiru Esteru na ukazanom povjerenju pri izboru za znanstvenog novaka na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Najljepše mu se zahvaljujem na prenesenom iskustvu, znanju i podršci tijekom svih ovih godina.

Veliko hvala mentoru doc. dr. sc. Mariu Dobriloviću na usmjeravanju, savjetima, pomoći i bezrezervnoj podršci te na nesebično odvojenom vremenu i trudu koje je uložio tijekom izrade ovog rada.

Posebno zahvaljujem dr. sc. Muhamedu Sućeski, nasl. izv. prof. na ustupljenoj literaturi, korisnim sugestijama i stručnim savjetima koji su poboljšali ovaj rad.

Također posebnu zahvalnost dugujem prof. dr. sc. Hinku Wolfu na uloženom trudu pri čitanju rada i sugestijama koje su unaprijedile rad te na iskazanoj susretljivosti.

Hvala kolegama Vinku Škrlecu dipl. ing. rud. i Draženu Pećini na pomoći pri izvođenju ispitivanja.

Hvala svim bivšim i sadašnjim studentima koji su kroz izradu diplomskih i završnih radova te radova za rektorovu nagradu dali svoj doprinos ovom radu.

Gđici. Ivani Krtinić, prof. hvala na lekturi cjelokupnog rada.

Neizmjernu zahvalnost dugujem roditeljima i bratu na velikoj potpori, pomoći i razumijevanju tijekom studiranja i za vrijeme izrade doktorata.

I, na kraju, hvala Maji koja je svojom ljubavi, pažnjom, i pomoći učinila ovo putovanje ljepšim i lakšim.

SAŽETAK

Kumulativni eksplozivni naboji kod kojih je jedna dimenzija, značajno veća od drugih nazivaju se linearni (linijski) kumulativni rezači (*eng. linear shaped charge* - LSC). Linearni kumulativni rezači koriste se u različitim granama industrije te se primjenjuju unutar pojedinih tehnologija: za rezanje metala, primjerice kod rušenja čeličnih konstrukcija, odvajanje iskorištenih spremnika goriva raketa, razminiranje, probijanje otvora u preprekama u vatrogastvu i slično.

Budući da se kumulativni naboji koriste u rudarstvu i naftnom rudarstvu, poznavanje svojstava djelovanja i mogućnost primjene pojedinih izvedbi je od važnosti kako u razini teoretskog razmatranja djelovanja tako i u primjeni. Nastajanje kumulativnoga efekta eksplozivnih naboja proces je koji je prema fizikalnim značajkama i ponašanju materijala obloge različit u slučaju usmjeravanje energije u točku, kod kumulativnih perforatora, od usmjeravanja energije u pravac, kod linearnih rezača. Temeljitije istražen proces kumulativnih perforatora osnova je za razmatranje linearnih kumulativnih rezača koji je složeniji s obzirom na to da se materijal obloge simultano deformira i u uzdužnoj osi rezača. Ubrzavanje i deformiranje obloge kumulativnih rezača posljedica je djelovanja visokih tlakova detonacije eksplozivnog naboja i odvija se u vrlo kratkom vremenu.

Prikazani rezultati mjerenja doprinose boljem razumijevanju kumulativnog procesa linijskih kumulativnih rezača i načina djelovanja linijskih kumulativnih rezača. Kvantificirani i kvalificirani su utjecajni čimbenici koji utječu na učinkovitost linijskih kumulativnih rezača. Na osnovi rezultata mjerenja određena je ovisnost utjecaja pojedinoga čimbenika na dubinu reza linijskih kumulativnih rezača. Razvijene su i validirane metode mjerenja tlaka i brzine ubrzane metalne obloge, odnosno mlaza linijskih kumulativnih rezača. Rezultati mjerenja su analizirani s obzirom na postojeće teorije i spoznaje o načinu djelovanja linijskih kumulativnih rezača. Pored toga u radu je dan pregled drugih postupaka obrade metala energijom eksploziva.

Ključne riječi: eksploziv, kumulativni naboj, linijski kumulativni rezač

SUMMARY

Shaped explosive charges with one dimension significantly larger than the other are called linear shaped charges. Linear shaped charges are used in various industries and they are applied within specific technologies for metal cutting, such as demolition of steel structures, separating spent rocket tanks, demining, cutting holes in the barriers for fire service, etc.

Since the linear shaped charges are used in mining and petroleum engineering, understanding properties of function and applicability of different types of linear shaped charges is of great importance for theoretical analysis and for engineering application. Formation of cumulative effect of explosive charges is a process, which is different, according to the physical properties and behaviour of liner material, in the case of focusing energy to a point (conical shaped charge) and when the energy is focused to a line (linear shaped charge). More researched area of conical shaped charges is a basis for research of linear shaped charges. The cumulative effect of linear shaped charges is more complex since liner material is deformed simultaneously both in vertical and longitudinal axis of a linear shaped charge. Acceleration and deformation of liner material is caused by high pressure due to detonation and is characterized by short duration.

Presented measurement results contribute to a better understanding of the cumulative effect of linear shaped charges and their function. The most important factors that affect efficiency of linear shaped charges are quantified and qualified. Correlation between particular factors and cut depth achieved by the linear shaped charges is determined according to measured results. Methods for measuring pressure and velocity of linear shaped charge jet are developed and validated. The measurement results are analysed with respect to existing theories and knowledge on the linear shaped charges. An overview of other explosive metalworking technologies is also presented in the paper.

Keywords: explosive, shaped charge, linear shaped charge

SADRŽAJ

1 UVOD 1
2 EKSPLOZIVNI PROCESI I EKSPLOZIVNE TVARi 3
2.1 Eksplozivni procesi 3
2.1.1 Detonacijski proces 4
2.2 Eksplozivne tvari 7
2.2.1 Primarni eksplozivi 8
2.2.2 Sekundarni eksplozivi 8
3 OBRADA METALA EKSPLOZIVOM 10
3.1 Zavarivanje metala eksplozivom 11
3.1.1 Proces zavarivanja metala eksplozivom 11
3.1.2 Čimbenici koji utječu na uspješnost zavarivanja metala eksplozivom 13
3.1.2.1 Brzina detonacije eksploziva, brzina udara metalne ploče pri zavarivanju i brzina gibanja točke sudara 14
3.1.2.2 Kut sudara (dinamički kut) i kut između dvije ploče 14
3.1.2.3 Udaljenost između dvije ploče 14
3.2 Oblikovanje metala eksplozivom 15
3.2.1 Metode i sustavi oblikovanja metala eksplozivom 16
3.2.2 Čimbenici koji utječu na oblikovanje metala eksplozivom 17
3.2.3.1 Kalup 17
3.2.3.2 Medij za prijenos energije 18
3.2.3.3 Eksplozivni naboj 18
3.2.3 Primjena metode oblikovanja metala eksplozivom 19
3.3 Rezanje metala eksplozivom 20
3.4 Popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom 22
3.5 Kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom 24
3.5.1 Kompaktiranje primjenom udarnoga klipa 24
3.5.2 Kompaktiranje primjenom cilindra 25
3.6 Povećanje tvrdoće metala eksplozivom 26
4 KUMULATIVNI NABOJI 28
4.1 Povijest kumulativnih naboja 31
4.2 Linijski kumulativni naboji 34
4.3 Primjena linijskih kumulativnih rezača 37
4.3.1 Primjena linijskih kumulativnih rezača u rudarstvu i građevinarstvu 37
4.3.2 Primjena linijskih kumulativnih rezača u naftnoj industriji 39
4.3.3 Primjena linijskih kumulativnih rezača u svemirskoj industriji 41
4.3.4 Primjena LKR u vojnoj industriji, pri razminiranju i vatrogastvu. 42
5 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 43
5.1 Fizikalno matematički modeli i teorije 43
5.1.1 Gurneyjev model 44
5.1.2 Taylorov model 47
5.1.3 Birkhoffov model 49
5.1.3.1 Modificirana Birkhoffova teorija 53
5.1.4 PER teorija 54
5.1.5 Modeli penetracije kumulativnog mlaza 60
5.1.5.1 Penetracija mlaza s konstantnom brzinom 60
5.1.5.2 Penetracija mlaza s nejednolikom brzinom 62
5.1.6 Teorija sječiva 63
5.2 Utjecajni čimbenici 65

5.2.1 Obloga linijskih kumulativnih rezača ... 66
5.2.1.1 Materijal obloge ... 66
5.2.1.2 Oblik obloge ... 68
5.2.2 Eksplozivno punjenje ... 70
5.2.3 Iniciranje ... 72
5.2.4 Kućište ... 73
5.2.5 Udaljenost od ciljanoga materijala ... 74
6 ISPITIVANJA I ANALIZA ISPITIVANJA ... 75
6.1 Ispitni uzorci ... 76
6.1.1 Konstrukcija ispitnih uzoraka ... 76
6.1.2 Eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača. ... 78
6.1.2.1 Brzina detonacije eksplozivnog punjenja ... 80
6.1.2.2 Analiza rezultata mjerenja brzine detonacije eksplozivnog punjenja ... 81
6.1.1 Materijal obloge ... 83
6.2 Prva skupina ispitivanja ... 85
6.2.1 Snimanje brzom kamerom ... 85
6.2.2 Određivanje promjene mase mete ... 88
6.2.3 Oblik i stanje materijala obloge nakon detonacije eksplozivnog punjenja ... 92
6.2.4 Mjerenje brzine mlaza u osi okomitoj na uzdužnu os rezača ... 94
6.2.4.1 Metode mjerenja brzine mlaza ... 94
6.2.4.2 Mjerni postav i rezultati mjerenja ... 96
6.2.5 Mjerenje iznosa tlaka mlaza prilikom nailaska na metu ... 106
6.3 Analiza rezultata prve skupine ispitivanja. ... 113
6.3.1 Analiza snimanja brzom kamerom ... 113
6.3.2 Analiza promjene mase mete ... 113
6.3.3 Analiza oblika i stanje materijala obloge nakon detonacije eksplozivnog punjenja ... 114
6.3.4 Analiza mjerenja brzine mlaza ... 116
6.3.5 Analiza mjerenja tlaka obloge prilikom nailaska na metu ... 122
6.4 Druga skupina ispitivanja ... 126
6.4.1 Mjerenje dubine reza ... 126
6.4.2 Utjecaj mase eksplozivnog punjenja, odmaka i materijala obloge ... 128
6.4.3 Utjecaj načina iniciranja ... 138
6.4.4 Utjecaj metalnog praha u eksplozivnom punjenju ... 142
6.5 Analiza rezultata druge skupine ispitivanja ... 148
6.5.1 Analiza utjecaja mase eksplozivnog punjenja, odmaka i materijala obloge ... 148
6.5.2 Analiza utjecaja načina iniciranja ... 150
6.5.3 Analiza utjecaja metalnog praha u eksplozivnom punjenju ... 152
7 Zaključci ... 153
Literatura ... 157
Popis tablica ... 164
Popis slika ... 166
Popis priloga ... 171
Prilozi ... 172
Popis korištenih oznaka i odgovarajučih jedinica ... 186
Popis kratica ... 189
Životopis ... 190
Popis objavljenih radova ... 192

1 Uvod

Energija eksploziva se koristi za različite namjene u području civilne i vojne industrije. Najraširenija primjena eksploziva je za miniranja pri dobivanju mineralnih sirovina u rudarstvu i različitih iskopa za potrebe građevinarstva. Posebno područje primjene energije eksploziva je grupa postupaka koji se zajedničkim imenom nazivaju obrada metala eksplozivom (*engl. explosive metalworking*). Pojedinim postupkom metal se oblikuje, reže ili perforira, zavaruje, kompaktira, povećava mu se tvrdoća, gustoća itd.

Rezanje ili perforiranje metala eksplozivom izvodi se kumulativnim eksplozivnim nabojima. Kumulativni naboji su eksplozivna punjenja oblikovana sa svrhom usmjeravanja oslobođene energije eksploziva u točku ili pravac. S obzirom na način usmjeravanja energije postoje dvije izvedbe kumulativnih naboja: konusni kumulativni naboji ili perforatori i linearni (linijski) kumulativni naboji ili rezači. Kumulativni naboji kod kojih je jedna dimenzija, značajno veća od drugih nazivaju se linearni (linijski) kumulativni rezači ili skraćeno LKR (*engl. linear shaped charge - LSC*). Linearni 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, neutralizaciji zaostalih bojevih glava i mina, probijanja otvora u preprekama u vatrogastvu i slično.

Nastajanje kumulativnoga procesa i djelovanje linijskih kumulativnih naboja predmet je mnogih istraživanja. Povijesno gledajući, istraživanja su bila usmjerena prema proučavanju konusnih perforatora, a razlog tomu su značajna sredstva koja su vojna i naftna industrija uložile u istraživanje perforatora koji se koriste za bojeve glave u vojnoj industriji i perforiranje stijene u naftnoj industriji. Linijski kumulativni rezači istraživani su u manjoj mjeri. Način djelovanja linijskih kumulativnih rezača poistovjećuje s djelovanjem konusnih perforatora. U nekim se slučajevima postojeći modeli koji opisuju djelovanje kumulativnih perforatora, dorađuju i prilagođavaju procesu linijskih kumulativnih rezača. S druge strane, pojedine teorije o djelovanju linearnih kumulativnih rezača nisu u skladu s postojećim teorijama, odnosno objašnjavaju način djelovanja rezača na značajno drugačijem fizikalnom modelu.

U literaturi su prepoznati čimbenici koji utječu na učinkovitost linijskih kumulativnih rezača koja se određuje dubinom reza koju pojedini rezač, definiranih konstrukcijskih značajki, može postići u ciljanom materijalu.

Utjecajni čimbenici su:

- materijal obloge kumulativnog prostora,
- oblik kumulativnog prostora i obloge,
- eksplozivno punjenje (oblik, vrsta i masa),
- udaljenost kumulativnog rezača od ciljanog materijala,
- mjesto iniciranja i način iniciranja i
- utjecaj kućišta.

Broj čimbenika koji utječu na učinkovitost linijskog kumulativnog rezača komplicira proces optimiziranja djelovanja linijskih kumulativnih rezača. Budući da je za određivanje utjecaja pojedinog čimbenika potrebno provesti ispitivanja uz nepromijenjenost ostalih, višestruko se umnaža potreban broj ispitivanja. Iz tog razloga istraživanjem se uglavnom proučava utjecaj pojedinog čimbenika na učinkovitost kumulativnog naboja. Većina autora su ispitivanja provela na konusnim kumulativnim nabojima, a manji dio je proučavao linijske kumulativne rezače. Pregledom literature utvrđeno je da ne postoje sustavna istraživanja u području linijskih kumulativnih rezača koja utjecajne čimbenike kvantificiraju, kvalificiraju i određuju međusobnu funkcijsku zavisnost. Nakon pregleda, sistematizacije i analize literature, definiran je cilj istraživanja iz kojeg su proizašle i hipoteze istraživanja.

Cilj istraživanja je doprinos u razumijevanju formiranja kumulativnog procesa i načina djelovanja linijskih kumulativnih rezača, te kvantificiranje i kvalificiranje utjecaja pojedinih utjecajnih čimbenika na proces nastanka i učinak linijskog kumulativnog rezača.

Ciljem istraživanja definirane su i hipoteze istraživanja:

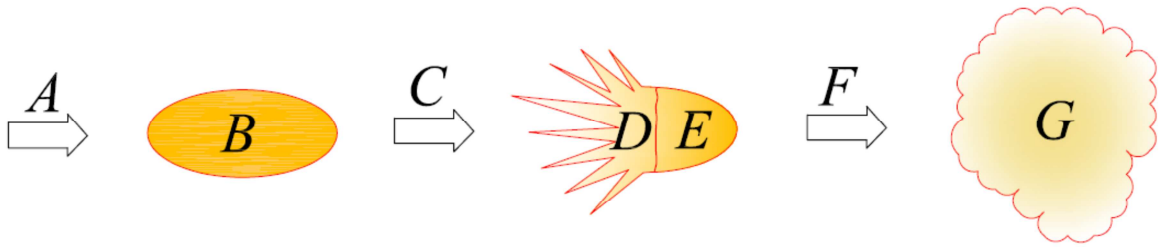
- postoji značajna razlika u načinu djelovanja linijskih kumulativnih rezača i konusnih perforatora,
- djelovanje linijskih kumulativnih rezača se zasniva na prostorno drugačijem modelu,
- postojeće teorije i modele potrebno je prilagoditi za opis procesa linijskih kumulativnih rezača,
- moguće je egzaktno utvrditi doprinos pojedinog čimbenika u procesu rezanja linijskog kumulativnog rezača,
- moguće je izraziti funkcijsku ovisnost dubine reza o pojedinom čimbeniku,
- moguće je grupirati pojedine čimbenike s obzirom na njihov utjecaj i
- moguće je prilagoditi materijal obloge, geometrijske karakteristike i eksplozivno punjenje rezača karakteristikama materijala mete.

2 Eksplozivni procesi i eksplozivne tvari

2.1 Eksplozivni procesi

Pojam eksplozija dolazi od latinske riječi *explodere* što znači raspasti se. Definiciju pojma eksplozija ponudilo je više autora. Prema Baumu i suradnicima eksplozija se u općem smislu definira kao proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prijelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad. Prema Derminu eksplozija se definira kao proces brzog oslobađanja velike količine energije u ograničenom volumenu. Prema Johanssonu i Perssonu eksplozija se definira kao nagla ekspanzija tvari do volumena mnogo većeg od njena početnog volumena. Može se reći da je eksplozija egzotermna, vrlo brza pretvorba početne tvari ili sustava uz ekspanziju nastalih plinovitih produkata (Sućeska 2001).

Eksplozivna pretvorba obavlja se u vremenu 10^{-5} s, a shematski prikaz eksplozije dan je na Slici 2-1.



Kazalo:
A - inicijalni impuls (udar, plamen, toplina, trenje),
B - neporemećena eksplozivna tvar (T≈20 °C, v≈0,2-1,5 kg/dm^3, p≈1 bar),
C - kemijski proces pretvorbe,
D - plinoviti produkti,
E - neporemećena eksplozivna tvar,
F - ekspanzija plinovitih produkata,
G - plinoviti produkti u ekspanziji (T≈2000-5000 °K, v≈1000 kg/dm^3, p≈10^5 bar, Q≈3,5-7,5 kJ/g).

Slika 2-1. Eksplozija (Dobrilović 2008)

Poštujući te definicije, eksplozije se prema karakteru procesa pretvorbe mogu podijeliti na fizikalne, nuklearne i kemijske. U prirodi, na Zemlji i u svemiru dolazi do

eksplozija kao što su eksplozije električnog pražnjenja munje, vulkanske i eksplozije elastičnog sabijanja zemljinih ploča kod potresa (gorski udari) i provale plina u rudnicima, zatim eksplozije pri udaru (npr. meteora), eksplozije u svemiru itd. (Sućeska 2001).

Fizikalne eksplozije u mehanizmu pretvorbe početne tvari uključuju fizikalne procese kod kojih, nakon povećanja tlaka sredine, dolazi do nagle ekspanzije uz eksplozivne pojave. Takve su eksplozije parnog kotla, ili ekspanzije jako stlačenog plina u spremniku. Nuklearne eksplozije uključuju reakcije fuzije i fisije uz oslobađanje velikih količina energije. Te se reakcije u svemiru, odnosno zvijezdama, dešavaju spontano, a na Zemlji su posljedica ljudskog djelovanja (Sućeska 2001). Prema Plešeu, kemijske eksplozije su procesi koji se dešavaju u eksplozivnim tvarima i čija se energija koristi za dobivanje energije, odnosno mehaničkoga rada (Dobrilović 2008).

Tvari koje pod određenim uvjetima mogu eksplodirati nazivaju se eksplozivi. Eksplozija se može odvijati na dva načina: kao sagorijevanje i kao detonacija. Ovisno o željenoj namjeni i karakteristikama korištenih tvari, obje reakcije se koriste za dobivanje korisnog rada.

2.1.1 Detonacijski proces

Da bi određeni energetski materijal detonirao, moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti:

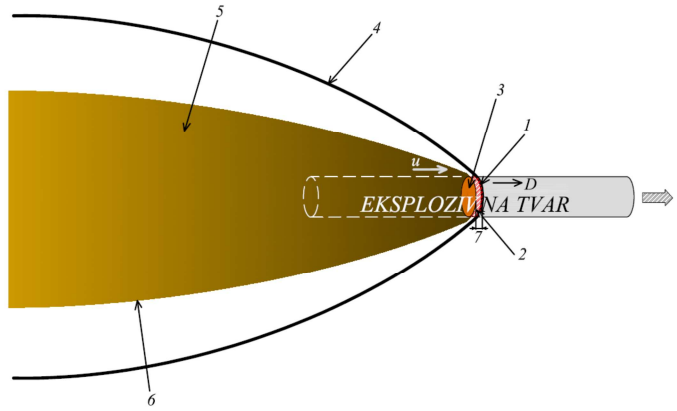
- materijal mora imati svojstva eksploziva, odnosno sposobnost formiranja detonacije,
- inicijalni impuls mora imati dovoljnu energiju za poticanje stabilne detonacije u eksplozivu.

Iniciranje detonacije u praksi primjene eksplozivnih tvari može nastati na sljedeće načine:

- dovođenjem topline eksplozivnom materijalu,
- prelaskom sagorijevanja u detonaciju - inicijalni eksplozivi i
- djelovanjem udarnoga impulsa i toplim točkama - sekundarni eksplozivi.

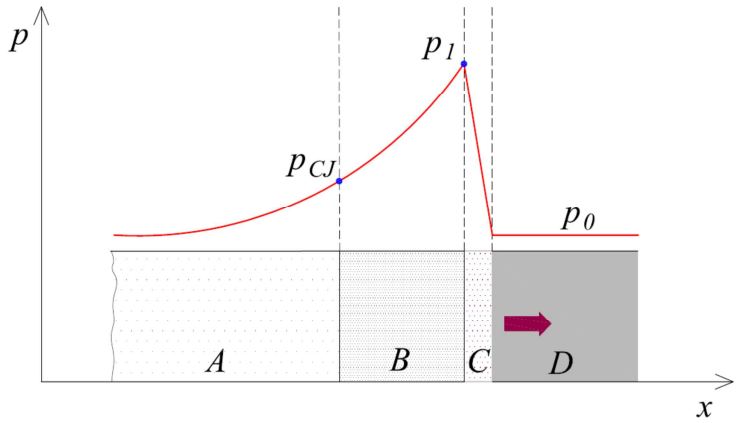
Prema karakteristikama eksplozivne tvari i potrebnoj inicijalnoj energiji, pojedine eksplozivne tvari ne mogu iz sagorijevanja razviti detonaciju ni u kojim uvjetima. Za razvijanje stabilne detonacije potrebno im je dovesti energiju u obliku inicijalnog impulsa odgovarajućeg iznosa. Detonacija ima nekoliko karakteristika koji je razlikuju od sagorijevanja eksplozivne tvari i ostalih eksplozija. Detonacija je redovito nadzvučni proces u odnosu na brzinu zvuka u eksplozivnoj tvari. Širi se mehanizmom toplih točaka, defekata ili

uključaka u eksplozivnoj tvari koji postaju centri za daljnje širenje reakcije. Zbog visokih tlakova reda nekoliko stotina kilobara materijal ne reagira kao cjelina, već u malim segmentima. Ispred fronte kemijskih reakcija nalazi se fronta udarnog vala, zona visokostlačenog eksplozivnog materijala pripremljenog za reakciju. Cijela reakcija obavi se u redu veličine vremena ns do μs. Izreagirani produkti detonacije, odnosno plinovi, nalaze se u volumenu koji je gotovo identičan polaznom volumenu tvari, a toplina je već oslobođena pa su produkti zagrijani na visoke temperature i nalaze se pod visokim tlakom. Budući da su pod visokim tlakom, prilikom ekspanzije oslobađaju energiju i prate frontu udarnog vala koji se širi i kroz eksplozivnu tvar i kroz okolinu, zrak ili stijenu, ovisno o tome u kojem se mediju detonacija zbiva. Produkti detonacije slijede Taylorovu distribuciju gustoća i brzina, a fronta im je omeđena Taylorovim valom (Dobrilović 2008). Slika 2-4. prikazuje detonacijski proces u patroni eksploziva. Slika 2-5. prikazuje raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu. Na Slici 2-6. prikazan je detonacijski proces u p-v dijagramu.



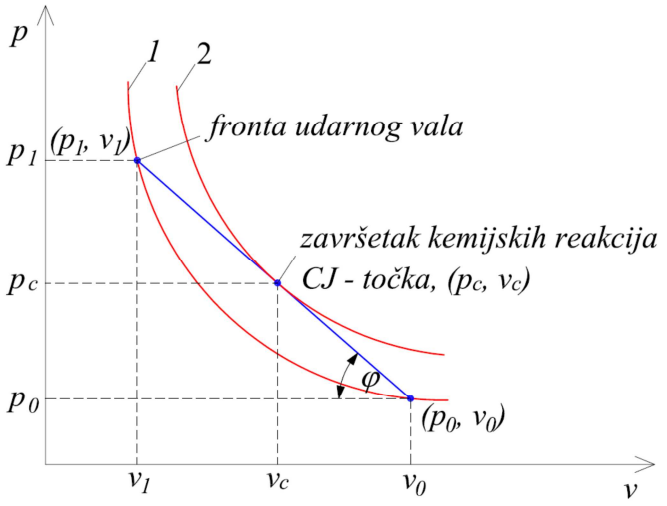
Kazalo:
1 - fronta udarnog vala,
2 - zona kemijskih reakcija,
3 - Chapman-Jougueotova ravnina,
4 - udarni val u okolnom mediju,
5 - ekspandirajući plinoviti produkti,
6 - Taylorov val produkata,
D - brzina detonacije (m/s),
u - brzina produkata (m/s)

Slika 2-2. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović 2008)



Kazalo:
A - produkti detonacije,
B - zona kemijskih reakcija,
C - fronta udarnog vala
D - neporemećeni eksploziv,
p - tlak (bar, Pa),
x - duljina,
p_{CJ} - tlak u CJ točki,
p_1 - vršni tlak udarne adijabate (von Neumanov vrh),
p_0 - tlak okoline (bar, Pa).

Slika 2-3. Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Dobrilović 2008)



Kazalo:

φ - kut nagiba Rayleighova pravca (°),
p_c - tlak u CJ točki (bar, Pa),
v_c - volumen, specifični volumen u CJ točki (m^3, m^3/kg),
1 - udarna adijabata,
2 - adijabata produkata,
3 - Rayleighov pravac

Slika 2-4. Detonacijski proces u p-v dijagramu (Dobrilović 2008)

Razumijevanjem detonacijskog procesa, uz poznavanje kemijskog sastava eksplozivne tvari i kemijskih reakcija koje se događaju tijekom procesa, moguće je predvidjeti ponašanje eksplozivne tvari u danim okolnostima i te procese opisati mehaničkim, termodinamičkim i kemijskim zakonima. Pojedine parametre detonacijskog procesa (brzina detonacije, brzina plinovitih produkata i tlak detonacije) moguće je eksperimentalno izmjeriti.

U svrhu razumijevanja detonacijskog procesa, tijekom 19. i 20. stoljeća razvijale su se teorije koje opisuju detonacijske procese. Takozvana *CJ* (Chapman & Jouguet) jednodimenzionalna teorija detonacijskog procesa pretpostavlja hidrodinamičku prirodu stabilne detonacije i odnose veličina tlaka, volumena i temperature prilikom odvijanja procesa koji se događa u zoni tlačnoga udarnog vala između izreagiranog i neporemećenog eksploziva. Ta teorija pretpostavlja odvijanje kemijskih reakcija u zoni udarnog vala. Prema njoj se sva energija trenutno oslobađa u toj zoni (Dobrilović 2008).

ZND teorija (Zeldovich, Von Neuman & Döring) nadopunjuje CJ teoriju na način da zona tlačnoga vala nije zona reakcija, već se ta zona nalazi iza zone tlačnoga udarnog vala i te dvije zone čine detonacijski val. Prema tome, stanje tvari u toj zoni u pojedinim se vremenskim intervalima može opisati nizom paralelnih Hugoinotovih krivulja. Poboljšanja modela detonacijskih procesa uključuju promatranje prostornih detonacijskih valova odnosno njihove zakrivljenosti, modele sekvencijalnog reagiranja eksplozivne tvari pod djelovanjem tlačenja i određivanja veličine politropskog (adijabatskog) eksponenta za realne tvari u području izuzetno visokih tlakova i temperatura (Dobrilović 2008).

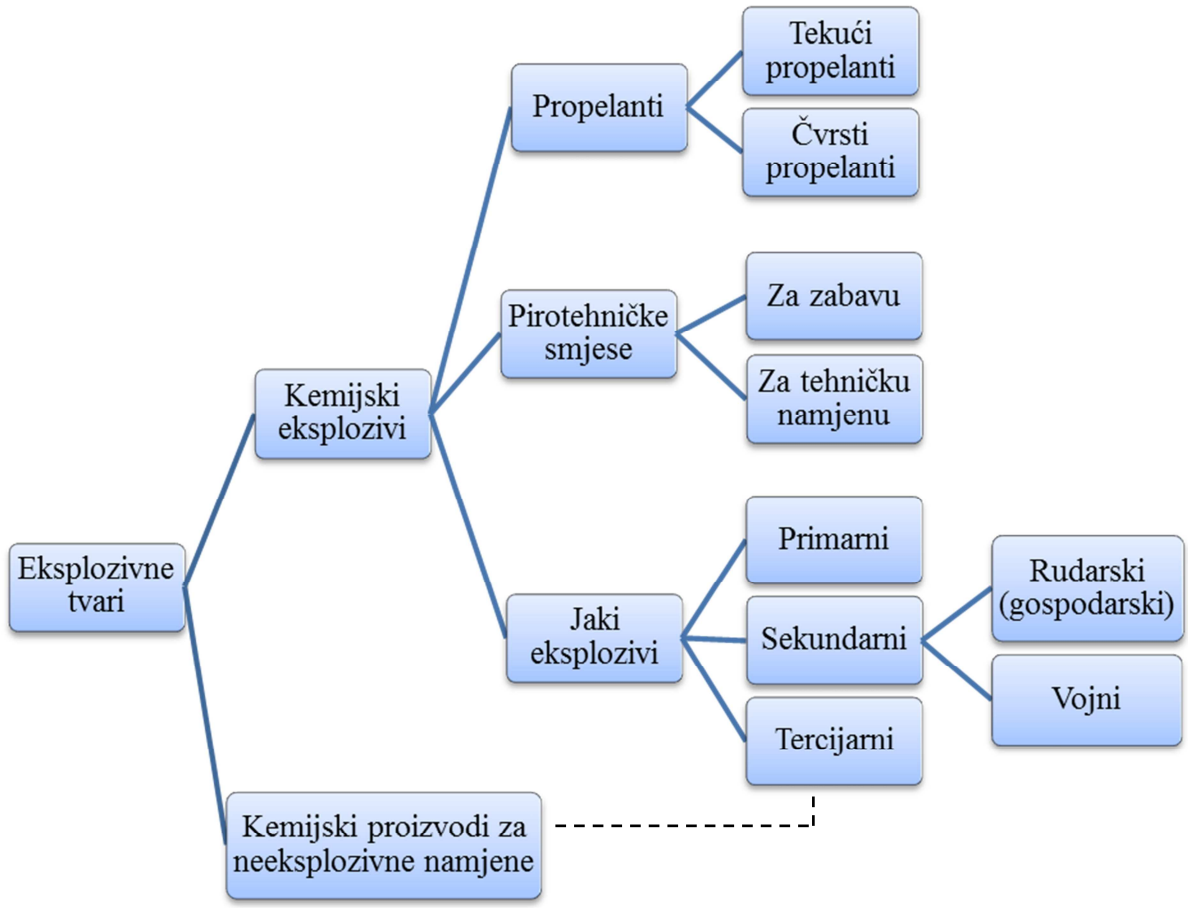
2.2 Eksplozivne tvari

Eksplozivne tvari ili eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno da se kemijski razlažu u vrlo kratkom vremenskom razdoblju i pritom oslobađaju znatnu količinu plinova i topline (Krsnik 1989). Trenutačno oslobađanje energije i produkata reakcije pri visokom tlaku za vrijeme brze kemijske reakcije prouzrokuje nastanak tlačnih valova. Ti su valovi nazvani detonacijskim ili udarnim valovima (Ester 2005).

Trenutno je poznat veliki broj eksploziva koji se razlikuju po sastavu, fizičko-kemijskim i eksplozivnim svojstvima, stoga se nameće potreba za racionalnom klasifikacijom eksploziva (Petrushkov 2009).

S obzirom na veliki broj karakteristika prema kojima se eksplozivne tvari razlikuju postoji više različitih podjela eksplozivnih tvari predloženih od različitih autora.

Na Slici 2-7. prikazana je opća podjela eksplozivnih tvari.



Slika 2-5. Opća podjela eksplozivnih tvari (Dobrilović 2008)

Upotrebe eksploziva je mnogostruka. Eksploziv se koristi u vojne svrhe, u strojarstvu, automobilskoj i avio industriji, čak i u medicini. Ipak se najviše eksploziva koristi u rudarstvu i građevinarstvu (Ester 2005).

S obzirom na to da se za linijske kumulativne rezače, njihovu konstrukciju i iniciranje, koriste samo eksplozivne tvari iz skupine jakih eksploziva (*engl. High explosives*), točnije primarni i sekundarni eksplozivi, samo su oni detaljnije opisani.

Primarni i sekundarni eksplozivi se odlikuju detonacijom kao osnovnim oblikom eksplozivne kemijske pretvorbe, iako sekundarni eksplozivi mogu pod određenim uvjetima stabilno sagorijevati. Stoga se njihovo djelovanje na okolinu očituje u vidu snažnog udara detonacijskih produkata i stvaranja udarnog vala.

2.2.1 Primarni eksplozivi

Primarni ili inicirajući eksplozivi, kako se još nazivaju, koriste se za iniciranje detonacije drugih eksploziva i na prvom su mjestu u lancu iniciranja.

Karakteristična svojstva inicijalnih eksploziva su:

- iznimno su osjetljivi na vanjske impulse u obliku topline, udara, trenja itd.
- maksimalna brzina detonacije se razvija u vrlo kratkom vremenu, gotovo trenutno.

Primarni eksplozivi se koriste pri proizvodnji različitih vrsta detonatora. Premda su vrlo osjetljivi na vanjski impuls, kada ih se spreša u metalno kućište postaju sigurni za rukovanje. Primarni ili inicirajući eksplozivi koji se najviše koriste u praksi su: živin fulminat, olovni azid, srebro azid, olovni stifnat, tetracen, diazodinitrofenol.

2.2.2 Sekundarni eksplozivi

Sekundarni ili brizantni eksplozivi, u usporedbi s inicirajućim eksplozivima, trebaju veću energiju za iniciranje pa su sa stajališta rukovanja eksplozivnih tvari sigurniji za rukovanje. U praksi se uvijek iniciraju pomoću inicijalnih sredstava koje sadrže primarne eksplozive. S obzirom na područje u kojemu se sekundarni eksplozivi koristi mogu se podijeliti na :

- rudarske ili gospodarske eksplozive (*engl. Explosives for civile uses)* i
- vojne eksplozive.

S obzirom na kemijski sastav eksplozivi se mogu podijeliti na:

- monomolekularne eksplozivi i
- eksplozivne smjese.

Monomolekularni eksplozivi su kemijske tvari sastavljene od jedne vrste molekula, odnosno jednog kemijskog spoja. Takvi spojevi imaju eksplozivna svojstva u čistom stanju i koriste se samostalno ili se kombiniraju s drugim spojevima zbog poboljšanja eksplozivnih svojstava.

Smjese mogu biti: mješavine ili samo eksplozivnih komponenti, ili eksplozivnih i neeksplozivnih komponenti, ili smjese neeksplozivnih komponenti koje su zajedno eksplozivne. Pritom se u smjesama nalaze i monomolekularni eksplozivi i eksplozivne smjese kao komponente cjelokupnog eksploziva.

Sekundarni rudarski (gospodarski) eksplozivi:

- monomolekularni: oktogen, pentrit, nitroglikol, nitrometan,
- smjese: ANFO (*elmex, elmexal, anfeks, nitrol*); emulzije (*elmuleks, elmuleksal, emsit, lambrex*); vodoplastične smjese (*kamex, riogel*); praškaste smjese (*amonal, amoneks, permonex, polonit*); želatinozne smjese (*gelamon, perunit, gelatin donarit, danubit, goma 2 eco, austrogel*), pentolit (*pentrit:trotil=50:50*).

Sekundarni vojni eksplozivi:

- monomolekularni: trinitroulen, heksogen, pentrit, tetril, nitroglicerin.
- smjese: kompozicija B (*RDX:TNT=60:40*), heksotol, torpex (*RDX:TNT:aluminijski prah=41:41:18*), plastični na bazi RDX-a.

3 Obrada metala eksplozivom

Primjena eksploziva za obradu metala počela je istraživanjima koje je izveo Monroe 1888. godine. Većina značajnih istraživanja vezanih za obradu metala eksplozivom provedena su pedesetih godina 20. stoljeća, a rezultirala su različitim oblicima primjene eksploziva za obradu metala. Najveći doprinosi razvoju pojedinih metoda obrade metala nalaze se u raketnoj i zrakoplovnoj industriji koje su bile glavni investitori u ovo područje. Mnogi postupci obrade metala eksplozivom koriste se kao komercijalni postupci u proizvodnji, dok su pojedini u stadiju istraživanja mogućnosti primjene.

Postupke obrade metala eksplozivom moguće je podijeliti s obzirom na pozicioniranje eksplozivnog naboja u odnosu na obradak. Podjelom su metode razvrstane u dvije skupine:

- kontaktne metode, kod kojih se eksploziv nalazi u kontaktu sa obratkom i
- nekontaktne metode, kod kojih je eksploziv na određenoj udaljenosti od obratka, a udarni valovi se prenose kroz različite medije poput zraka, vode, različitih ulja itd.

Druga podjela, koja je više u upotrebi, je podjela postupaka obrade metala s obzirom na namjenu postupka. Podjela razlikuje sljedeće postupke obrade metala eksplozivom:

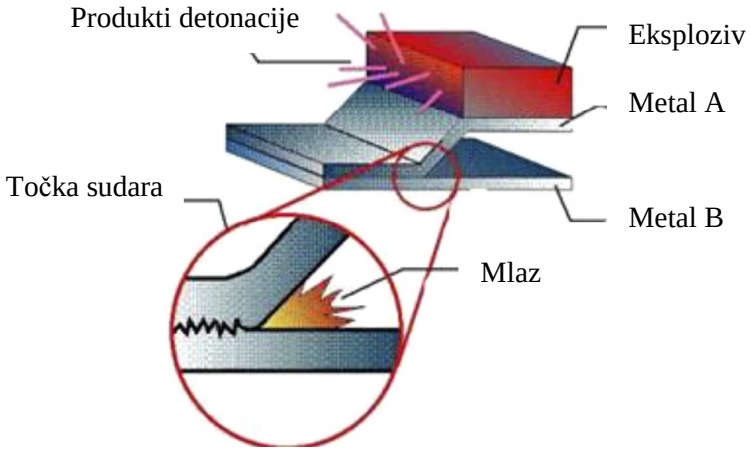
- zavarivanje metala eksplozivom,
- oblikovanje metala eksplozivom,
- rezanje ili perforiranje metala eksplozivom,
- popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom,
- kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom i
- povećanje tvrdoće metala eksplozivom.

3.1 Zavarivanje metala eksplozivom

Za vrijeme Prvoga svjetskog rata primijećeno je da metalne krhotine tijela granate nakon detonacije ostaju zalijepljene za metale koji se nalaze u okolini. Ova pojava je prethodila pronalasku tehnologije zavarivanja metala eksplozivom. L. R. Carl je 1944. godine dokumentirao svoja istraživanja o zavarivanju metala primjenom eksploziva. Prikazan je niz eksperimenata zavarivanja metala energijom eksploziva, pri kojima je najčešće korištena bronca. „DuPont Chemical“ je prva kompanija koja je razvila i patentirala tehnologiju zavarivanja metala eksplozivom. Patent je objavljen 1964. godine (Young 2004). Danas se zavarivanje metala eksplozivom koristi kao standardni komercijalni postupak zavarivanja u različitim granama industrije.

3.1.1 Proces zavarivanja metala eksplozivom

Pri procesu zavarivanja metala eksplozivom razlikujemo dvije metalne ploče, jedna je, u pravilu stacionarna, odnosno nepomična (metal B) i može biti bilo koje debljine. Druga ploča (metal A) ubrzava se detonacijom eksplozivnoga punjenja i zavaruje na metal B. Postupak zavarivanja metala eksplozivom prikazan je Slikom 3-1.

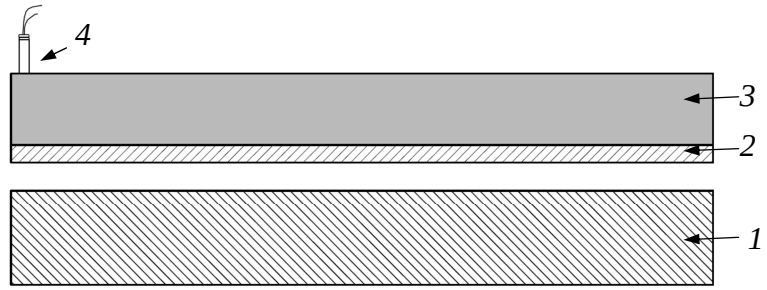


Slika 3-1. Postupak zavarivanja metala eksplozivom (Akbari Mousavi & Al-Hassani 2008)

Zavarivanje metala eksplozivom uzrokovano je detonacijom eksplozivnog naboja i vremenski gledano se odvija u vrlo kratkom vremenu, reda veličin u µs. Proces se može podijeliti u tri faze:

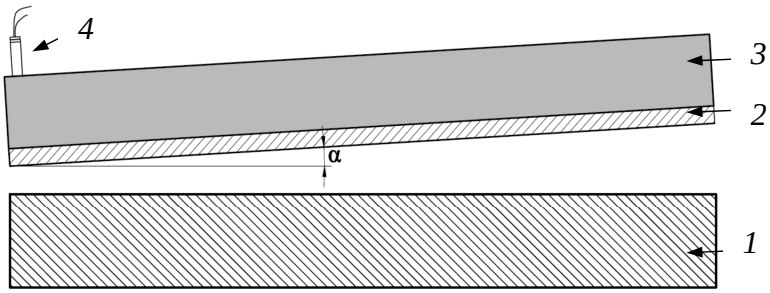
1. detonacija eksplozivnog punjenja,
2. deformacija i ubrzanje metala A i
3. spajanje (zavarivanje) metala (metal A i metal B).

Detonacijom eksplozivnoga punjenja ubrzava se metal A u pravcu metala B. Za zavarivanje se koriste dvije osnovne konfiguracije, odnosno tehnike. U prvoj konfiguraciji metalna ploča koje se ubrzava je paralelna s metalnom pločom na koju se zavaruje, a u drugoj konfiguraciji se nalazi pod određenim kutom u odnosu na ploču na koju se zavaruje. Ukoliko se koristi kutna metoda, metalna ploča se postavlja pod kutom koji iznosi od 2º do 10º. Konfiguracije koje se koriste pri zavarivanju metala eksplozivom prikazane su Slikom 3-2.



Kazalo:
1 - metal B,
2 - metal A,
3 - eksplozivni naboj i
4 - detonator.

a) paralelna metoda zavarivanja



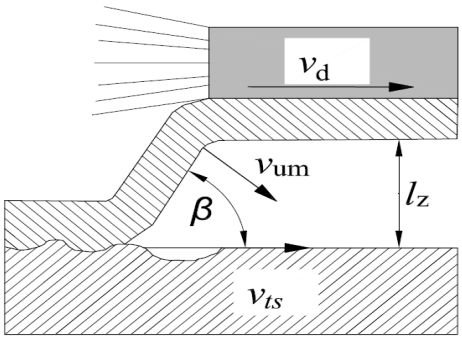
Kazalo:
1 - metal B
2 - metal A
3 - eksplozivni naboj i
4 - detonator.

b) kutna metoda zavarivanja

Slika 3-2. Konfiguracije koje se koriste za zavarivanje

Za uspješan proces zavarivanja nužan je nastanak mlaza u točki spoja dvaju metala. Nastajanje mlaza i prethodi spajanju dva metala. Mlaz u procesu zavarivanja djeluje dvojako: ispred točke spoja uklanja oksidni sloj s metalne površine te uzrokuje boranje materijala i definira oblik spoja dvaju metala. Za nastajanje spoja nužno je djelovanje tlaka dovoljnog iznosa unutar određenog vremenskog perioda. Visoki tlak uzrokuje lokalne plastične deformacije u zoni spoja.

Proces zavarivanja može se opisati odnosom vektora brzina i geometrijskim značajkama postava zavarivanja. Na Slici 3-3. dan je geometrijski odnos vektora brzina koji vrijedi ukoliko se za zavarivanje koristi paralelna konfiguracija.



Kazalo:
v_d - brzina detonacije eksploziva (m/s),
v_{um} - brzina udara metala pri zavarivanju (m/s),
v_{ts} - brzina gibanja točke sudara (m/s),
β - kut sudara (dinamički kut) (°) i
l_z - udaljenost između ploča (m).

Slika 3-3. Geometrijski odnos vektora brzina (Akbari Mousavi & Al-Hassani 2005)

Veza između kuta sudara β, brzine detonacije eksploziva v_d, brzina gibanja točke sudara v_{ts} i brzina udara metalne ploče v_{um} za paralelnu konfiguraciju se matematički može izraziti jednadžbom (Akbari Mousavi et al. 2008):

$$v_{um} = 2v_{ts} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{3-1}$$

gdje je:

v_{um} - brzina udara metala pri zavarivanju (m/s),

v_{ts} - brzina gibanja točke sudara (m/s) i

β - kut sudara (dinamički kut) (°).

Brzina gibanja točke sudara v_{ts} je, pri paralelnoj konfiguraciji, jednaka brzini detonacije eksploziva v_d. Ukoliko za zavarivanje koristimo konfiguraciju u kojoj se ploča koja se zavaruje nalazi pod kutom α u odnosu na ploču na koju se zavaruje, jednadžba glasi:

$$v_{um} = v_{ts} \frac{\sin\beta}{\cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)} \tag{3-2}$$

gdje je:

α - kut između dvije ploče (°).

3.1.2 Čimbenici koji utječu na uspješnost zavarivanja metala eksplozivom

Do zavarivanja metala može doći samo prilikom nastanka mlaza, a da bi nastao mlaz nužno je uskladiti niz parametara:

- v_d - brzina detonacije eksploziva,
- v_{um} - brzina udara metala,
- v_{ts} - brzina gibanja točke sudara,
- β - kut sudara (dinamički kut) i
- l_z - udaljenost između ploča.

3.1.2.1 *Brzina detonacije eksploziva, brzina udara metalne ploče pri zavarivanju i brzina gibanja točke sudara*

Brzina detonacije eksploziva je ključni parametar u procesu zavarivanja metala eksplozivom. O brzini i tlaku detonacije ovisi kako i koliko će se ubrzati metalna ploča kojom se zavaruje, te njezina brzina u trenutku udara. O vrsti eksploziva, specifičnoj masi naboja i udaljenosti između dva metala ovisi uspješnost procesa. Eksplozivi koji se koriste pri zavarivanju moraju imati sljedeće karakteristike:

- brzina detonacije mora biti manja od brzine zvuka u metalima koji se koriste, brzina iznosi od 1500 m/s do brzine zvuka u metalu,
- ukoliko se koriste tanki slojevi eksploziva, eksploziv mora imati stabilnu detonaciju i
- eksploziv mora biti siguran za rukovanje, jeftin, postojanih svojstava te ne smije biti štetan za okolinu (Petrushkov 2009).

Komercijalni eksplozivi velikih brzina detonacije rijetko se koriste zbog mogućnosti oštećenja metala koji se spajaju. Najviše se koriste ANFO eksplozivi koji su pogodni s obzirom na brzinu detonacije, jednostavnu proizvodnju, cijenu i sigurnosne parametre. ANFO eksploziv se prilikom zavarivanja obično stavlja u drvene kutije. Budući da ANFO eksploziv nije osjetljiv na inicijalni impuls RK 8, za iniciranje se uz detonator koristi i pojačnik. Ukoliko je brzina ANFO eksploziva prevelika za zavarivanje, eksploziv se miješa sa inertnim materijalom poput pijeska i perlita kako bi mu se smanjila brzina detonacije.

Brzina udara pri zavarivanju ovisi o brzini detonacije korištenog eksploziva, masi eksploziva po jedinici mase metala i konfiguraciji koja se koristi. Brzina materijala kojim se zavaruje u točki sudara trebala bi iznositi od 200 m/s do 500 m/s. Brzina gibanja točke sudara ovisi o vrsti eksploziva i konfiguraciji koja se koristi.

3.1.2.2 *Kut sudara (dinamički kut) i kut između dvije ploče*

Prema iskustvenim podacima smatra se da kut koji zatvaraju dvije metalne površine u točki udara iznosi od 2º do 25º. Ukoliko se koristi kutna metoda zavarivanja, kut između dvije ploče iznosi od 2º do 10º.

3.1.2.3 *Udaljenost između dvije ploče*

Udaljenost između dvije ploče mora biti takva da metalna ploča kojom se zavaruje postigne brzinu koja je potrebna za proces zavarivanja. Udaljenost se izražava u odnosu na debljinu ploče kojom se zavaruje (d_{pz}). Prema iskustvenim podacima minimalna udaljenost

pogodna za zavarivanje iznosi 0,5 d_{pz}. Empirijski izvedena formula za određivanje optimalne udaljenosti glasi :

$$l_{\mathrm{z}} = 3k\ d_e C/M \tag{3-3}$$

gdje je:

l_{z} - udaljenost između ploča (mm),

k - koeficijent koji ima vrijednost od 3 do 7, ovisno o zahtijevanoj brzini udara,

d_{e} - debljina sloja eksploziva (m),

C - masa eksploziva (kg) i

M - masa metala koji se ubrzava (kg).

3.2 Oblikovanje metala eksplozivom

Tehnologija oblikovanja i obrade metala deformiranjem je u zapravo skupina metoda izrade proizvoda ili poluproizvoda zasnovanih na plastičnoj deformaciji (Povrzanović 1996). Plastična deformacija kontinuuma je proces koji rezultira trajnom promjenom oblika i promjenom pozicija strukturalnih dijelova relativno u odnosu na originalne tj. prvobitne pozicije i oblik. Proces plastične deformacije je ireverzibilan, a materijal zadržava kontinuitet i kompatibilnost, sa izuzetkom promjena u mikrostrukturi (Math 1999).

Za oblikovanje metala eksplozivom koristi se energija eksplozivnih naboja koja generira udarne valove u nekom mediju, koji se usmjeravaju prema obratku i deformiraju ga vrlo velikim brzinama. Osnovna razlika između ove i konvencionalnih metoda oblikovanja je u uporabi eksplozivnog naboja i vrlo kratkom vremenu oblikovanja.

Dok se konvencionalne metode oblikovanja metala deformiranjem odlikuju brzinama deformiranja od 10 m/s, brzine deformiranja kod oblikovanja metale eksplozivom iznose od 100 m/s do 300 m/s (Sućeska 2001).

S obzirom na prostorni odnos između eksploziva i metala koji se oblikuje oblikovanje metala može se podijeliti na:

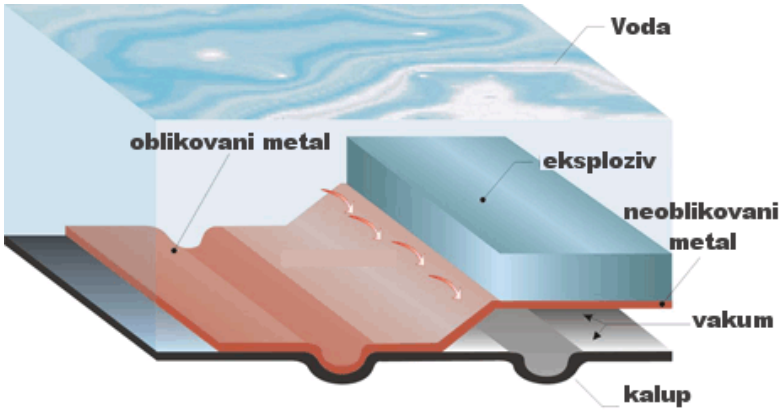
- oblikovanje kontaktnom metodom i
- oblikovanje nekontaktnom metodom.

Prema sustavu koji se koristi oblikovanje metala eksplozivom može se podijeliti na:

- zatvoreni sustav oblikovanja metala i
- otvoreni sustav oblikovanja metala.

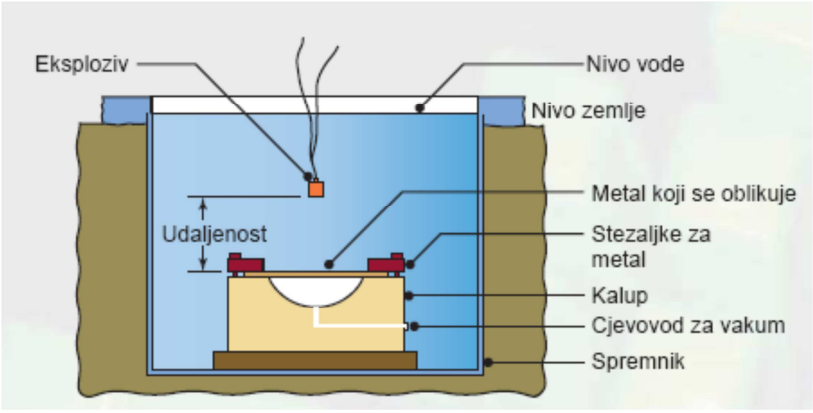
3.2.1 Metode i sustavi oblikovanja metala eksplozivom

Kontaktna metoda oblikovanja - eksploziv se nalazi u izravnu kontaktu s metalom koji se oblikuje. Zbog nepostojanja odmaka između eksploziva i metala koriste se eksplozivi koji imaju manju brzinu detonacije. Pravilnim izborom eksploziva sprječavaju se mogući nastanci štete na obratku. Pri upotrebi kontaktne metode češće su pogreške i odstupanja od zahtijevanih dimenzija obradka te postoji mogućnost oštećenja obradka. Zbog toga se ova metoda znatno primjenjuje u odnosu ne nekontaktnu metodu. Shematski prikaz oblikovanja metala eksplozivom primjenom kontaktne metoda prikazan je na Slici 3-4.



Slika 3-4. Shema oblikovanja metala eksplozivom primjenom kontaktne metode

Nekontaktna metoda oblikovanja - eksplozivni naboj se nalazi na određenoj udaljenosti od obratka. Udaljenost je prilagođena masi i vrsti eksplozivnog naboja, materijalu obratka i mediju kroz koji se udarni val prenosi. Nakon aktivacije eksplozivnoga naboja udarni val napreduje kuglasto, a prati ga ekspanzija mjehurića. Ukoliko mjehurići dođu do površine medija prije no što djeluju na obradak, izgubit će se značajan dio energije. Shematski prikaz oblikovanja metala eksplozivom primjenom nekontaktne metode prikazan je Slikom 3-5.



Slika 3-5. Shema oblikovanja metala eksplozivom primjenom nekontaktne metode

Zatvoreni sustava oblikovanja - naziv sustava dolazi od načina postavljanja eksplozivnog punjenja. Ono je smješteno u zatvorenom prostoru unutar dvodijelnog kalupa. Sustav se primjenjuje za oblikovanje cijevi tankih stijenki i prilikom postojanja strogih zahtijeva za odstupanje dimenzija proizvoda. Prednost sustava je bolja iskorištenost energije eksploziva. Nedostatak sustava je ograničenje veličine proizvoda s obzirom na izvedbu kalupa. Prilikom detonacije eksploziva u zatvorenom sustavu, kalup je izložen znatnim dinamičkim udarima te zbog toga mora biti znatno većih dimenzija u odnosu na otvorenih sustav. U slučaju da kalup zatvorenog sustava nije dovoljno dimenzioniran, može doći do pucanja kalupa te se on ponaša kao granata. Iz navedenih razloga zatvoreni sustav je rijetko u upotrebi. Sustav je s vremenom modificiran i danas postoje otvori na kalupu koji imaju ulogu sigurnosnih ventila i sprečavaju mogućnost fragmentiranja kalupa uslijed djelovanja detonacije eksplozivnog naboja.

Otvoreni sustav oblikovanja - eksploziv nije zatvoren s obje strane kalupom. Postoji samo jedna strana kalupa koja je po svojim dimenzijama i masi manja od jedne polovine kalupa zatvorenog sustava. S obzirom na ekonomičnost sustava kalup predstavlja najskuplji dio proizvodnje. Kod otvorenog sustava manji dio energije eksploziva utroši se za oblikovanje metala, što nije nedostatak, jer je udio cijene eksploziva u cijeni konačnoga proizvoda zanemariv.

Pored otvorenoga i zatvorenoga sustava, u kojima se metal formira prema obliku kalupa, postoji i sustav oblikovanja metala eksplozijom bez upotrebe kalupa. Ovim sustavom se oblikuju sferni (kuglasti) oblici od tanjeg lima (Tong et al. 2008). Sustav se zasniva na kuglastom širenju udarnog vala u vodi. Količina eksplozivnog punjenja se proračunava na način da materijal dobije željeni oblik i ne dođe do oštećenja materijala.

3.2.2 Čimbenici koji utječu na oblikovanje metala eksplozivom

Uspješnost postupka oblikovanja metala eksplozivom ovisi o svojstvima:

- kalupa,
- medija za prijenos energije i
- eksplozivnoga naboja.

3.2.3.1 Kalup

Materijali koji se koriste za izradu kalupa su: visoko čvrsti alatni čelici, plastike, beton itd. Materijal kalupa mora biti otporan na dinamička naprezanja izazvana detonacijom eksploziva, primjeren broju primjeraka koji se izrađuju, pogodan za oblikovanje te imati

prihvatljivu cijenu. Prilikom detonacije eksploziva na kalup djeluju uglavnom tlačne sile, što je povoljno obzirom na višestruko veće vrijednosti vlačnih čvrstoća materijala u odnosu na tlačne čvrstoće. Uz dovoljnu čvrstoću, materijal kalupa ne smije imati izraženu hrapavost koja uzrokuje nepravilnu i hrapavu površinu obratka. Kalupi manje čvrstoće koriste se za male proizvodne serije i za izradu obradaka kod kojih su dozvoljena veća odstupanja dimenzija. Za veće serije obradaka koriste se materijali veće čvrstoće. U Tablici 3-1. je dan pregled materijala koji se koriste za kalupe s obzirom na veličinu tlaka koji djeluje na kalup, broj obradka u seriji i veličinu obratka.

Tablica 3-1. Materijali kalupa i područje primjene (http://www.fsb.unizg.hr/deformiranje)

Materijal kalupa	**Područje primjene**
Kirksite (legura Zn i Al)	Nizak tlak i manji broj obradaka
Stakloplastika i Kirksite	Nizak tlak i manji broj obradaka
Stakloplastika i beton	Nizak tlak i veliki obratci
Epoksi i beton	Nizak tlak i veliki obratci
Nodularni lijev	Visok tlak i veliki broj obradaka
Beton	Srednje visok tlak i veliki obratci

3.2.3.2 Medij za prijenos energije

Energija eksploziva se dijelom pretvara u udarni val koji se kroz medij prenosi na obradak. Iznos tlaka udarnoga vala ovisi o masi i vrsti eksplozivnog naboja, a prigušenje o svojstvima medija. S porastom gustoće medija raste i učinkovitost sustava oblikovanja (Strohecker at all 1964). U prvim pokušajima oblikovanja metala eksplozivom korišten je zrak. U zraku se formira visok vršni tlak udarnog vala koji traje vrlo kratko vrijeme, obično nekoliko mikrosekundi. Zbog kratkog djelovanja, ukupan impuls raspoloživ za oblikovanje obratka je manji nego kod korištenja tekućeg medija. Uporabom vode masa eksploziva potrebnog za oblikovanje smanjuje se do 80%. Oblikovanje energijom eksploziva, uz bolje rezultate može se izvoditi u parafinu i glicerinu. Međutim voda je najzastupljeniji medij zbog niske cijene, raspoloživosti i zadovoljavajućih rezultata oblikovanja.

3.2.3.3 Eksplozivni naboj

Kod dimenzioniranja eksplozivnoga naboja dva su važna parametra; vrsta eksploziva i oblik eksplozivnoga naboja. Odabir vrste eksploziva izvodi se na osnovi empirijskih podataka, a oblik eksploziva prilagođava dimenzijama i obliku obratka. S obzirom na potrebnu energiju za oblikovanje u zatvorenim sustavima koriste se uglavnom eksplozivi manje brzine detonacije dok se u otvorenim sustavima koriste eksplozivi veće brzine

detonacije. Za veće obratke je nepraktično koristiti koncentrirani točkasti eksplozivni naboj, već se u tim slučajevima koristi punjenje oblikovano u skladu sa oblikom obratka. Udaljenost eksplozivnog naboja od obratka je bitan parametar jer o njemu ovisi iznos vršnog udarnog tlaka kojim se djeluje na obradak. Formula za proračun vršnog iznosa tlaka, ukoliko se koristi voda kao medij, glasi:

$$p = k\left[\frac{C^{2/3}}{R}\right]^{a} \tag{3-4}$$

gdje je:

p - iznos tlaka u (Pa),

k - konstanta koja ovisi o eksplozivu, (2160 za TNT),

C-masa eksploziva (kg),

R - udaljenost (m) i

a - konstanta, (obično iznosi 1,15).

Željeni iznos tlaka se postiže usklađivanjem mase eksplozivnog naboja i udaljenosti od obradka. S obzirom da se voda koristi kao medij, koriste se vodootporni eksplozivi ili detonirajući štapin.

3.2.3 Primjena metode oblikovanja metala eksplozivom

Postupak je primjenljiv za oblikovanje većine metala. Ekonomičan je pri oblikovanju malih serija obradaka od metala koji se teško oblikuju kao što su titan, nikal i aluminijske legure koje se koriste svemirskoj industriji (Carton et al. 2005). Tehnologiju je moguće primijeniti za oblikovanje metalnih limova, ploča, konusa i cijevi u proizvode različitih oblika i namjena. Metoda se često koristi pri izradi obradaka većih dimenzija.

Na Slici 3-6. prikazan je obradak proizveden za potrebe avio industrije.

Slika 3-6. Rolls-Royce MT30 ispušni kolektor (http://www.3dmetalforming.com)

3.3 Rezanje metala eksplozivom

Primjena eksploziva za rezanje metala može se podijeliti u nekoliko kategorija s obzirom na razlike u dinamici procesa rezanja. Podjela podrazumijeva tri glavne kategorije:

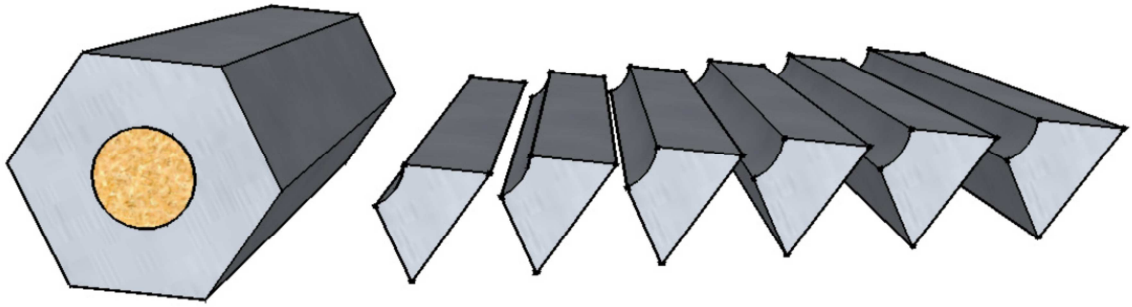
- rezanje uporabom kontaktnih (nalijepljenih) eksplozivnog naboja,
- rezanje udarnim valovima induciranim eksplozivnim punjenjem i
- rezanje uporabom kumulativnih eksplozivnih naboja (Rinehart & Pearson 1963).

Rezanje metala uporabom kontaktnih eksplozivnih naboja proizišlo je iz potreba i zahtjeva u području vojne primjene, a kasnije se postupak koristio i za civilne namjene. Proračun mase i oblika eksplozivnoga naboja baziran je na iskustvenim postavkama. Svi proračuni se odnose na potrebnu masu trinitrotoulena (TNT). Ukoliko se koristi bilo koji drugi eksploziv, masa upotrjebljenoga eksploziva se usklađuje ekvivalentom TNT-a. Proračuni su dostupni u vojnoj literaturi. Eksplozivni naboj se postavlja izravno u doticaj s metalom koji se reže. Pri tome šupljine, odnosno prostori između eksploziva i materijala ispunjeni zrakom, vodom ili drugim materijalom, imaju negativan učinak na postupak rezanja. Eksplozivni naboji mogu biti smješteni s jedne ili obje strane metalnoga obratka. Dimenzije i masa eksplozivnoga naboja ovise o dimenzijama elemenata čelične konstrukcije koji se režu. Na Slici 3-7. prikazana je primjena plastičnoga eksploziva za rezanje metala pomoću nalijepljenih eksplozivnih naboja.

Slika 3-7. Primjena plastičnog eksploziva za rezanje metala

Nakon detonacije eksplozivnoga naboja u kontaktu s metalom oslobodi se velika količina energije koja se prenosi kroz metal u obliku impulsa udarnog vala. Udarni valovi mogu djelovati destruktivno ili pozitivno na metal. Poznavanjem udarnih valova, njihova ponašanja i učinka moguće je koristiti različite sustave metala i eksploziva za rezanje metala s visokim stupnjem točnosti. Primjerice, šesterokutna prizma s provrtom napunjenim eksplozivom nakon detonacije fragmentira u šest jednakih elemenata. Fragmentacija nastaje u smjerovima s najvećom debljinom stjenke.

Fragmentacija šesterokutne prizme s provrtom napunjenim eksplozivom prikazana je Slikom 3-8.



Slika 3-8. Fragmentacija šesterokutne prizme s provrtom napunjenim eksplozivom

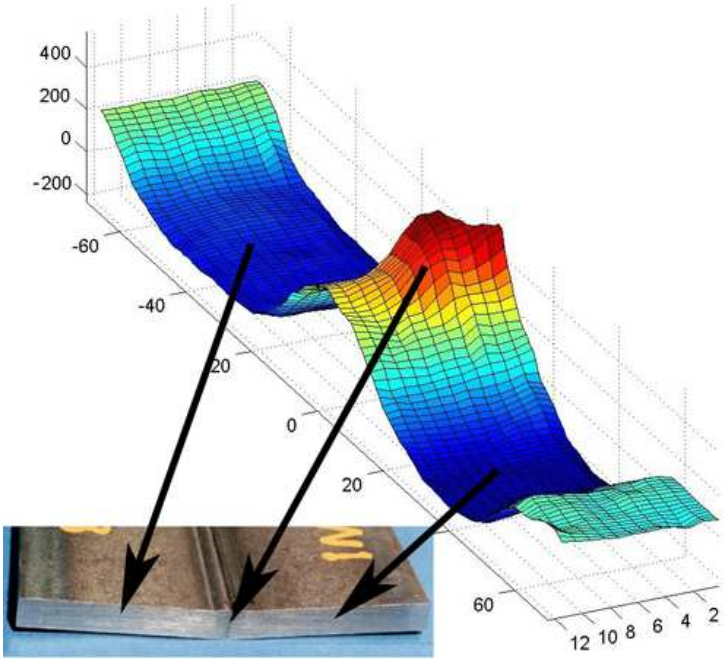
Brojni su primjeri drugih sustava metala i eksploziva gdje se udarni valovi koriste za rezanje, fragmentaciju metalnih štapova i cijevi. Pronalazak tih sustava ostvaren je prilikom istraživanja ponašanja materijala pod djelovanjem energije eksplozivnog naboja.

Kumulativni eksplozivni naboji i način djelovanja su detaljno opisani u poglavlju 4.

3.4 Popuštanje zaostalih naprezanja 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 naprezanja i deformacije. Lokalno zagrijavanje metala izaziva plastičnu deformaciju kada toplinska dilatacija premašuje veličinu elastičnog produljenja. Deformacije prate sve procese zavarivanja. Općenito se može smatrati da će se lokalno zagrijano područje stegnuti pri hlađenju i izazvati deformaciju prema unutra (Duspara at al. 2011).

Na Slici 3-9. prikazan je obradak nastao zavarivanjem na kojemu je vidljiva zaostala deformacija i dijagram raspodjele naprezanja.



Slika 3-9. Zaostala deformacija i dijagram raspodjele zaostalih naprezanja

Zaostala naprezanja i deformacije nije moguće u potpunosti spriječiti i otkloniti, ali se određenim metodama prije zavarivanja, za vrijeme i poslije zavarivanja mogu smanjiti njihova djelovanja tj. razina (Duspara et al. 2011).

Metode za smanjivanje zaostalih naprezanja nakon procesa zavarivanja mogu se podijeliti na:

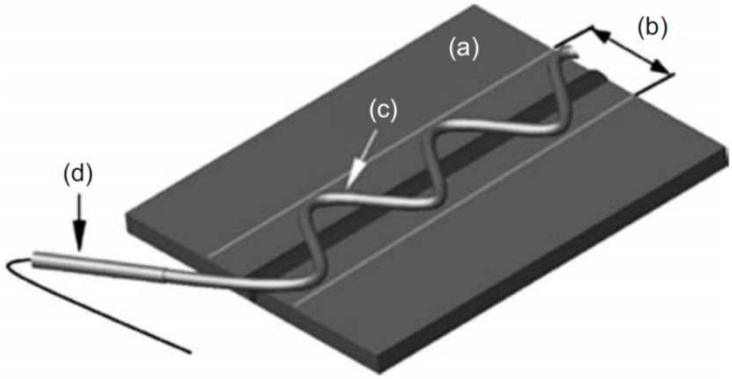
- tretiranje obradka toplinom ili toplinske metode i
- mehaničko tretiranje obradka ili mehaničke metode.

Popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom, svrstava se u mehaničke metode jer do popuštanja naprezanja primarno dolazi uslijed djelovanja udarnog vala eksplozivnog punjenja, iako na obradak djeluje i detonacijom nastala toplina. Prednost metode je jednostavnost i najviše se koristi za obradke velikih dimenzija.

Eksplozivni naboj postavlja se na spoj dvaju metala i okolicu spoja. Područje na koje se eksploziv postavlja naziva se aktivna zona. Širina aktivne zone se dobiva kao zbroj širina zone plastičnih i elastično-plastičnih deformacija. Nakon proračuna aktivne zone izabire se jedan od nekoliko mogućih načina postavljanja eksplozivnog naboja. Koristi se eksploziv u trakama ili detonirajući štapin. Pri uporabi eksploziva u trakama, eksplozivom se prekrije čitava aktivna zona. Kad se koristi detonirajući štapin moguća su dva načina postavljanja štapina s obzirom na spoj:

a) štapin se postavlja u obliku sinusoide i
b) štapin se postavlja paralelno.

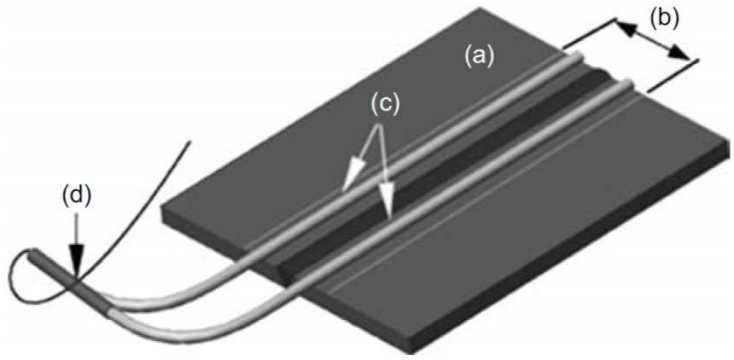
Mogući postavi štapina s obzirom na spoj prikazani su slikama 3-10. i 3-11.



Kazalo:

a) Obradak,
b) Aktivna zona,
c) Detonirajući štapin i
d) Detonator.

Slika 3-10. Postavljenje detonirajućeg štapina u obliku sinusoide (Garcia-Jacomino et al. 2010)



Kazalo:

a) Obradak,
b) Aktivna zona,
c) Detonirajući štapin i
d) Detonator.

Slika 3-11. Paralelno postavljanje detonirajućeg štapina (Garcia-Jacomino et al. 2010)

3.5 Kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom

Metalurgija praha je tehnologija proizvodnje mehaničkih konstrukcijskih i drugih dijelova od metalnih prahova. Pri tome se razlikuju dva postupka:

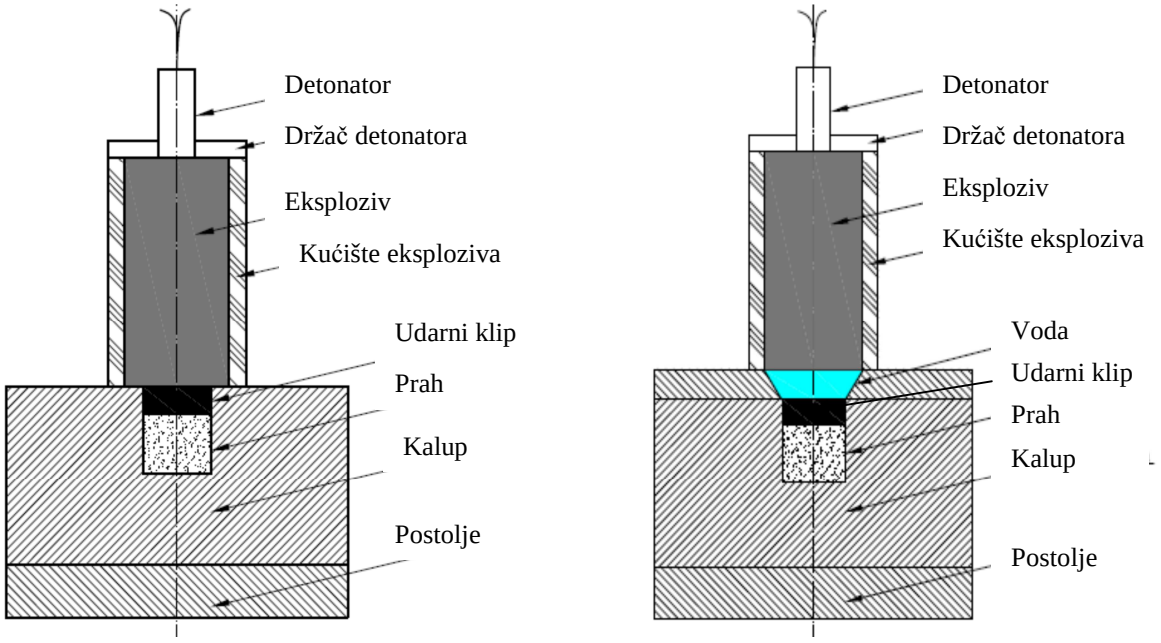
- kompaktiranje - zbijanje prahova i
- sintetiziranje - povezivanje prahova.

Kompaktiranje praha energijom eksploziva je postupak kojim se prahovi zbijaju u traženi element energijom eksploziva. Pri tome je potrebno uskladiti masu eksploziva i masu te karakteristike praha koji se obrađuje. Djelovanjem udarnoga vala detonacije eksploziva, smanjuje se početni volumen praha čime mu se povećava gustoća. Uspješnost procesa kompaktiranja se može izraziti kao odnos između postignute gustoće zbijenog praha ρ_P i maksimalne teoretske gustoće ρ_{MTP} koju metal prema proračunu može imati. Gustoća praha kompaktiranog eksplozivom približna je maksimalnoj teoretskoj gustoći, a svojstva metala se poboljšavaju. Za pojedine materijale to je jedini način poboljšanja fizičko mehaničkih svojstva. Za razliku od klasičnih postupaka metalurgije praha, prednost kompaktiranja eksplozivom nalazi se u brzini i ekonomičnosti procesa. Veća učinkovitost kompaktiranja upotrebom eksploziva u odnosu na klasičnu metalurgiju praha očituje se u većoj postignutoj gustoći i tvrdoći obratka. Mogućnost primjene pojedine metode kompaktiranja određena je vrstom praha. Općenito, kompaktiranje prahova izvodi se sljedećim metodama:

- kompaktiranje primjenom udarnoga klipa i
- kompaktiranje primjenom cilindra (Rinehart & Pearson 1963).

3.5.1 Kompaktiranje primjenom udarnoga klipa

Primjenom udarnoga klipa energija detonacije eksploziva prenosi se na udarni klip koji zbija prah u kućištu. Metoda se koristi za proizvodnju diskova velike gustoće prilikom čega se mogu koristiti jedan ili dva klipa, odnosno zbijanje materijala može biti jednostrano ili dvostrano. Ukoliko se primjenjuju dva klipa potrebna su i dva istovremeno inicirana eksplozivna punjenja. Češće se koristi postav s jednim klipom. Negativna pojava ovog načina zbijanja je mogućnost nastanka pukotina uslijed djelovanja jakog udarnog vala u materijalu. Nastanjenje pukotina može se spriječiti dodavanjem elementa s vodom. Energija detonacije se, u tom slučaju, ne prenosi direktno na klip, nego preko vode. Taj način se naziva i podvodno kompaktiranje. Na Slici 3-12. je prikazan shematski princip kompaktiranja prahova primjenom udarnoga klipa i povodnog kompaktiranja.

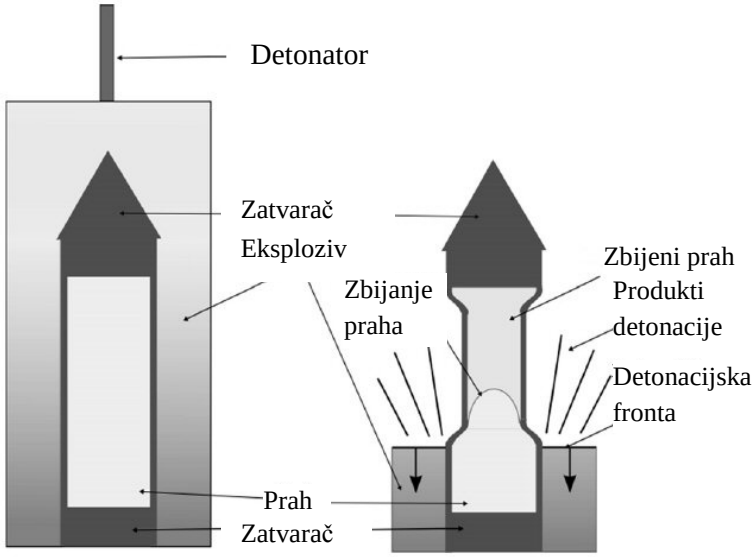


a)kompaktiranje primjenom klipa a)podvodno kompaktiranje primjenom klipa

Slika 3-12. Kompaktiranje prahova metodom udarnoga klipa (Zohoor & Mehdipoor 2009)

3.5.2 Kompaktiranje primjenom cilindra

Sustav se sastoji od cilindra izrađenoga od rastezljiva metala u koji se zatvori metalni prah s obje strane. Cilindar se oblaže slojem eksploziva, koji se inicira s jednog kraja. Time se postiže simetrična putanja udarnog vala, s obzirom na uzdužnu os cilindra. Uslijed detonacijskog udarnog vala cilindar se sabija prema centralnoj osi uzrokujući zbijanje praha. Na Slici 3-13. dan je shematski prikaz zbijanja metalnih prahova upotrebom cilindra.



Slika 3-13. Kompaktiranje prahova primjenom cilindra (Farinha et al. 2009)

3.6 Povećanje tvrdoće metala eksplozivom

Djelovanjem udarnoga vala eksplozivnog naboja dolazi do promjena u mikrostrukturi i mehaničko-fizičkim svojstvima metala koje se očituju i u povećanju tvrdoće metala. U većini postupaka obrade metala eksplozivom dolazi do povećanja tvrdoće metala kao dodatno povoljno svojstvo primarnoga djelovanja eksploziva, u ovom slučaju povećanje tvrdoće metala je primarni učinak metode (Reinhart & Person 1963). Iznos povećanja tvrdoće metala i dubina povećanja tvrdoće ovisi o svojstvu metala i konfiguraciji eksplozivnoga naboja. Povećanje tvrdoće metala djelovanjem eksplozivnog naboja postiže se na dva načina. U prvom slučaju eksplozivni naboj nalazi se u doticaju sa metalom, a u drugom slučaju se koriste eksplozivom ubrzane metalne ploče čija energija udara povećava tvrdoću metala. Ubrzane metalne ploče koriste se kad je potrebno postići veće vrijednosti tlakova.

Povećanje tvrdoće materijala djelovanjem eksploziva najviše se koristi za austenitni manganski čelik ili Hadfieldov čelik. Standardni Hadfieldov čelik sadrži od 1,0 do 1,4% C i od 10-14% Mn, a novije inačice u svom sastavu imaju i Cr (Hutchinson & Ridley 2006). Jedinstven je po kombinaciji visoke žilavosti i istezanja, sa značajnom mogućnosti povećanja tvrdoće, te dobrom otpornosti na trošenje. Čelik se koristi u području građevinarstva, rudarstva, željeznice, naftnoj industriji, za izradu dijelova drobilica, mlinova, bagera, željezničkih pragova itd.

Uobičajeno korištena metoda povećanja tvrdoće metala izvodi se kontaktnom metodom upotrebom tankih traka eksploziva. Koristi se plastični eksploziv velike brzine detonacije i visoke gustoće. Tlakovi koji djeluju na metal iznose od 15 GPa do 20 GPa (Petrushkov 2009). Za veće iznose tlakova nužno je koristiti metodu s ubrzanim pločama. Učinak eksploziva na metal se očituje u povećanju tvrdoće materijala. Učinak ovisi o iznosu tlaka kojim eksplozivni naboj djeluje i vremenu djelovanja, odnosno o impulsu tlaka. Veličina promjene tvrdoće se značajno razlikuju sa udaljenosti od eksplozivnog naboja odnosno po dubini metala. Povećanje tvrdoće u odnosu na tlak kojim se na metal djeluje može se izraziti jednadžbom (Petrushkov 2009):

$$\Delta HV = 0{,}48 HV_0 (pG^{-1})^{0{,}5} \tag{3-5}$$

Gdje je :

ΔHV - porast tvrdoće po Vickersu,

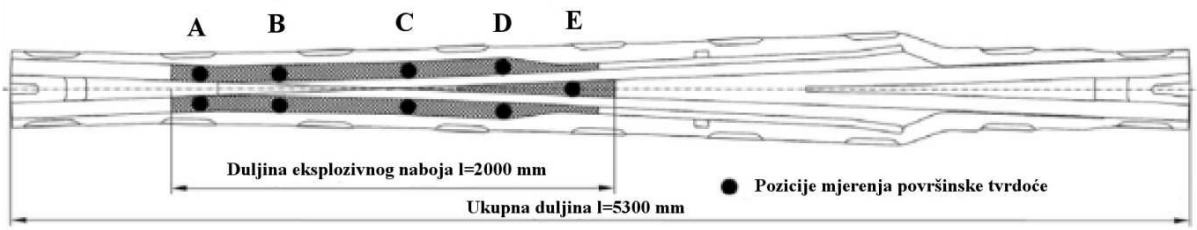
HV_0 - tvrdoća po Vickersu izmjerena prije otpucavanja eksplozivnog naboja,

p - tlak kojim se djeluje na metal (Pa) i

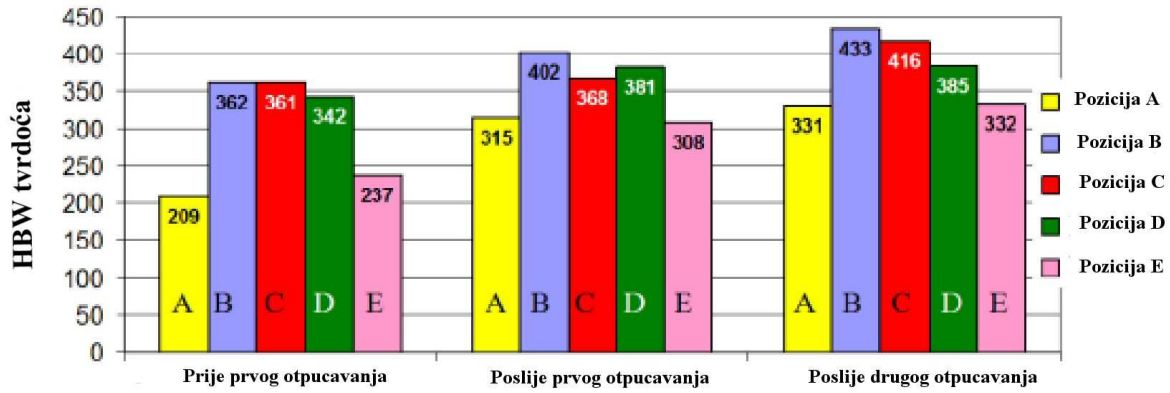
G - modul smicanja (Pa).

Povećanje tvrdoće metala prikazano je na primjeru prelaznog dijela skretnice željezničke pruge. Za postupak je korišten plastični eksploziv Semtex 10SE, koji je u obliku trake postavljen na obradak. Slikom 3-14. prikazano je postavljenje eksploziva. Postupak je ponovljen dva puta, a prije i nakon svakog otpucavanja mjerena je tvrdoća materijala Brinelovim testom tvrdoće na pet pozicija. Pozicije mjerenja tvrdoće prikazane su Slikom 3-15., a rezultati mjerenja Slikom 3-16.

Slika 3-14. Postavljanje eksploziva na obradak (Havliček & Nesvadba 2011)



Slika 3-15. Pozicije mjerenja tvrdoće materijala (Havliček & Nesvadba 2011)



Slika 3-16. Rezultati mjerenja tvrdoće materijala (Havliček & Nesvadba 2011)

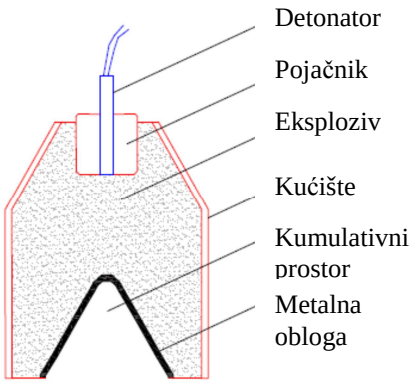
4 Kumulativni naboji

Eksplozivnim punjenjem (ili nabojem) uobičajeno se smatra neka količina eksplozivne tvari čijom se detonacijom obavlja rad: prilikom miniranja u rudarstvu i naftnoj industriji, oblikovanju i zavarivanju metalnih elemenata, rezanja i rušenja raznih objekata itd. S obzirom na oblik, eksplozivne naboje moguće je podijeliti u tri skupine:

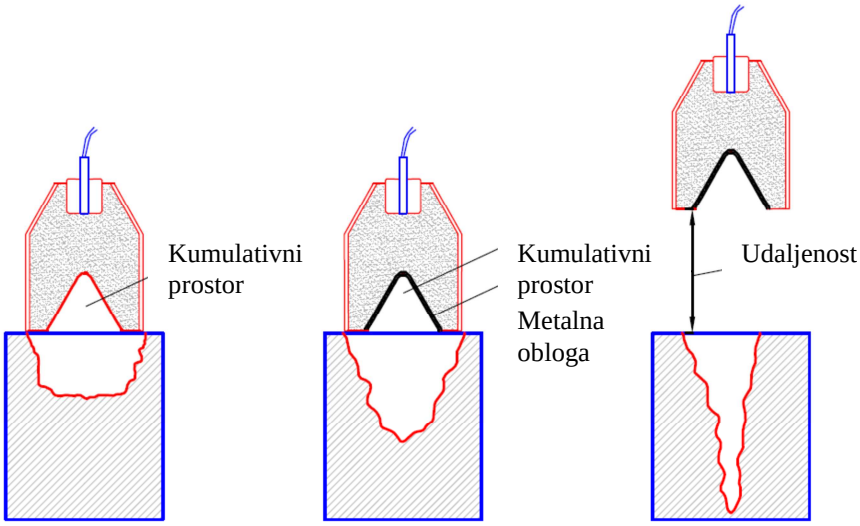
- koncentrirani eksplozivni naboji,
- linijski eksplozivni naboji i
- kumulativni eksplozivni naboji (Sućeska 2001).

Eksplozivni naboji kod kojih je omjer između najduže i najkraće dimenzije manji od 3:1 nazivaju se koncentrirani eksplozivi naboji. Ukoliko je omjer između najduže i najkraće dimenzije veći od 3:1, a omjer između kraćih dimenzija manji od 3:1, tada se naboji nazivaju linijski ili izduženi eksplozivni naboji.

Kumulativni eksplozivni naboji razlikuju se od ostalih naboja u mogućnosti usmjeravanja energije oslobođene detonacijom. Energiju detonacije moguće je usmjeriti izradom kumulativnog prostora pravilnih dimenzija i oblika u eksplozivnom punjenju. Ukoliko se kumulativni prostor obloži tankim slojem materijala, u pravilu metala, dodatno se pojačava djelovanje kumulativnog naboja na ciljani objekt. Metalna obloga je izvor teških molekula i povećava kinetičku energiju mlaza kumulativnoga naboja koji penetrira u ciljani materijal. Dodatno povećanje djelovanja kumulativnih naboja postiže se odmicanjem kumulativnog naboja na određenu udaljenost od ciljanog materijala. Poprečni presjek kumulativnog naboja prikazan je na Slici 4-1, a princip djelovanja kumulativnih eksplozivnih naboja prikazan je na Slici 4-2.



Slika 4-1. Poprečni presjek eksplozivnog kumulativnog naboja



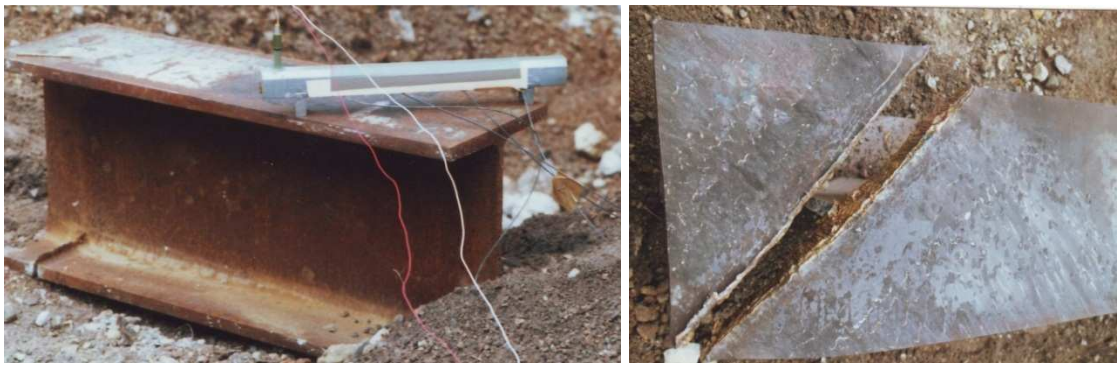
Slika 4-2. Princip djelovanja eksplozivnih kumulativnih naboja

Eksplozivni kumulativni naboji mogu se podijeliti s obzirom na oblik, način usmjeravanja produkata detonacije i funkciju na:

- konusne kumulativne eksplozivne naboje ili perforatore i
- linijske (linearne) kumulativne naboje ili rezače.

Konusni naboji ili perforatori namijenjeni su za perforiranje ciljanog materijala. Obloga kumulativnog prostora je u obliku konusa, a energija detonacije je usmjerena u točku. Linijski kumulativni rezači namijenjeni su za rezanje, obloga je izdužena u pravcu dulje osi, a energija detonacije je usmjerena u pravac. Sposobnost djelovanja konusnog kumulativnog naboja definirana je dubinom perforacije u materijalu, a sposobnost djelovanja linijskog kumulativnog naboja s maksimalnom debljinom materijala koji rezač može presjeći. Slikama 4-3. i 4-4. prikazani su konusni i linijski kumulativni naboji te njihov učinak u ciljanom materijalu.

Slika 4-3. Konusni kumulativni naboj i perforacija nakon detonacije (www.appliedexplosives.com/images/stories/smallbook.pdf)



Slika 4-4. Linijski (linearni) kumulativni naboj i rez nakon detonacije (Čačić 1998)

Konusni kumulativni perforatori uglavnom se koriste u vojnom području i naftnoj industriji. U vojnom području konusni perforatori su sastavni element izvedbe različitih bojevih glava namijenjenih za perforiranje različitih metalnih površina poput oplate tenkova, brodova itd. U naftnoj industriji se koristi veliki broj perforatora različitih dimenzija, oblika i konstrukcije. Perforatori se koriste za perforiranje naftnih bušotina i stijene u okolini naftne bušotine kako bi se povećao dotok nafte u bušotinu. Primjena linijskih kumulativnih naboja detaljno je opisana u poglavlju 4.4.

4.1 Povijest kumulativnih naboja

Kumulativni naboji se u Velikoj Britaniji i SAD nazivaju *„shaped charge“*, u Njemačkoj *„hohladung“* i u bivšem SSSR-u *„kumulativni naboji“*. Kumulativni efekt se u SAD-u i Velikoj Britaniji naziva *Monroev efekt*, a u Njemačkoj *von Foresterov* efekt u čast njihovim pronalazačima. Različita imena za kumulativne naboje u pojedinim zemljama kao i pripisivanje zasluga za pronalazak kumulativnog efekta različitim osobama ukazuju na policentrični razvoj linijskih kumulativnih naboja.

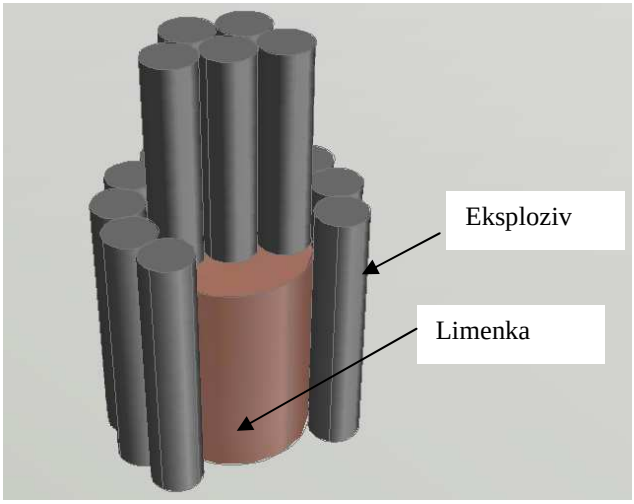
Većina publikacija vezanih za razdoblje nastanka kumulativnih naboja su nedostupni, te postoji nekoliko autora (Kennedy1983, Walters 2008, Walters & Zukas 1989), koji su, iz njima dostupnih podatka, napisali svoje viđenje povijesti razvoja kumulativnih naboja.

Povijest kumulativnih naboja se može podijeliti u nekoliko kronoloških cjelina. Prva cjelina se odnosi na razdoblje otkrića efekta kumulativnoga prostora. Walters (Walters 2008) navodi činjenicu da se petarde zbog svoje konstrukcije mogu smatrati pretečom kumulativnih naboja. Pretpostavlja se da je njemački rudarski inženjer Franz von Bader 1792. godine sugerirao uporabu kumulativnoga prostora kako bi se postiglo učinkovitije djelovanje baruta na stijenu. Njegova otkrića su se prvo počela primjenjivati u Norveškoj te se von Bader u literaturi često navodi i kao Norvežanin. Budući da baruti tog vremena nisu mogli detonirati, o otkriću kumulativnih naboja može se govoriti tek nakon što je Alfred Nobel izumio detonator 1876. godine. Smatra se da je prvi eksperiment s kumulativnim efektom, nastalim detonacijom eksploziva, izveo Max von Foerster 1883. godine. Njegov rad se odnosi na graviranje uporabom eksploziva, pa ga zato neki autori ne smatraju pronalazačem kumulativnoga efekta. Međutim Kennedy i Freiwald, dajući detaljniju analizu njegovih dostignuća, zaključuju da je on pronalazač kumulativnoga efekta u današnjem značenju (Walters 2008).

Gustav Bloem je 1886. u Njemačkoj patentirao metalno kućište detonatora s kumulativnim prostorom na kraju kućišta koje je služilo za usmjeravanje energije detonacije prema centralnoj osi (Kennedy 1983). Ovu izvedbu detonatora pojedini autori smatraju prvim kumulativnim nabojem sa metalnom oblogom kumulativnoga prostora.

Profesor Charles E. Munroe najčešće se povezuje s pronalaskom efekta kumulativnoga prostora. Pretpostavlja se da Munroe nije bio upoznat s von Foersterovom publikacijom koja je objavljena pet godina ranije (Kennedy, 1983). On je efekt kumulativnoga prostora otkrio slučajno, prilikom detonacije eksploziva koji se nalazio u kontaktu s čeličnom pločom. Inicijali koji su se bili utisnuti na eksplozivu (U. S. N.-United States Navy), nakon detonacije eksploziva ostali su utisnuti u čeličnu ploču. Premda Munroe nije bio prvi koji je otkrio efekt

kumulativnih naboja, prvi je uspješno demonstrirao utjecaj kumulativnoga prostora kod probijanja masivne čelične mete. On je izradio prvi kumulativni naboj sa metalnom oblogom kumulativnoga prostora, koje se sastojalo od tanke limenke s patronama eksploziva oko limenke. Limenka je imala otvoren donji kraj. Konstrukcija kumulativnoga naboja prikazana je na Slici 4-5. Kumulativni naboj je primijenjen za probijanje sefa načinjenoga od čeličnih ploča. Munroeva istraživanja objavljena su u časopisu Popular Science Monthly, te je njihova objava pridonijela povezivanju Munroeva imena sa kumulativnim efektom (Kennedy 1983).



Slika 4-5. Munroeva konstrukcija kumulativnog naboja

Iako je Monroe koristio metalnu oblogu, on nije bio svjestan utjecaja metalne obloge na djelovanje kumulativnih naboja.

Istraživanja su dalje nastavljena u pojedinim zemljama, prvenstveno u Njemačkoj, Velikoj Britaniji, Rusiji i Italiji. Sukharevski je bio prvi Rus koji je istraživao kumulativni efekt u periodu između 1925. i 1926. godine. Lodatti je prvi talijanski znanstvenik koji je 1932. godine objavio rad o kumulativnom efektu. Prvo istraživanje kumulativnoga efekta u Francuskoj objavio je Lepidi (Walters 2008).

Ne može se sa sigurnosti reći tko je prvi i kada otkrio i opisao utjecaj obloge kumulativnoga prostora na učinak kumulativnoga naboja. Razlog tomu je veliki broj usporednih ispitivanja pojedinih znanstvenika u različitim zemljama, kao i činjenica da su se ispitivanja provodila uglavnom za vojne namjene te su rezultati ispitivanja bili tajni. Smatra se da se otkriće dogodilo između 1935. i 1938. godine. Do otkrića je došlo slučajno, a prve spoznaje o stvaranju kumulativnoga mlaza bilo je moguće evidentirati tek nakon što su razvijene metode brzoga snimanja, poput radiografije i Kerr Cell metode. U razdoblju od 1935. do 1945. godine dolazi do brzoga razvoja kumulativnih naboja, poglavito tijekom

Drugoga svjetskog rata, kada se kumulativni naboji koriste za konstrukciju različitih bojevih glava.

Smatra se da su pronalazači modernog kumulativnoga efekta Franz Rudolf Thomanek za Njemačku i Henry Hans Mohaupt za Veliku Britaniju i SAD. Thomanek i Mohaupt su, neovisno jedan o drugom, razvili moderan kumulativni sustav i izradili prvi učinkoviti perforator na bazi šupljega eksplozivnog punjenja sa lijevkom (Kennedy 1983).

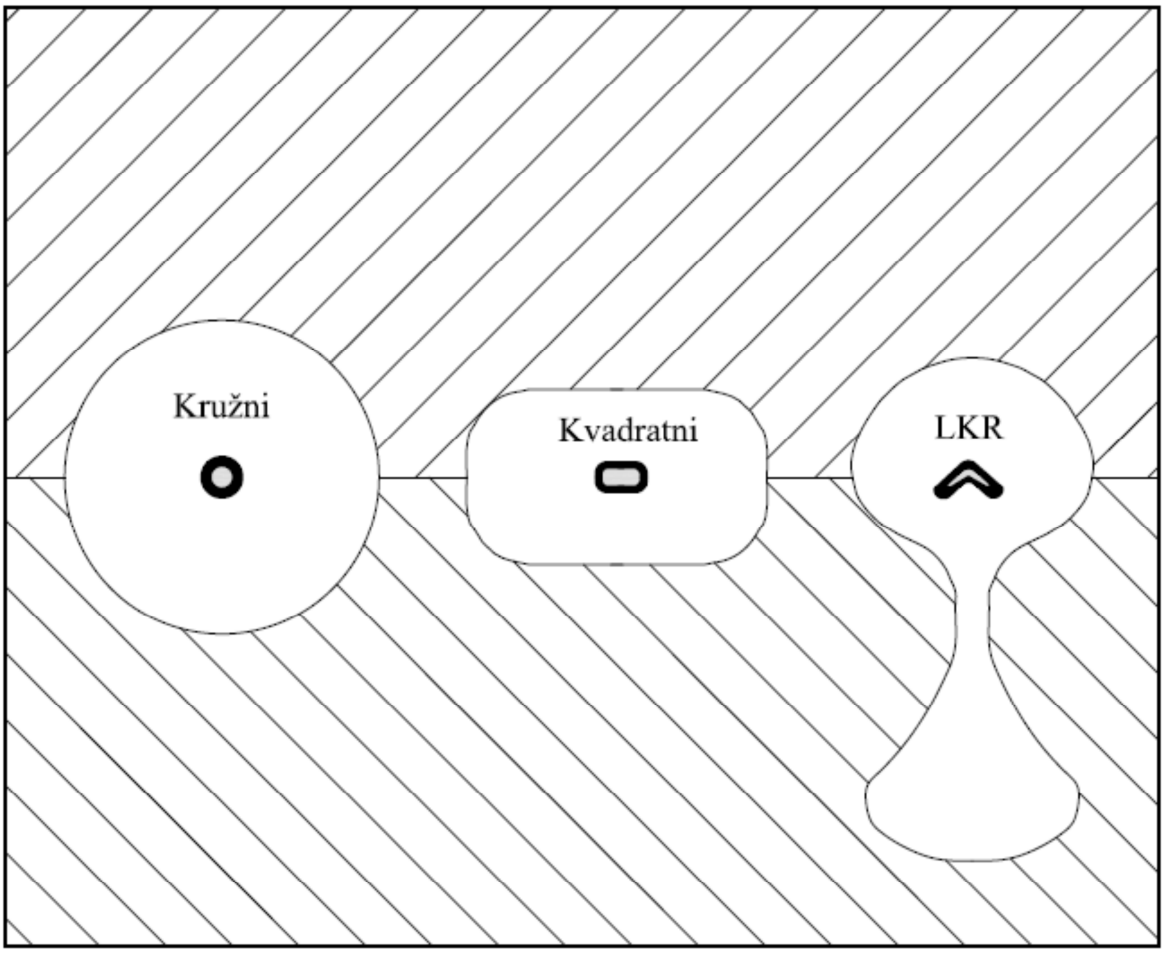
Prvi model koji opisuje princip djelovanja linijskih kumulativnih rezača objavljen je 1948 godine. Model se naziva Birkhoffov ili stacionarni model jer pretpostavlja ujednačenu brzinu urušavanja obloge. Model je ubrzo zamijenjen PER-teorijom (Pugh, Eichelberger i Rostoker) koja pretpostavlja nestacionarno gibanje materijala obloge. Na osnovi PER teorije razvijeni su brojni jednodimenzionalni kodovi koji omogućuju brzu i jednostavnu analizu parametara kumulativnih naboja. Nakon održavanja prvog međunarodnog simpozija iz područja balistike (1974. godine), učinjeni su veliki napori u cilju razvijanja matematičkih modela koji opisuje pojedini stadij djelovanja kumulativnoga naboja, uključujući stvaranje kumulativnoga mlaza, geometriju mlaza, fragmentaciju mlaza, itd. Primjenom metode konačnih elemenata te razvojem snažnijih računala razvijeni su i višedimenzionalni programi koji opisuju proces stvaranja i djelovanja kumulativnog mlaza. Zahvaljujući numeričkim metodama, koje se neprestano razvijaju, moguće je simulirati i fizikalno opisati sve procese vezane uz kumulativne naboje, od trenutka iniciranja, preko urušavanja metalne obloge, do procesa formiranja kumulativnoga mlaza i djelovanja mlaza na metu.

Iako se simulacijom mogu dobiti informacije o načinu formiranja i djelovanja kumulativnoga mlaza kumulativnih naboja, nužno je simulaciju i potvrditi eksperimentalnim ispitivanjima. Većina istraživača do svojih zaključaka dolazi samo na osnovi eksperimenta, bez upotrebe simulacija. Bitan doprinos spoznajama o kumulativnim nabojima u prošlom i početku ovog stoljeća predstavljaju radovi koje je objavio Manfred Held. Svi radovi se temelje na eksperimentu kao osnovnoj i jedinoj metodi istraživanja. Autor je objavio brojne radove vezane uz utjecajne parametre i način djelovanja kumulativnih naboja.

Sadašnja istraživanja usmjerena su na više područja, s naglaskom na povećanje učinkovitosti kumulativnih naboja s ciljem postizanja najveće dubine reza uz najmanju masu i minimalan štetni utjecaj na okolinu. Razmatra se uporaba novih materijala i geometrijskih značajki kumulativnoga naboja, u svrhu postizanja veće učinkovitosti. Usko vezano za učinkovitost kumulativnih naboja su istraživanja vezana uz pronalazak novih eksploziva s većim brzinama detonacije, čime se povećava ulazna kinetička energija.

4.2 Linijski kumulativni naboji

Kumulativni naboji kod kojih je jedna dimenzija, obično duljina, značajno veća od drugih nazivaju se linearni (linijski) kumulativni rezači (*engl. linear shaped charge-LSC*). Linijski kumulativni rezači razvili su se iz konusnih kumulativnih perforatora. Upotreba linijskih kumulativnih rezača započinje nakon 1950. godine. Razlika između linijskih kumulativnih rezača i klasičnih linijskih eksplozivnih naboja je u usmjeravanju energije detonacije eksplozivnog punjenja. Razlike u djelovanju pojedinih linijskih eksplozivnih naboja i linijskih kumulativnih rezača prikazana je eksperimentom u kojemu su linijski eksplozivni naboji kružnog i kvadratnog poprečnog presjeka te linijski kumulativni rezač jednake mase eksplozivnog punjenja postavljeni između dva bloka polistirena (styrofoam). Nakon otpucavanja su izmjerene šupljine nastale kao posljedica detonacije eksplozivnih naboja. Oblici poprečnih presjeka linijskih eksplozivnih naboja i linijskog kumulativnog rezača koji su korišteni za eksperiment te poprečni presjeci šupljina nastalih nakon detonacije prikazani su na Slici 4-6.

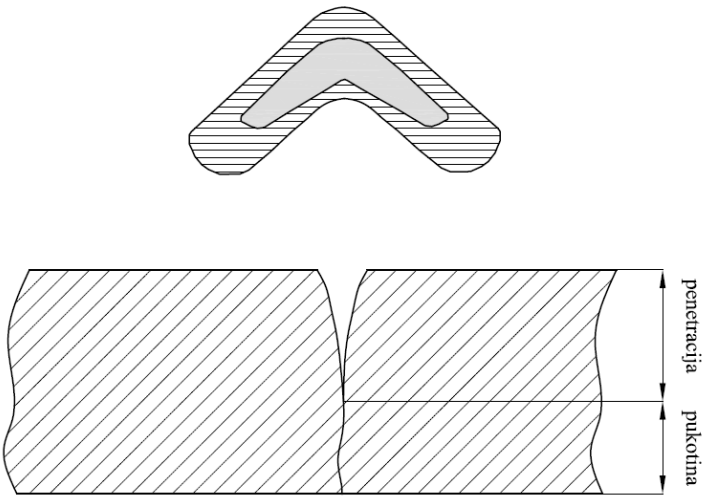


Slika 4-6. Poprečni presjeci šupljina nastalih nakon detonacije (Barbour 1981)

Iz rezultata ispitivanja je vidljivo ujednačeno prostorno djelovanje linijskih eksplozivnih naboja. Djelovanje linijskih kumulativnih rezača je izraženo u jednom smjeru što je posljedica usmjeravanja energije detonacije.

Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja linijskih kumulativnih rezača dolazi do usmjeravanja djelovanja energije detonacije prema kumulativnom prostoru, pri čemu udarni val nailazi na oblogu te je deformira i ubrzava. Pravilnim izborom geometrijskih značajki, materijala obloge i odnosa između mase obloge i mase eksplozivnog punjenja povećava se učinkovitost linijskih kumulativnih rezača.

Učinkovitost linijskih kumulativnih rezača prikazuje se kao maksimalna debljina materijala, mete koju linijski kumulativni rezač može prerezati, a proporcionalna je kinetičkoj energiji ubrzanog metala obloge. Rezanje ili djelovanje linijskog kumulativnog rezača sastoji se od dva mehanizma. Primarni mehanizam je penetracija ubrzane obloge linijskog kumulativnog rezača. Nailaskom ubrzane obloge na metu, tlak djelovanja obloge na materijal je znatno veći od tlačne čvrstoće materijala. Materijal mete se bočno razmiče, a mlaz penetrira i oblikuje rez u meti. Materijal mete se pri tome plastično deformira i pruža otpor prodiranju uslijed čega se smanjuju brzina i kinetička energija mlaza. Kada se kinetička energija mlaza u procesu penetracije smanji na određeni iznos (koji ovisi o materijalu mete), dolazi do zaustavljanja penetracije. Sekundarni mehanizam nastaje djelovanjem tlačnih udarnih valova i očituje se u nastanku pukotine u materijalu mete nakon djelovanja penetracije. Zbroj djelovanja ovih mehanizama daje ukupnu debljinu materijala koju linijski kumulativni rezač može prerezati. Ukoliko je debljina materijala dovoljno velika, prigušuje se djelovanje udarnih valova, a veličina pukotine nastale na taj način je zanemariva. Princip djelovanja linijskih kumulativnih rezača prikazan je na Slici 4-7.



Slika 4-7. Princip djelovanja linijskog kumulativnoga rezača (Barbour 1981)

Za razliku od ostalih vrsta rezanja, u ovom slučaju, masa materijala mete prije i poslije rezanja ostaje nepromijenjena. Karakteristike reza kumulativnih rezača:

- precizne geometrijske značajke reza,
- lokalno rezanje, materijal u okolini reza nije poremećen i
- izostanak odbacivanja dijelova konstrukcije zbog rezanja.

Prednosti linijskih kumulativnih rezača za rezanje metala u odnosu na konvencionalni način rezanja metala eksplozivom su:

- definirana dubina reza,
- precizno rezanje,
- znatno manja masa potrebnog eksploziva i
- mogu se minirati kompliciranu uravnoteženi sustavi poput čeličnih dizalica, kranova itd. (Hopfe 2001).

Linijski kumulativni rezači se mogu podijeliti s obzirom na postojanost oblika na:

- krute linijske rezače i
- savitljive linijske rezače.

Kruti linijski rezači imaju postojan oblik koji nije podložan promjeni i ne može se prilagoditi obliku obradka. U krute linijske rezače se ubrajaju i kružni linijski rezači ukoliko imaju postojan oblik. Savitljivi rezači imaju sposobnost oblikovanja prema obliku obradka i najviše se primjenjuju prilikom rezanja cijevi različitih dimenzija. Prednost savitljivih linijskih rezača je u tome što se pomoću njih mogu rezati metalne konstrukcije različitih oblika, a nedostatak im je nešto manja dubina reza u odnosu na krute linijske rezače. Na Slici 4-8. je prikazan savitljivi linijski kumulativni rezač postavljen na cijev i prerezana cijev nakon otpucavanja.

Slika 4-8. Savitljivi linijski kumulativni rezač postavljen na cijev i prerezana cijev

4.3 Primjena linijskih kumulativnih rezača

Linijski kumulativni rezači koriste se u različitim granama industrije te se primjenjuju unutar pojedinih tehnologija za rezanje metala i drugih materijala. Primjena linijskih kumulativni rezača je prisutna u sljedećim područjima:

- rudarstva, naftnog rudarstva i građevinarstva,
- svemirske industrije,
- vojne namjene,
- razminiranja i
- vatrogastva.

Republika Hrvatska nema proizvođača linijskih kumulativnih rezača. Prema procjeni iz 2005. godine godišnja potrošnja linijskih kumulativni rezača iznosi oko tisuću i petsto komada. Petsto komada linijskih kumulativnih rezača je potrebno za rušenje čeličnih i armiranobetonskih konstrukcija, dok je ostalih tisuću komada namijenjeno za potrebe MUP-a, MORH-a i HCR-a (Sućeska at al. 2005).

4.3.1 Primjena linijskih kumulativnih rezača u rudarstvu i građevinarstvu

Najviše linijskih kumulativnih rezača u području rudarstva i građevine se utroši za rušenje objekata i čeličnih konstrukcija miniranjem. Linijski kumulativni rezači se koriste za uklanjanje različitih objekata metalne ili armirano-betonske konstrukcije (mostova, dizalica, građevinskih objekata itd.), uklanjanje metalnih konstrukcija u većim industrijskim pogonima, usitnjavanje većih metalnih profila na brz i jeftin način, rušenje većih građevinskih strojeva čija demontaža nije isplativa na klasičan način i dr. Iako je čelične konstrukcije moguće uklanjati eksplozivom na klasičan način, pomoću nalijepljenih eksplozivnih punjenja, uporaba linijski kumulativnih rezača omogućuje bolju iskorištenost eksplozivnoga punjenja i veći učinak uz manju potrošnju eksploziva. Značajno se smanjuju štetni utjecaji miniranja u obliku buke, zračnoga udarnog vala i seizmičkih utjecaja miniranja, što je jako bitno ukoliko se rušenje objekata miniranjem izvodi u urbanim područjima gdje postoji mogućnost oštećenja okolnih objekata.

Rušenje objekata miniranjem upotrebom LKR-a izvodi se presijecanjem čelične nosive konstrukcije. Veličinu i broj linijskih kumulativnih rezača je potrebno prilagoditi obliku i dimenzijama čelične konstrukcije. Postavljeni kumulativni rezači se po potrebi oblažu slojem zaštitnog materijala radi sprečavanja moguće štete u okolini konstrukcije. Na Slici 4-9. prikazani su linijski kumulativni rezači postavljeni za rušenje mosta.

Slika 4-9. Postavljanje linijskih kumulativnih rezača prilikom rušenja mosta

Primjena linijskih kumulativni rezača pri rušenju objekata miniranjem u svijetu opće je prihvaćena i raširena tehnologija. U Republici Hrvatskoj se nekoliko objekata rušilo upotrebom linijskih kumulativnih rezača. U sklopu tehnološkoga projekta uporabe linijskih kumulativni rezača u periodu 2004. i 2005. godine srušeni su sljedeći objekti:

- dizalica za transport koksa i kamena s pećima za proizvodnju kreča, Beli Manastir,
- «Dopol» sustav dimnjaka u bivšoj tvornici glinice na Bravaru, Obrovac i
- plovna dizalica “ Drenova “ na Malom Lošinju (Sućeska et al. 2005).

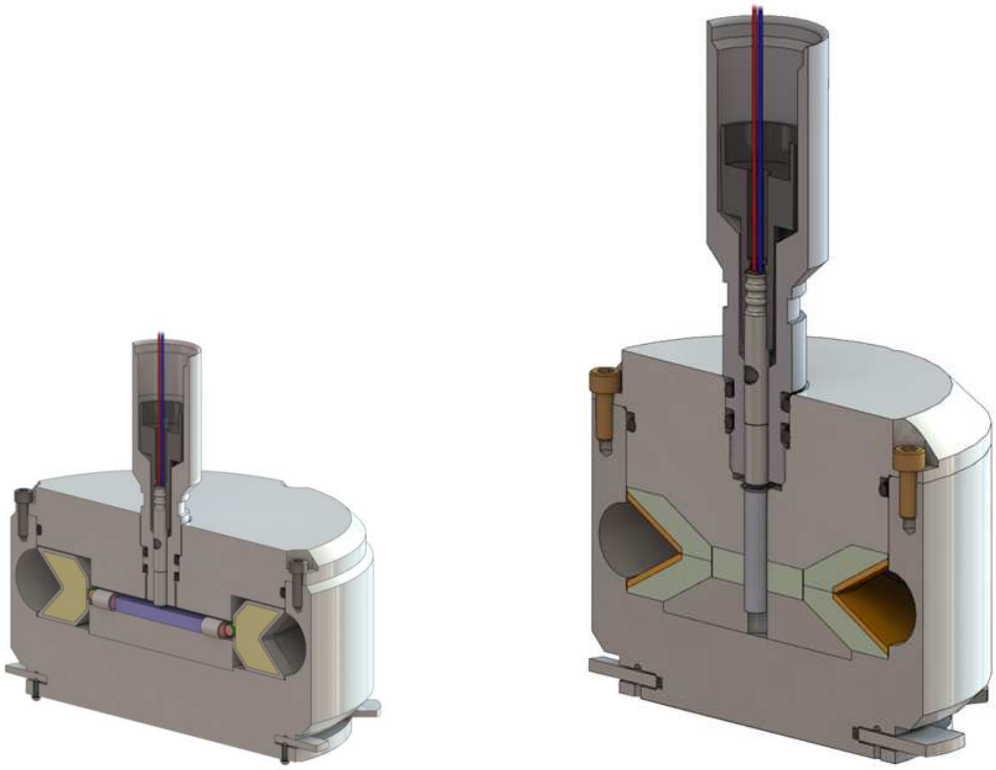
Na Slici 4-10 je prikazan objekt Dopol prije rušenje, nakon rušenja i presječeni dio konstrukcije.

Slika 4-10. Objekt prije rušenja, nakon rušenja i presječeni dio konstrukcije (Sućeska et al. 2005).

4.3.2 Primjena linijskih kumulativnih rezača u naftnoj industriji

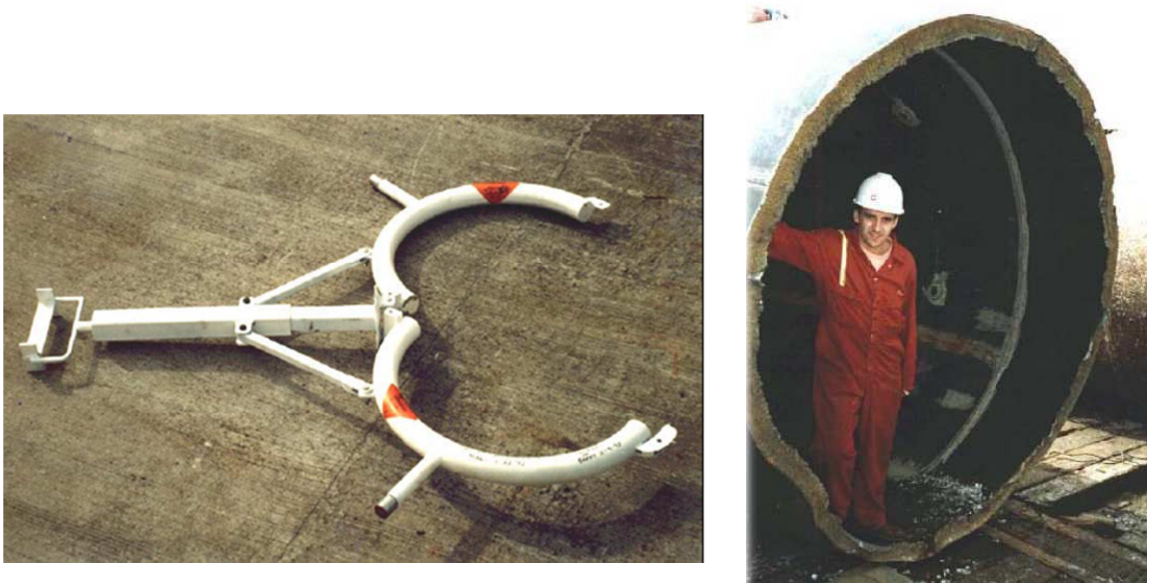
Naftno rudarstvo je jedna od prvih industrija u kojoj se djelovanje kumulativnog efekta uspješno primjenjuje. Velike naftne kompanije su razvile vlastite proizvodne pogone i istraživačke centre za proizvodnju i istraživanje kumulativnih eksplozivnih naboja. Naftna industrija je najveći potrošač konusnih kumulativnih perforatora, uz nešto manju potrošnju linijskih kumulativnih rezača. Glavna primjena linijskih kumulativnih rezača je rezanje bušotinskih cijevi, cijevi cjevovoda i dijelova čeličnih konstrukcija naftne platforme.

Za rezanje bušotinskih cijevi upotreba linijskih kumulativnih rezača je najjednostavnije, najefikasnije, a vrlo često i jedino moguće tehničko rješenje. Kumulativni rezači su oblikovani na način da se sigurno mogu spustiti na željenu dubinu po unutarnjem obodu cijevi. Ovakvi rezači su smješteni u masivno čelično kućište koje osigurava funkcionalno djelovanja rezača u uvjetima visokih tlakova i temperatura koji su prisutni u bušotinskim cijevima pri većim dubinama bušenja. Rezači su sposobni pravilno djelovati pri tlakovima većim od 80 kPa i temperaturama većim od 200 C^{o}. Dvije različite izvedbe rezača bušotinski cijevi prikazane su na Slici 4-11.



Slika 4-11. Linijski kumulativni rezači za rezanje bušotinske cijevi.

Za rezanje cijevi koje se nalaze na površini ili pod vodom koriste se kružni linijski rezači različitih dimenzija koji se postavljaju uz vanjski plašt cijevi. Posebna prednost ovih rezača je brzina rezanja i neograničen promjer cijevi koju je moguće prerezati. Ukoliko se radi o podvodnom postavljaju rezača, eksplozivni naboj se nalazi u hermetički zatvorenom kućištu prilagođenom za jednostavno postavljanje. Na Slici 4-12. prikazan je kružni vanjski rezač namijenjen za podvodnu upotrebu i cijev presječena ovim rezačem.



Slika 4-12. Kružni vanjski rezač i presječena cijev

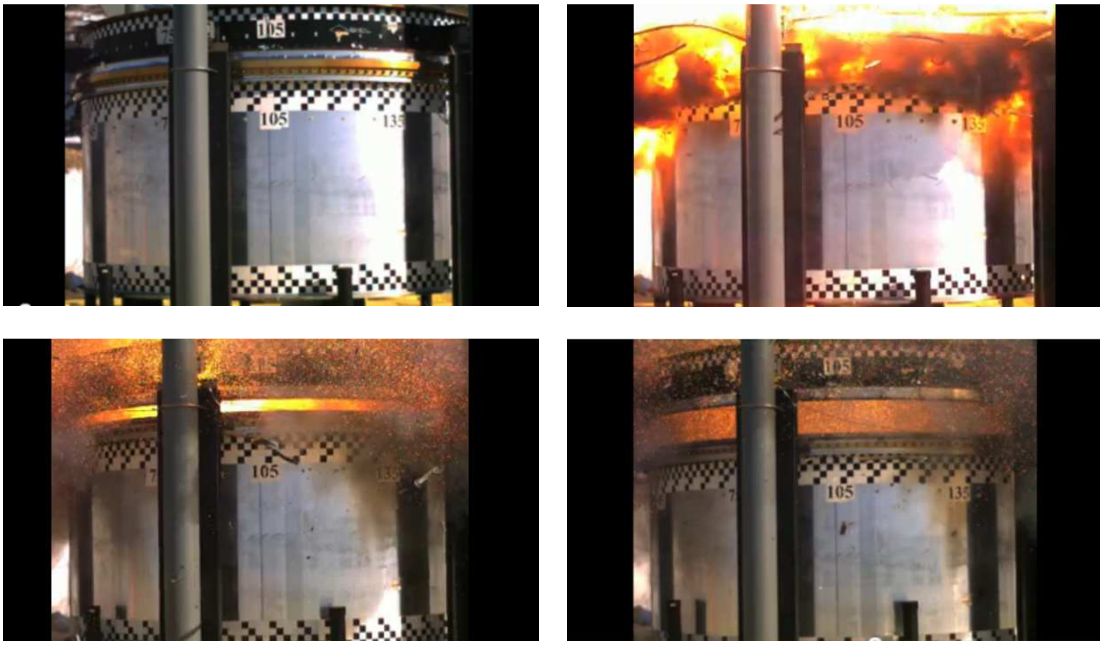
Kružni kumulativni rezači se koriste i za rezanje nosivih čeličnih stupova naftne platforme. Na Slici 4-13. je prikazan presječeni nosivi stup platforme.

Slika 4-13. Nosivi stup platforme presječen linijskim kumulativnim rezačem

4.3.3 Primjena linijskih kumulativnih rezača u svemirskoj industriji

Svemirska industrija je zaslužna za razvijanje linijskih kumulativnih rezača jer je uložila značajna sredstva u razvoj linijskih kumulativni rezača. Linijski kumulativni rezači u svemirskoj industriji koriste se za razdvajanje pojedinih dijelova letjelice prilikom lansiranja. Odvajaju se iskorišteni raketni spremnici goriva, potisnici (*engl. solid rocket booster SRBI*) i pojedini stupnjevi raketnog motora, kod raketa koje imaju višestupanjske motore. Linijski kumulativni rezači se također koriste za izrezivanje i odbacivanje dijelova oplate. Svemirske letjelice su opremljene sa većim brojem linijskih kumulativnih rezača tako, na primjer, letjelica Ariane 5 u svom sastavu ima 43 linijska rezača, a letjelica Vega 8 linijskih rezača.

NASA (National Aeronautics and Space Administration) kontinuirano ulaže sredstva u ispitivanja i razvoj linijskih kumulativnih rezača. Istraživanja su usmjerena postizanju pouzdane efikasnosti linijskog kumulativnog rezača uz minimalno djelovanja udarnog vala na okolnu konstrukciju. Uz navedeno, noviji zahtjevi se odnose na izbjegavanje primjene olova u konstrukciji linijskih kumulativnih rezača koji se koriste u svemirskoj industriji. Na Slici 4-14. prikazane su fotografije iz filma snimljenog brzom kamerom prilikom ispitivanja učinkovitosti linijskog kumulativnog rezača za odvajanje raketnog motora od tijela letjelice.



Slika 4-14. Upotreba linijskog rezača za razdvajanje raketnog motora od tijela letjelice (www.nasa.gov)

4.3.4 Primjena LKR u vojnoj industriji, pri razminiranju i vatrogastvu.

Vojna industrija koristi linijske kumulativne rezače pri rušenju objekta miniranjem za uklanjanje čeličnih i armirano betonskih konstrukcija, probijanje otvora u zidovima itd. Kod razminiranja linijski kumulativni rezači se uspješno primjenjuju za neutralizaciju neaktiviranih bojevih glava i mina. Djelovanjem linijskih kumulativnih rezača presijeca se metalna košuljica projektila i omogućuje sagorijevanje eksplozivnog punjenja bojeve glave bez detonacije i fragmentiranja metalne košuljice (Kim et al. 2003). Linijski kumulativni rezači do sada su uspješno upotrjebljeni za neutralizaciju bojevih glava sa punjenjem od A3, Comp B, H6, RDX/Al/vosak, RDX/TNT/Al/vosak, TNT, TNT/Al i Tritonal. Na Slici 4-15. prikazana je upotreba LKR-a za neutralizaciju bojeve glave.

Slika 4-15. Upotreba LKR-a za neutralizaciju bojeve glave

U vojnoj industriji i vatrogastvu koriste se linijski kumulativni rezači koji mogu biti smješteni u okvire koji služe za probijanje otvora u zidu vratima i krovu građevine. U tu svrhu su razvijeni komercijalni oblici linijskih kumulativnih rezača formirani u različite geometrijske oblike, ovisno o dimenzijama željenog otvora u zidu. Na Slici 4-16. prikazan je linijski kumulativni rezač namijenjen za probijanje otvora u zidu.

Slika 4-16. Linijski kumulativni rezač namijenjen za probijanje otvora u zidu.

5 Pregled dosadašnjih istraživanja

Istraživanja kumulativnih eksplozivnih naboja su zastupljena u znanstvenim radovima od njihovog pronalaska do današnjih dana. Većina istraživanja provedena je za potrebe vojne, naftne i svemirske industrije, a u istraživanja je uključeno nekoliko istraživačkih centara. U glavnini radova su iznesena istraživanja izvedena na konusnim perforatorima, a samo manji dio njih se odnose na linijske kumulativne rezače. S obzirom da je znatan broj istraživanja izveden za vojne namjene ili potrebe komercijalnog razvoja pojedinog proizvoda, podaci su označeni kao povjerljivi i nisu dostupni u literaturi.

Nakon osamostaljenja Republike Hrvatske objavljena je nekolicina radova iz područja kumulativnih eksplozivnih naboja. Konusne eksplozivne naboje i izračunavanje parametara mlaza primjenom jednodimenzionalnog modela proučavao je Sućeska (Sućeska 1996). Ester i suradnici proučavali su brzinu mlaza i način djelovanja perforatora za potrebe naftne industrije (Ester et al. 2006). Linijski kumulativni rezači su istraživani s aspekta tehnološke primjene u sklopu tehnologijskog projekta (Sućeska et al. 2005) i mogućnosti primjene linijskih kumulativnih rezača u rudarstvu i graditeljstvu (Čačić 1998). Istraživana je i mogućnost upotrebe emulzijskih eksploziva za eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača (Dobrilović et al. 2009) te je mjeren tlak u materijalu mete prilikom nailaska mlaza na metu (Bohanek et al. 2011).

Pregledom dostupnih znanstvenih publikacija te izvještaja pojedinih specijaliziranih laboratorija moguće je razdvojiti dvije tematske cjeline vezane uz znanstvena istraživanja u području kumulativnih naboja. Prva prikazuje povijesni razvoj teorija, fizikalno matematičkih modela i računalnih kodova koji opisuju način djelovanja kumulativnih naboja, dok se druga cjelina odnosi na čimbenike koji utječu na učinkovitost kumulativnih naboja.

5.1 Fizikalno matematički modeli i teorije

Brzinu metala ubrzanog energijom eksploziva i brzinu mlaza linijskih kumulativnih rezača moguće je izračunati prema različitim modelima i teorijama. Za proračun maksimalne brzine metala ubrzanog djelovanjem eksploziva najčešće se koristi Gurneyjev model, a za proračun brzine primarnoga i sekundarnoga mlaza kumulativnih naboja Birkhoffov model i PER teorija. S obzirom na način djelovanja udarnog vala eksplozivnog naboja i oblik obloge linijskih kumulativnih rezača, kojeg u pravilu čine ravne površine, nužno je poznavati i Taylorov model.

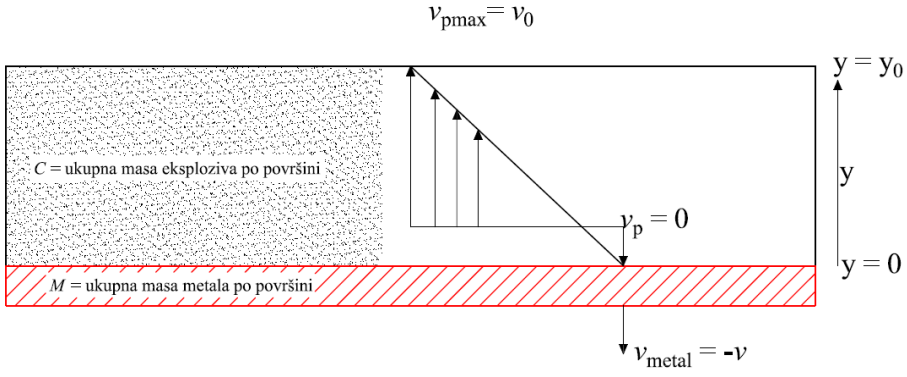
5.1.1 Gurneyjev model

R. W. Gurney je razvio matematičke izraze za proračun maksimalne brzine metalnih fragmenata odbačenih uslijed detonacije eksplozivnog punjenja. Gurneyjeva metoda se može izravno i jednostavno primijeniti u mnogobrojnim slučajevima interakcije između eksploziva i metala (Walters & Zukas 1989).

Model se temelji na zakonima o očuvanju energije i količine gibanja i sljedećim pretpostavkama:

- količina energije koja se oslobodi detonacijom eksploziva po jedinici mase metala je konstantna. Energija se konvertira u kinetičku energiju ubrzanog metala i kinetičku energiju plinovitih produkata detonacije.
- plinoviti produkti imaju jednoliku gustoću po cijelom volumenu i linearni jednodimenzionalni profil brzine u prostornom koordinatnom sustavu.

Gurneyjeva energija E_g (J/kg) je energija pretvorena iz kemijske energije eksploziva u početnom stanju u kinetičku energiju konačnog stanja. Kinetička energija je podijeljena na kinetičku energiju ubrzanog metala i kinetičku energiju plinova detonacije. Pretpostavka je da je brzina metala konstantna duž njegove debljine i da su brzine metala i plinova u svakoj točki okomite na uzdužnu os sustava (Altgilbers et al 2011). Pretpostavke pojednostavljuju stvaran proces i proračun. Na osnovi pretpostavki moguće je napisati jednadžbu bilance (očuvanja) energije za bilo koji tip jednostavne simetrične i asimetrične konfiguracije metala i eksploziva, čijim se integriranjem dobiva analitički izraz za konačnu brzinu ubrzanog metala. Maksimalna brzina metala v_m ovisna je o Gurneyjevoj energiji E_g i omjeru između ukupne mase metala M i ukupne mase eksploziva C po jediničnoj površini. Izvod jednadžbe za konačnu brzinu odbačenog metala prikazan je za jednostavni asimetrični sendvič sustav s otvorenim naličjem. Na Slici 5-1. dan je prikaz sendvič-sustava i pretpostavljena raspodjela brzina.



Slika 5-1. Sendvič-sustav eksploziva i metala i pretpostavljena raspodjela brzina.

U slučaju linearnoga rasporeda brzina po osi y slijedi:

$$v_{\mathrm{pd}}(y) = (v_0 + v_{\mathrm{m}})\frac{y}{y_0} - v_{\mathrm{m}} \tag{5-1}$$

gdje je:

v_{m}- brzina metala (m/s),

v_{pd}- brzina plinova detonacije (m/s) i

y_0 - početna debljina eksploziva (m).

Pretpostavka je da je brzina pojedine čestice konstantna tijekom vremena, te jednadžbe očuvanja energije i količinu gibanja glase:

$$CE_g = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}\rho_e \int_0^{y_0}\left[(v_0 + v_{\mathrm{m}})\frac{y}{y_0} - v_{\mathrm{m}}\right]^2 dy \text{ i} \tag{5-2}$$

$$0 = -Mv + \rho_e \int_0^{y_0}\left[(v_0 + v_{\mathrm{m}})\frac{y}{y_0} - v_{\mathrm{m}}\right] dy \tag{5-3}$$

gdje je:

ρ_e - gustoća eksploziva (kg/m^3),

$C = y_0\rho_e$ - masa eksploziva po jedinici površine(kg/m^2),

E_g - specifična kinetička energija eksploziva ili Gurneyjeva energija (J/kg),

$M = \rho_m t$ - masa metala po jedinici površine (kg/m^2),

gdje je ρ_m - gustoća metala(kg/m^3),

t - debljina (visina) metane ploče (m).

Integriranjem jednadžbi (5-2) i (5-3) dobije se:

$$Mv = \rho_e\left[(v_0 + v_{\mathrm{m}})\frac{y^2}{2y_0} - v_{\mathrm{m}}y\right]_0^{Y_0} \tag{5-4}$$

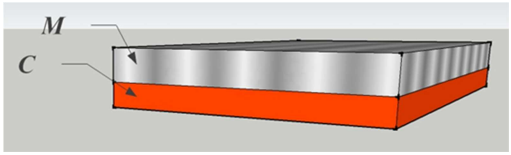
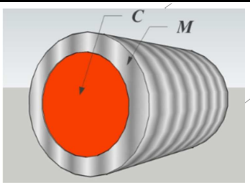
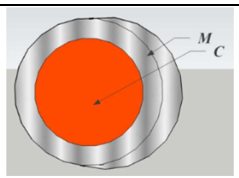
$$Mv = \rho_e y_0\left[\frac{v_0 + v_{\mathrm{m}}}{2} - v_{\mathrm{m}}\right] \tag{5-5}$$

$$v_{\mathrm{m}} = \sqrt{2E_g}\left[\frac{\left(1 + 2\frac{M}{C}\right)^3 + 1}{6\left(1 + \frac{M}{C}\right)} + \frac{M}{C}\right]^{-1/2} \tag{5-6}$$

$$\frac{v_0}{v_{\mathrm{m}}} = 2\frac{M}{C} + 1 \tag{5-7}$$

U Tablici 5-1. dane su Gurneyjeve jednadžbe za pojedine simetrične i asimetrične konfiguracije metala i eksploziva, a u Tablici 5-2. vrijednosti gustoće, brzine detonacije i Gurnyjeve konstante za pojedine eksplozive.

Tablica 5-1. Gurneyjeve jednažbe za pojedine simetrične i asimetrične konfiguracije metala i eksploziva

	$\frac{v_m}{\sqrt{2E_g}} = \left[\frac{1+\left(1+2\frac{M}{C}\right)^3}{6\left(1+\frac{M}{C}\right)} + \frac{M}{C}\right]^{-1/2}$
	$\frac{v_m}{\sqrt{2E_g}} = \left(2\frac{M}{C} + \frac{1}{3}\right)^{-1/2}$
	$\frac{v_m}{\sqrt{2E_g}} = \left(\frac{M}{C} + \frac{1}{2}\right)^{-1/2}$
	$\frac{v_m}{\sqrt{2E_g}} = \left(\frac{M}{C} + \frac{3}{5}\right)^{-1/2}$

Tablica 5-2. Gustoća, brzina detonacije i Gurneyjeva konstanta za pojedine eksplozive (Cooper 1996)

Eksploziv	**Gustoća** (g/cm^3)	**Brzina detonacije** (m/s)	$\sqrt{2E_g}$ (m/s)
Composition B	1,72	7920	2700
Composition C-3	1,60	7630	2680
Cyclotol 75/25	1,754	8250	2790
HMX	1,835	8830	2800
LX-14	1,89	9100	2970
Octol 75/25	1,81	8480	2800
PBX 9404	1,84	8800	2900
PBX 9502	1,885	7670	2377
PETN	1,76	8260	2930
RDX	1,77	8700	2283
TNT	1,62	6860	2440
Tritonal	1,77	6700	2320

Gurneyjeva konstanta $\sqrt{2E_g}$ pojavljuje se u svim jednadžbama. Postoji više načina određivanja Gurneyjeve konstante za pojedini eksploziv. Za većinu vojnih eksploziva odnos između brzine detonacije i Gurneyjeve brzine poprima vrijednosti između 2,79 i 3,15. U pravilu se uzima da je Gurneyjeva brzina jednaka približno 1/3 brzine detonacije eksploziva. Kennedy je predložio da se za Gurneyjevu energiju može koristiti relacija $E_g \approx 0{,}7Q_v$, gdje je Q_v detonacijska toplina eksploziva. Koch i suradnici (Koch et al. 2002) predlažu slijedeću formulu za izračun Gurneyjeve konstante:

$$\sqrt{2E_g} = \frac{v_d}{3{,}08} \tag{5-8}$$

Gdje je:

$\sqrt{2E_g}$ -. Gurneyjeva konstanta (brzina) (m/s) i

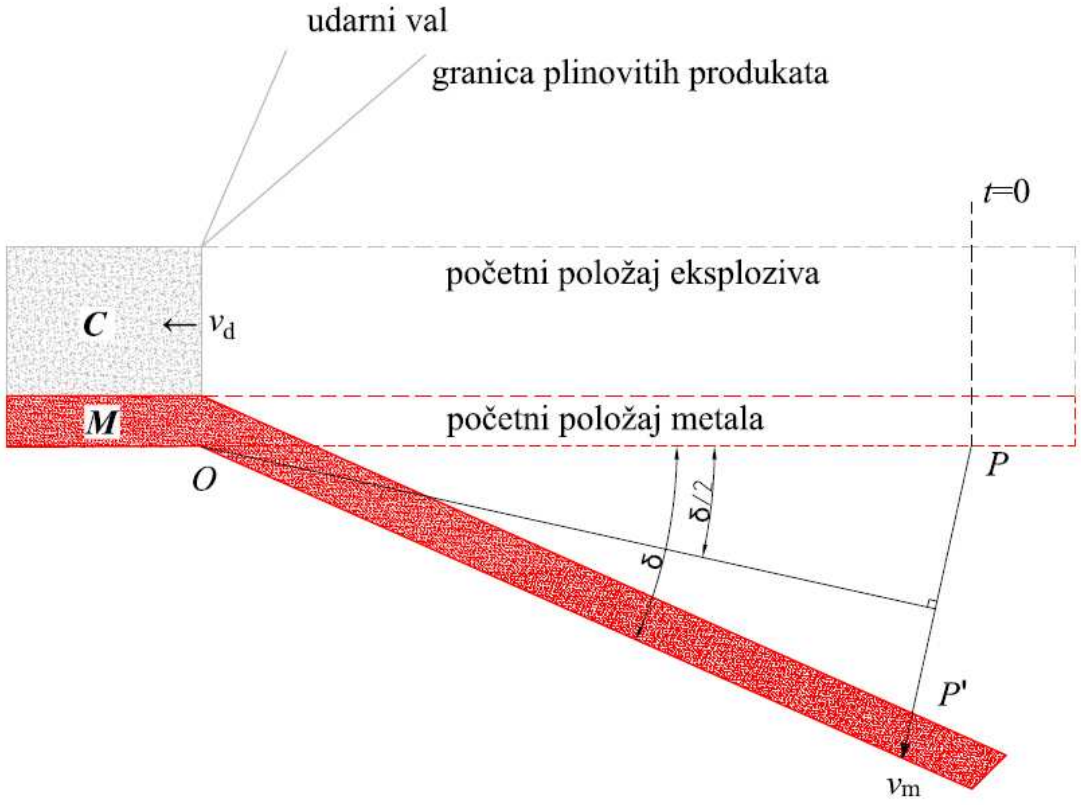
v_d - brzina detonacije eksploziva (m/s).

Prednosti Gurneyjevog modela su:

- visoka točnost, odstupanja su unutar 10% od eksperimentalnih rezultata,
- primjenljivost unutar odnosa *M/C* od 0,1 do 10,
- jednostavnost proračuna i
- raširenost primjene proračuna (fragmentacija bojevih glava, zavarivanje metala eksplozivom, oblikovanje metala uz pomoć eksploziva) (Walters & Zukas 1989).

5.1.2 Taylorov model

Gurneyjevim modelom je pretpostavljeno gibanje metala u pravcu okomitom na njegovu površinu (Altgilbers et al. 2011). Kad detonacijski val putuje uzduž obloge linijskoga kumulativnog rezača, interakcija između obloge i detonacijske fronte se razlikuje u odnosu na kumulativne perforatore, iz razloga što je detonacijska fronta paralelna s oblogom linijskog kumulativnog rezača, a ne okomita, kao što je to slučaj kod perforatora. Gibanje metala uzduž horizontalne osi odvija se u skladu sa Taylorovom aproksimacijom kuta gibanja prikazanoj na Slici 5-2.



Slika 5-2. Taylorova aproksimacija kuta gibanja .

Detonacijski val se giba paralelno sa površinom metala, kao rezultat djelovanja detonacijskog vala metalna ploča se svija za kut δ u odnosu na početni položaj. Pretpostavlja se da je ubrzanje metala do njegove konačne brzine trenutno. Gibanje je predstavljeno rotacijom metalne ploče oko osi rotacije *O*, ne dolazi do posmičnog gibanja metala i promjene u debljini i duljini metala. Sukladno pretpostavkama duljina $\overline{OP} = \overline{OP}'$. Linija koja ima ishodište u *O* okomita je na pravac $\overline{PP}'$ i dijeli kut δ na jednake polovice. Ukoliko se vrijeme mjeri od trenutka kada produkti detonacije dođu u točku *P*, duljine pravaca $\overline{OP}$ i $\overline{PP}'$ mogu se dovesti u vezu s brzinom detonacije eksploziva v_d i brzinom ubrzanog metala v_m.

$$\overline{OP} = v_d t \tag{5-9}$$

$$\overline{PP}' = v_m t \tag{5-10}$$

$$\sin \delta/2 = \frac{\overline{PP}'/2}{\overline{OP}} = \frac{v_m t}{2 v_d t} = \frac{v_m}{2 v_d} \tag{5-11}$$

gdje je:

δ - Taylorov kut (°)

v_m - maksimalna brzina gibanja metala (m/s),

v_d - brzina detonacije eksploziva (m/s) i

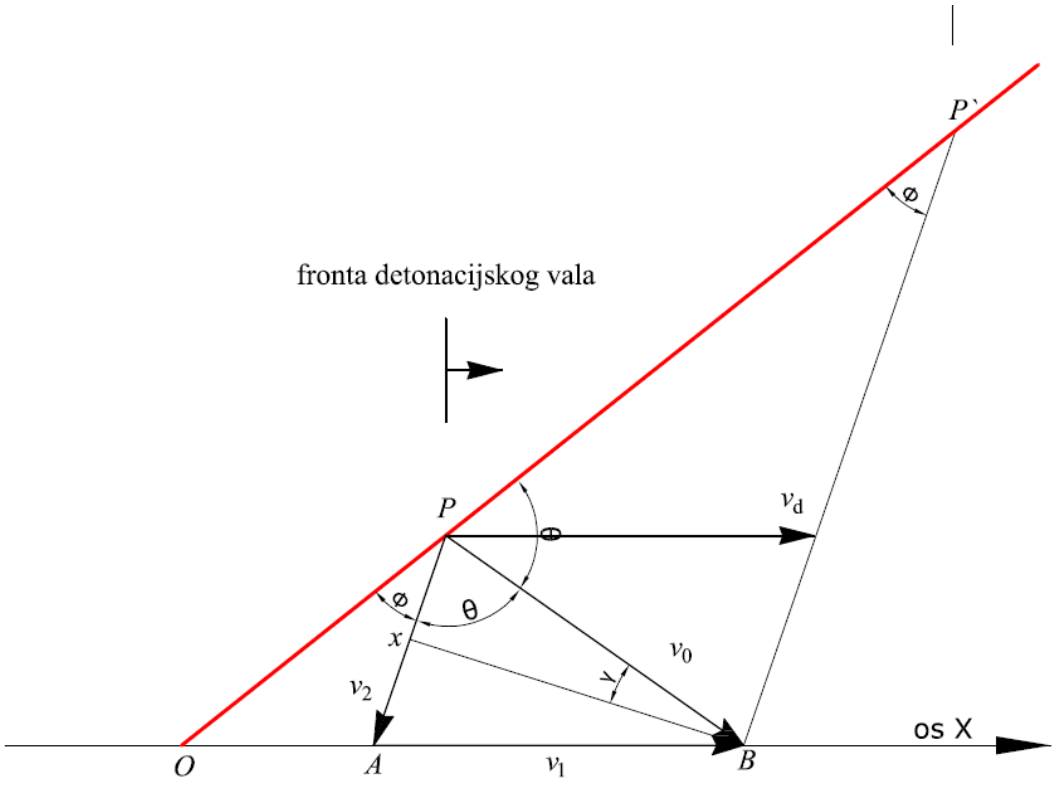
Za određivanje v_m mogu se upotrijebiti Gurneyjeve jednadžbe.

5.1.3 Birkhoffov model

Prvi model koji opisuje način djelovanja konusnih kumulativnih naboja objavio je Birkhoff sa suradnicima 1948. godine. Proces je podijeljen u dvije faze: prva, stvaranje tankog mlaza od dijela metalne obloge koji putuje longitudinalno velikom brzinom, i druga, razmicanje ciljanog materijala mete u stranu uslijed djelovanja ekstremno visokog tlaka kojim mlaz djeluje na ciljani materijal. Interpretacija obje faze se bazira na klasičnoj hidrodinamici idealnih fluida, koja se može primijeniti, jer se čvrstoća metala može zanemariti uslijed djelovanja tako visokih tlakova (Birkhoff et al 1948).

Materijal obloge se promatra kao neviskozan i nestišljiv fluid. Pretpostavka je da elementi obloge trenutačno ubrzavaju do svoje maksimalne brzine i da mlaz ima konstantu duljinu jednaku duljini stranice konusa.

Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja detonacijski val nailazi na metalnu oblogu konusnog oblika. Pretpostavka je da tlak detonacije djeluje jednoliko na sve strane obloge, uzrokujući pomicanje materijale obloge u smjeru centralne osi okomito na površinu obloge. Na Slici 5-3. prikazani su geometrijski odnosi pri urušavanja metalne obloge.



Slika 5-3. Urušavanje obloge kumlativnih naboja prema Birkhoffovom modelu (Birkhoff et al 1948)

Početni kut 2α, koji zatvaraju dvije nasuprotne strane poprečnog presjeka konusne metalne obloge manji je od kuta 2β, koji zatvara metalna obloga prilikom urušavanja zbog konačnog vremena potrebnom udarnom valu da prođe od vrha do baze konusa. Zbog simetričnosti konusa, jednolikog djelovanja udarnog vala na svim stranama konusa i identičnog procesa urušavanja elemenata konusa na Slici 5-3. je prikazana samo gornja polovica poprečnog presjeka konusne obloge. Brzina v_0 kojom se metal obloge giba prema centralnoj osi X polovi kut $\angle APP'$. Ukoliko se promatra koordinatni sustav koji se giba jednolikom brzinom, u njemu se elementi obloge gibaju ka unutrašnjosti pravcem $\overline{P'P}$ i prema osi pravcem $\overline{PA}$. Brzina materijala obloge mijenja pravac ali ne i iznos jer je smjer djelovanja tlaka detonacije uvijek okomito na površinu metala. $\overline{P'P}$ i $\overline{PB}$ su ulazna i izlazna brzina materijala obloge u koordinatnom sustavu koji se giba. $\overline{P'B}$ i $\overline{PA}$ su međusobno paralelni pravci, a $\overline{P'P}$ i $\overline{P'B}$ su jednaki po iznosu.

Prema Slici 5-3. vrijedi :

$$\overline{PP'} + \overline{P'B} = \overline{PB} = v_0 \tag{5-12}$$

Spoj dvije nasuprotne strane metalne obloge giba se od točke A prema točki B brzinom v_1:

$$v_1 = \frac{v_0 \cos[(\beta-\alpha)/2]}{\sin\beta} \tag{5-13}$$

Prema Slici 5-3.vrijede i slijedeći odnosi:

- $\angle OPA=\Phi$, $\alpha+ \Phi+180^o-\beta=180^o$ odnosno $\Phi=\beta- \alpha$,
- $\overline{XB}$ je okomit na $\overline{PA}$,
- $\angle PXB=\gamma=90-\theta$,
- $\angle ABX=90- \beta$,
- $2\theta+\Phi=180$ ili $\theta = 90 - \frac{\Phi}{2} = 90 - \left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)$ i
- $\gamma + \theta = 90$, $\gamma + 90 - \left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) = 90$ ili $\gamma = \left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)$.

Prema trokutu APB vrijedi:

$$v_1/\sin\theta = v_0/\sin\beta \rightarrow v_1 = v_0 \sin\theta/\sin\beta \tag{5-14}$$

$$v_1 = \frac{v_0 \cos[(\beta-\alpha)/2]}{\sin\beta} = \frac{v_0 \cos(\Phi/2)}{\sin\beta} \tag{5-15}$$

Promatrač stacioniran u točki A sustava koji se giba primijetiti točku P metalne obloge kako mu prilazi brzinom v_2.

$$v_2 = v_1 \cos\beta + v_0 \cos\left[90 - \left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\right] = v_1 \cos\beta + v_0 \sin\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) \quad (5\text{-}16)$$

Prema jednadžbi (5-15) slijedi:

$$v_2 = v_0 \left\{\frac{\cos\left[90-\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\right]}{\sin\beta} + \sin\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\right\} \quad (5\text{-}17)$$

Ukoliko je $v_D = v\cos\alpha$,

gdje je v komponenta brzina urušavanja obloge duž pravca $\overline{PP'}$.

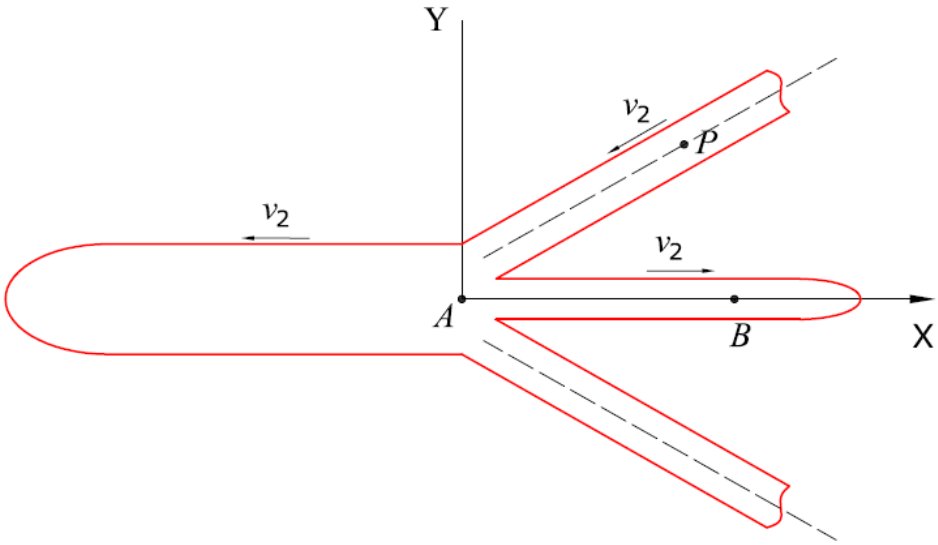
Prema trokutu PBP' vrijedi:

$$v_0 / \sin(\beta - \alpha) = u / \sin\theta \quad (5\text{-}18)$$

$$v = \frac{v_0}{\sin(\beta-\alpha)} \sin\left[90 - \left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\right] = \frac{v_0 \cos[(\beta-\alpha)/2]}{\sin(\beta-\alpha)} \quad (5\text{-}19)$$

$$\frac{v_d}{cos\alpha} = \frac{v_0 \cos[(\beta-\alpha)/2]}{\sin(\beta-\alpha)} \quad (5\text{-}20)$$

Promatrač pozicioniran u točki A sustava koji se giba vidi primarni mlaz koji se giba desno od njega i sekundarni mlaz koji se giba lijevo od njega na način koji je prikazan na Slici 5-4.



Slika 5-4. Formiranje primarnoga i sekundarnoga mlaza metalne obloge promatranog iz točke A sustava koji se giba (Birkhoff et al 1948).

Pretpostavka je da je materijal obloge neviskozan i nestišljiv fluid, što znači da nema unutarnjeg trenja između pojedinih čestica materijala obloge te da se ne mijenja gustoća materijala tijekom procesa. Proces je stacionaran, nepromjenjiv tijekom vremena. Na osnovi pretpostavki gibanje elemenata se može prikazati gibanjem fluida u dva simetrična mlaza istom brzinom.

Pretpostavke i jednodimenzionalni tok materijala obloge omogućuje upotrebu Bernoullijeve jednadžbe:

$$p + \frac{\rho_0 v^2}{2} = const \tag{5-21}$$

gdje je:
p - tlak (Pa),
ρ_o - gustoća materijala (kg/m^3) i
v - brzina (m/s).

Bernoulijeva jednadžba prikazuje odnos između tlaka i brzine u bilo kojoj točki obloge. Tlak u bilo kojoj točki obloge određuje i brzinu u toj točki. Ranije je rečeno da je brzina obloge uslijed djelovanja tlaka detonacije vrlo velika, tlak na površini obloge raste rapidno te je na svim površinama konstantan.

U stacionarnom koordinatnom sustavu brzina primarnoga mlaza je jednaka:

$$v_p = v_1 + v_2 \tag{5-22}$$

Brzina sekundarnoga mlaza, mlaza koji se u pokretnom koordinatno sustavu kreće na lijevo, je jednaka:

$$v_s = v_1 - v_2 \tag{5-23}$$

Promatra li se točka *P* materijala obloge koja se giba prema točki *B*, koja je stacionarna u prostoru, unutarnji sloj materijala obloge tvoriti će primarni mlaz koji se giba velikom brzinom i prodire u materijal mete, dok će vanjski sloj materijala obloge tvoriti sekundarni mlaz koji putuje manjim brzinama. Izrazi za primarni i sekundarni mlaz su:

$$v_p = v_0 \left[\frac{\cos[(\beta-\alpha)/2]}{\sin\beta} + \frac{\cos[(\beta-\alpha)/2]}{\tan\beta} + \sin\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\right] \tag{5-24}$$

$$v_s = v_0 \left[\frac{\cos[(\beta-\alpha)/2]}{\sin\beta} - \frac{\cos[(\beta-\alpha)/2]}{\tan\beta} - \sin\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\right] \tag{5-25}$$

Ukupna masa obloge m raspodijeljena je između primarnoga i sekundarnoga mlaza u skladu sa jednadžbom:

$$m = m_p + m_s \tag{5-26}$$

Primjenom jednadžbe kontinuiteta na pokretni koordinatni sustav dobiva se

$$m v_2 cos\beta = m_s v_2 - m_p v_2 \tag{5-27}$$

Rješavanjem jednadžbi dobiva se:

$$m_p = \frac{m}{2}(1 - cos\beta) \tag{5-28}$$

$$m_s = \frac{m}{2}(1 + cos\beta) \tag{5-29}$$

Model pretpostavlja konstantne brzine primarnoga i sekundarnoga mlaza. Ukoliko u formule uvedemo izraz za brzinu detonacijskog vala v_d dobiva se:

$$v_p = \frac{v_d}{cos\alpha}\sin(\beta-\alpha)\left[\csc\beta + \cot\beta + \tan\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\right] \quad (5\text{-}30)$$

$$v_s = \frac{v_d}{cos\alpha}\sin(\beta-\alpha)\left[\csc\beta - \cot\beta - \tan\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\right] \quad (5\text{-}31)$$

Iz formula za primarni i sekundarni mlaz se vidi da brzina primarnoga mlaza raste smanjenjem kuta α i kuta β. Kada je α=0 i β=0 tada je i $v_s = 0$, i govorimo o cilindričnoj metalnoj oblozi.

Primjenom Birkhoffovog modela dobiju se dobra poklapanja s eksperimentalnim rezultatima. Nedostaci teorije su :

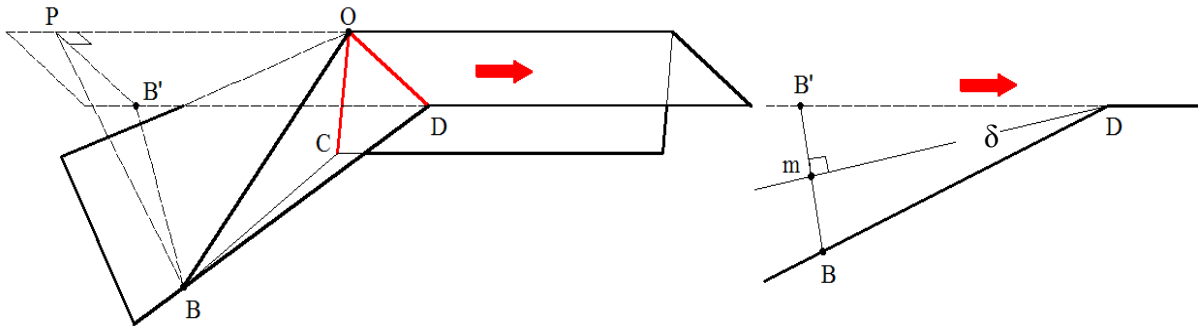
- veće vrijednosti brzine primarnoga mlaza nego one dobivene eksperimentom,
- ne uzima se u obzir promjene brzine primarnoga i sekundarnoga mlaza sa vremenom i
- ne opisuje se pojava izduljena i raspada primarnoga mlaza.

Drugi dio Birkhoffove teorije koji se odnosi na penetraciju mlaza u ciljani materijal prikazan je u poglavlju 5.1.5.

5.1.3.1 Modificirana Birkhoffova teorija

Zadnji radovi iz područja linijskih kumulativnih rezača opisuju djelovanje linijskih kumulativnih rezača modificiranom Birkhoffovom teorijom (Lim 2012a, Lim 2012b). Jedina razlika između Birkhoffove teorije i modificirane Birkhoffove teorije je u smjeru gibanja detonacijskog udaranog vala. Za proračun se Taylorov model gibanja obloge i kut obloge α iz Birkohoffove teorije zamjenjuje se sa modificiranim kutom *α'*.

Lim je pretpostavio gibanje obloge u horizontalnoj i vertikalnoj osi. Gibanje obloge i geometrijski odnosi prilikom gibanja uslijed djelovanja eksplozivnog naboja prikazani su Slikom 5-5.



Slika 5-5. Gibanje obloge i geometrijski odnosi prilikom gibanja obloge (Lim 2012a)

Modificirani kut α' računa se prema izrazu (Lim 2012a):

$$\sin\alpha' = \arcsin(\sin\alpha \cos\delta/2) \tag{5-32}$$

Uvrštenjem modificiranog kuta α' Birkhoffove jednadžbe za izračun brzine primarnoga i sekundarnoga mlaza i poprimaju oblik (Lim 2012a):

$$v_p = v_0 \left[\frac{\cos[(\beta-\alpha')/2]}{\sin\beta} + \frac{\cos[(\beta-\alpha')/2]}{\tan\beta} + \sin\left(\frac{\beta-\alpha'}{2}\right)\right] \tag{5-33}$$

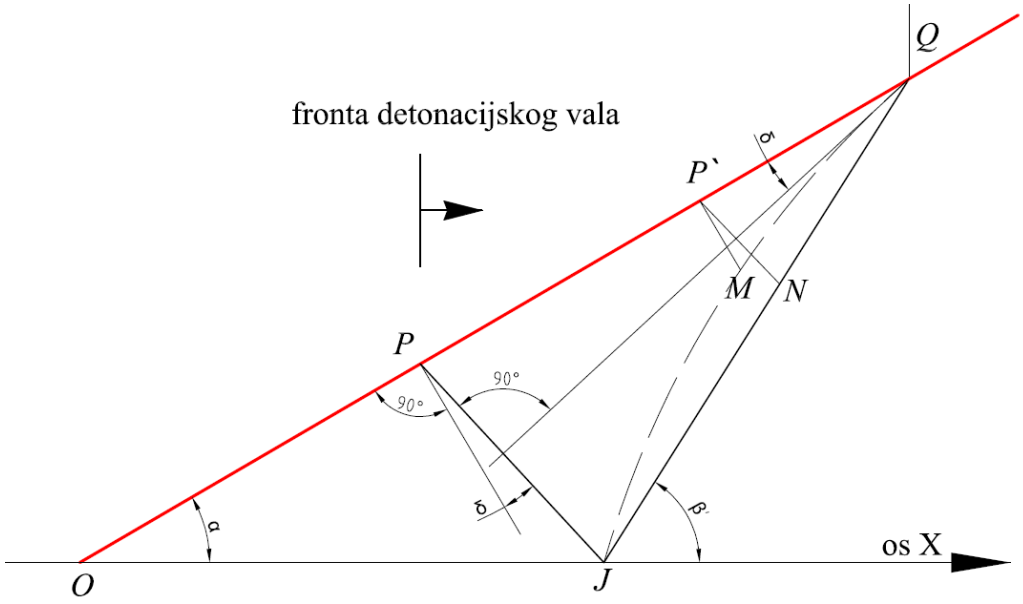
$$v_s = v_0 \left[\frac{\cos[(\beta-\alpha')/2]}{\sin\beta} - \frac{\cos[(\beta-\alpha')/2]}{\tan\beta} - \sin\left(\frac{\beta-\alpha'}{2}\right)\right] \tag{5-34}$$

Rezultati dobiveni ovom teorijom nisu validirani. Rezultati su samo uspoređeni s rezultatima numeričke simulacije, ali ne i sa stvarnim rezultatima mjerenja. Drugi nedostatak je da se teorija može koristiti samo u slučajevima kad je kut obloge manji od 90º, a poznato je da većina linijskih kumulativnih rezača u svojoj konstrukciji koriste kut obloge od 90º.

5.1.4 PER teorija

Pugh, Eichelberger i Rostoker su 1952. godine nadogradili i proširili Birkhoffov model. Teorija je prema početnim slovima prezimena autora dobila naziv PER torija. Naziva se i nestacionarna, jer za razliku od konstantne brzine urušavanja metalne obloge, koju pretpostavlja Birkhoff, PER teorija pretpostavlja promjenljivu brzinu urušavanja obloge. Brzina urušavanja obloge konusa opada kontinuirano od vrha prema bazi konusa, a razlike u brzini urušavanja uzrokuju promjene u procesu formiranja mlaza i brzini elemenata duž mlaza.

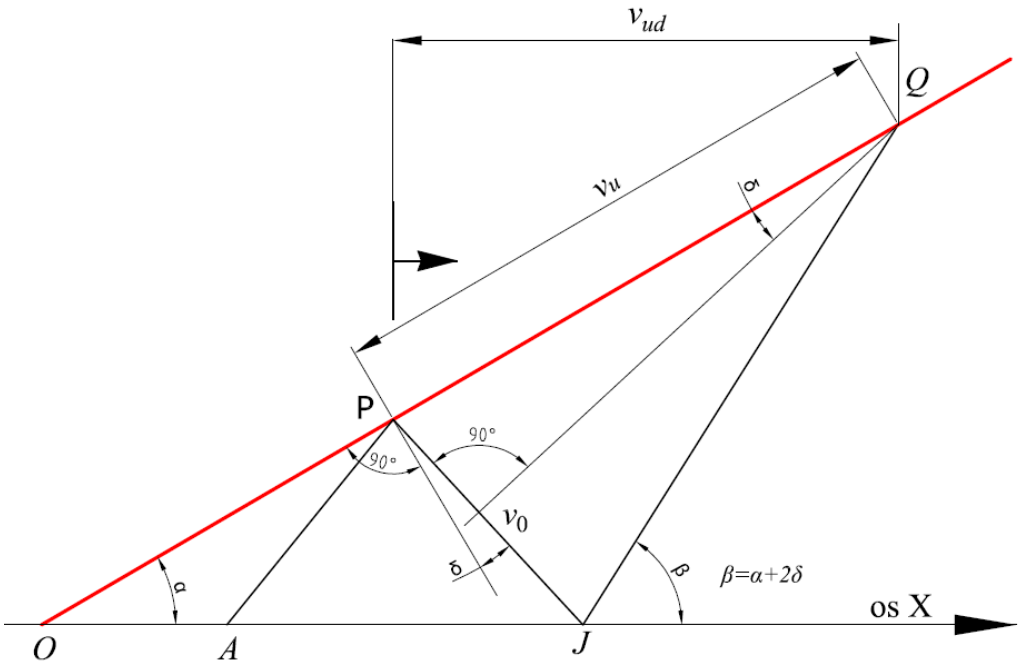
Prema PER teoriji proces urušavanje metalne obloge se može prikazati Slikom 5-6.



Slika 5-6. Urušavanje obloge kumlativnih naboja prema PER teoriji (Pugh et al. 1952)

Detonacijski val putuje od točke *P* do točke *Q* pravcem $\overline{OPQ}$ površine metalne obloge. Element obloge u točki *P* urušava se u točku J. Kad bi brzina urušavanja bila jednolika element obloge u točki *P`* došao bi u točku *N* istovremeno kad element u točki *P* dođe u točku *J*. Urušavanje obloge bi se odvijalo pravcem $\overline{QNJ}$. S obzirom na pretpostavku o padu brzine urušavanje prema bazi metalne obloge materijal obloge u točki *P`* giba se sporije od materijala obloge u točki *J*. Površina urušavanja će imati oblik pravca $\overline{QMJ}$. Kut β biti će veći od kuta β' koji vrijedi za stacionarne uvjete (Birkhoffova teorija). Prema PER teoriji svaki element lijevka, bez obzira na svoju veličinu, je zasebna cjelina i nije pod utjecajem susjednih elemenata u skladu sa hidrodinamičkom teorijom.

Na Slici 5-7 prikazani su vektori brzina urušavanja elemenata konusne obloge



Slika 5-7. Vektori brzina elementa urušavanja elementa obloge (Pugh et al 1952)

Pravac $\overline{QJ}$ je paralelan s pravcem $\overline{PA}$ i jednak po duljini pravcu $\overline{QP}$. Ako su iznosi $\overline{QP}$ i $\overline{QJ}$ jednaki komponenti brzine detonacije paralelnoj s površinom metalne obloge v_u, oni u pokretnom koordinatnom sustavu predstavljaju brzine elemenata obloge koje ulaze i napuštaju točku P. Vektor $\overline{PJ}$ $=v_0$ gdje je v_0 maksimalna brzina urušavanja obloge u stacionarom koordinatnom sustavu. Gibanje elemenata obloge nije okomito na površinu obloge, nego pravac gibanja zatvara kut δ sa okomicom. Izraz za kut δ, prema Tayloru, jednak je:

$$\sin\delta = \frac{v_0}{2v_u} = \frac{v_0}{2(v_{ud}/\cos\alpha)} \qquad (5\text{-}35)$$

gdje je:

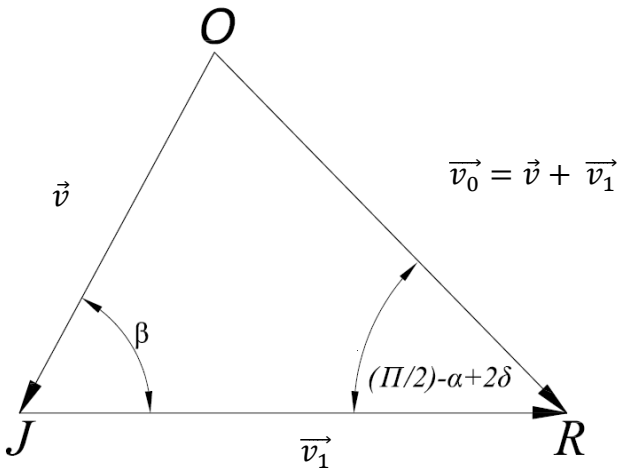
v_{ud} - komponenta brzine detonacije paralelna sa osi simetrije, osi x (m/s),

v_u - komponenta brzine detonacije paralelna s površinom obloge (m/s) i

α - početni kut konusa (°).

Ukoliko je v_0 konstantna, tada se svi rezultata PER teorije poklapaju s rezultatima Birkhoffove teorije.

Pravilnim izborom koordinatnog sustava geometrijski odnosi vektora brzina u pokretnoj točki J se mogu prikazati Slikom 5-8.



Slika 5-8. Geometrijski odnosi vektora brzina u pokretnoj točki J

Os konusa je pravac $\overline{JR}$, a element obloge se giba prema osi konusa pravcem $\overline{QJ}$ brzinom v. Pravac $\overline{JR}$ je pravac brzine v_0 kojom se giba pokretni koordinatni sustav. Prema Slici 5-8. vrijedi sljedeće:

$$v = \frac{v_0 \cos(\alpha+\delta)}{\sin\beta} \tag{5-36}$$

$$v_1 = \frac{v_0 \cos(\beta-\alpha-\delta)}{\sin\beta} \tag{5-37}$$

U stacionarnom koordinatnom sustavu brzine primarnoga v_p i sekundarnoga v_s mlaza su jednake:

$$v_p = v_1 + v \tag{5-38}$$

$$v_s = v_1 - v \tag{5-39}$$

Uvrštavanjem jednadžbi (5-36) i (5-37) u jednadžbe (5-38) i (5-39) dobiju se konačni izrazi za izračunavanje brzine primarnoga v_p i sekundarnoga v_s mlaza.

$$v_p = \frac{v_0 \cos(\alpha+\delta-\beta/2)}{\sin(\beta/2)} \tag{5-40}$$

$$v_s = \frac{v_0 \sin(\alpha+\delta-\beta/2)}{\cos(\beta/2)} \tag{5-41}$$

Ako je $\beta = \beta' = \alpha + 2\delta$ jednadžbe postaju identične jednadžbama Birkhoffove teorije.

Eliminacijom δ iz jednadžbi i koristeći izraz (5-36) dobiva se:

$$v_p = \frac{v_0 \cos\left(\alpha-\beta/2+\sin^{-1}\frac{v_0}{2v_u}\right)}{\sin(\beta/2)} \tag{5-42}$$

$$v_s = \frac{v_0 \sin\left(\alpha-\beta/2+\sin^{-1}\frac{v_0}{2v_u}\right)}{\cos(\beta/2)} \tag{5-43}$$

Jednadžbe vrijede za stacionarni model kada je v_0 konstantna veličina kao i za nestacionarni model kada se v_0 mijenja ovisno o položaju elementa obloge.

Jednadžbama su dani izrazi za proračunavanje brzine primarnoga i sekundarnoga mlaza. Mase primarnoga i sekundarnoga mlaza dobivaju se iz zakona o očuvanju mase i količine gibanja.

$$dm = dm_p + dm_s \tag{5-44}$$

$$\frac{dm_p}{dm} = \sin^2\frac{\beta}{2} \tag{5-45}$$

$$\frac{dm_s}{dm} = \cos^2\frac{\beta}{2} \tag{5-46}$$

Iz jednadžbi za određivanje brzine i mase primarnoga i sekundarnoga mlaza vidljivo je da su vrijednosti proračuna ovisne o kutu obloge (2α), brzini detonacije eksploziva, brzini urušavanja (v_0) i kutu urušavanja (β). Prve dvije veličine su konstantne i jednostavne za mjerenje dok je za druge dvije veličine pretpostavljeno da su promjenljive.

Kut urušavanja β se računa pomoću jednadžbe:

$$\tan\beta = \frac{\sin\alpha+2\sin\delta\cos A-X\sin\alpha(1-\tan A\tan\delta)v_0'/v_0}{\cos\alpha-2\sin\delta\cos A+X\sin\alpha(\tan A+\tan\delta)v_0'/v_0} \tag{5-47}$$

gdje je:

$A=\alpha+\delta$,

X - odsječak točke na X osi i

v_0' - parcijalna derivacija v_0 po promjenljivom X

Kako je $2\delta=\beta'-\alpha$ i $2A=\beta'+\alpha$, jednadžbu je moguće pojednostaviti, te ona poprima oblik:

$$\tan\beta = \frac{\sin\beta' - X\sin\alpha(1-\tan A\tan\delta)v_0'/v_0}{\sin\beta' + X\sin\alpha(\tan A+\tan\delta)v_0'/v_0} \tag{5-48}$$

Na temelju PER teorija razvijeni su brojni jednodimenzionalni i analitički kodovi koji omogućuju brzu i ekonomičnu analizu prilikom projektiranja kumulativnih naboja. Za izračunavanje Taylorovog kuta δ koriste se različite semiempirijske jednadžbe. Jedna od najčešće korištenih jednadžbi je Richterova jednadžba (Sućeska 1996):

$$\frac{1}{2\delta} = \frac{1}{\Phi_0} + K\rho_o\frac{d_o}{d_e} \tag{5-49}$$

gdje je:

ρ_o - gustoća obloge (kg/m^3),

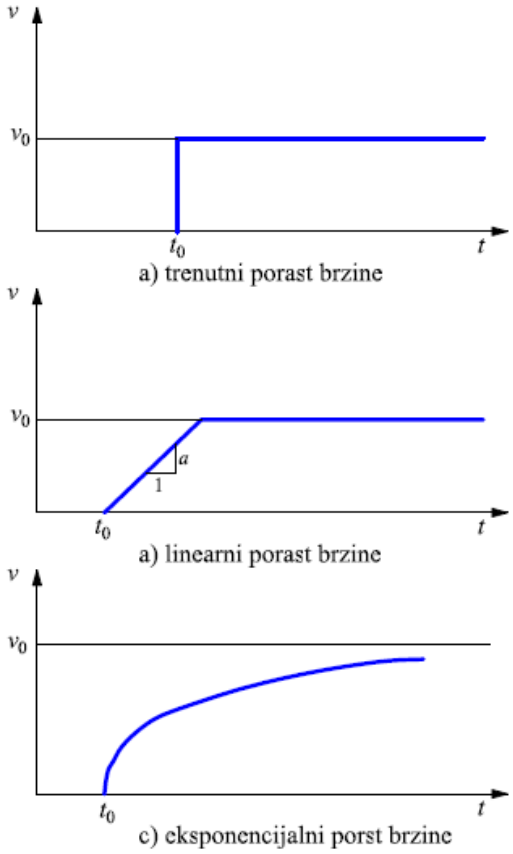
d_o - debljina obloge (m),

d_e - debljina eksploziva (m) i

K i Φ_0 - eksperimentalne konstante.

Nakon izračunavanja Taylorovog kuta primjenom Taylorove jednadžbe računa se brzina urušavanja obloge. Prije toga je potrebno eksperimentalnim putem odrediti konstante K i Φ_0.

PER teorija u svom izvornom obliku pretpostavlja trenutni porast brzine elementa obloge do svoje maksimalne brzine v_0. Pretpostavka je korigirana pretpostavkom da brzina raste linearno u kratkom vremenu dok materijal obloge ne postigne svoju maksimalnu brzinu ili se ne utroši u os mlaza. Linearni porast brzine obloge zamijenjen je sa pretpostavkom o eksponencijalnom porastu brzine koja najviše odgovara stvarnosti. Premda je eksponencijalni porast brzine eksperimentalno dokazan, pojedini analitički kodovi koriste još uvijek trenutni porast brzine zbog jednostavnosti proračuna. Pretpostavljeni oblici porasta brzine obloge prikazani su na Slici 5-9.



Slika 5-9. Pretpostavljeni oblici porasta brzine obloge (Walters & Zukas 1989).

Vjerojatno najtočniji izraz za proračun brzine elemenata lijevaka u ovisnosti o vremenu dan je eksponencijalnim izrazom (Randers-Pehrson 1976):

$$v(t) = v_0 \left[1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)}\right] \tag{5-50}$$

gdje je :

t_0 - vrijeme početaka gibanja metalne obloge (s) i

τ - vremenska konstanta.

Za izračun vremenske konstante Chou predlaže izraz (Sućeska et al. 2005):

$$\tau = c_1 \frac{m_0 v_0}{p_{CJ}} + c_2 \tag{5-51}$$

gdje je :

m_0 - masa obloge po jedinici površine (kg/m^2),

p_{CJ} - tlak detonacije u Chapman-Jouget točki (Pa) i

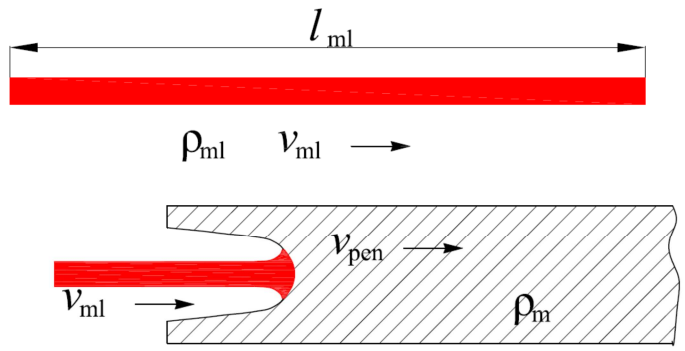
c_1 i c_2 - konstante za koje je Chou utvrdio da iznose c_1=0,912 i c_2=20700.

5.1.5 Modeli penetracije kumulativnog mlaza

Analitički modeli koji su sposobni predvidjeti penetraciju mlaza eksplozivnih naboja u različite materijale od velike su važnosti za znanost i područje primjene. Prvi analitički kodovi bazirali su se na Bernoullijevoj jednadžbi i promatrali su mlaz konstantne brzine. Nakon toga razvili su se modeli koji u obzir uzimaju nejednoliku brzinu mlaza i prekid mlaza tj. raspadanje mlaza na manje dijelove.

5.1.5.1 Penetracija mlaza s konstantnom brzinom

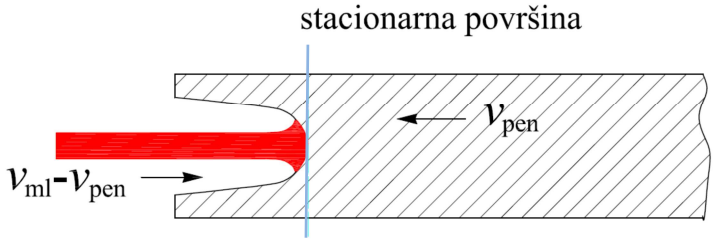
Prvi model penetracije razvijen je u Engleskoj. Model je detalnjno prikazan u radu Birkhoffa i suradnika (Birkhoff et al 1948). Tlak kojim mlaz djeluje u točki udara u materijal mete je znatno veći od granice čvrstoće materijala. Zbog toga se model bazira na pretpostavci da se čvrstoća i viskozitet materijala mete može zanemariti. Pretpostavka omogućuje upotrebu hidrodinamičkih jednadžbi koje opisuju tok neviskoznih i nestišljivih fluida. Penetracija mlaza sa konstantnom duljinom i brzinom u materijal metu se može prikazati Slikom 5-10.



Kazalo:
l_{ml} - duljina mlaza,
ρ_{ml} - gustoća mlaza,
v_{ml} - brzina mlaza,
ρ_m - gustoća mete (metala) i
v_{pen} - brzina penetracije.

Slika 5-10. Penetracija mlaza konstantne brzine i duljine

Događaj se može jednostavnije prikazati u pokretnom koordinatnom sustavu koji se giba brzinom penetracije prikazanom na Slici 5-11.



Kazalo:
v_{ml} - brzina mlaza i
v_{pen} - brzina penetracije.

Slika 5-11. Penetracija mlaza konstantne brzine i duljine u pokretnom koordinatnom sustavu

U pokretnom koordinatnom sustavu profil penetracije je stacionaran, mlaz se giba udesno brzinom v_{ml}-$v_{pen,}$ a materijal mete ulijevo brzinom $v_{pen.}$ Tlak na obje strane između mlaza i mete mora biti jednak. S obzirom na izbor koordinatnog sustava događaj postaje stacionaran i može se prikazati u Bernoullijevom jednadžbom:

$$\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{ml}}(v_{\mathrm{ml}} - v_{\mathrm{pen}})^2 = \frac{1}{2}\rho_{\mathrm{m}} {v_{\mathrm{pen}}}^2 \tag{5-52}$$

Gdje je :

ρ_{ml} - gustoća mlaza (kg/m^3),
v_{ml} - brzina mlaza (m/s),
ρ_m - gustoća mete (metala) (kg/m^3) i
v_{pen} - brzina penetracije (m/s).

Pod pretpostavkom da se stacionarno stanje postiže trenutno i da prestaje kad zadnji dio mlaza duljine l_{ml} udari u metu, ukupna duljina penetracija l_p se može izraziti kao:

$$l_p = v_{\mathrm{pen}} t_{\mathrm{f}} = \frac{v_{\mathrm{pen}} l_{\mathrm{ml}}}{v_{\mathrm{ml}} - v_{\mathrm{pen}}} = l_{ml}\left(\frac{\rho_{ml}}{\rho_m}\right)^{1/2} \tag{5-53}$$

Gdje je :

l_p - duljina penetracije (m),
v_{ml} - brzina mlaza (m/s) i
v_{pen} - brzina penetracije.

Prema jednadžbi dubina penetracije ovisi o duljini mlaza i gustoći mete, a ne ovisi o brzini mlaza. U realnim slučajevima erozija mlaza i duljina izduljena mlaza ovise o brzini mlaza, a duljina mlaza je ovisna o vremenu. Modelom je stvaran proces pojednostavljen i vrijedi uz odgovarajuća ograničenja. Prvo ograničenje se odnosi na ukupnu duljinu penetracije. Prema teoriji proces penetracije završava kad posljednji dijelić mlaza udari u metu. U stvarnosti penetracija se nastavlja određeni period nakon tog trenutaka i naziva se sekundarna penetracija. Primarna penetracija također nije u potpunosti točno predviđena. Prema teoriji na dubinu penetracije utječe samo gustoća materijala mete, a u stvarnosti i druge značajke materijala utječu na dubinu penetracije. U prilog tome govori veća dubina penetracije u mekim čelicima u odnosu na pancirne čelike, iako im je gustoća jednaka. Treće ograničenje teorije odnosi se na utjecaj odmaka na dubinu penetracije. Dubina penetracije raste s porastom odmaka, a zatim opada, što teorijom nije obuhvaćeno.

5.1.5.2 Penetracija mlaza s nejednolikom brzinom

Duljina mlaza sa nejednolikom brzinom, kao što je to slučaj kod kumulativnih perforatora, nije konstantna već raste sa vremenom. Abrahamson i Goodier 1963. godine izvode eksplicitne formule za penetraciju kontinuiranih, ravnih mlazova, sa neuniformnom brzinom mlaza. Oni izvode formulu za penetraciju idealiziranog kumulativnog mlaza, koja služi kao teoretski maksimum. Kod analize uzimaju duljinu mlaza kao poznatu veličinu na određenoj udaljenosti od mete, ali ne uzimaju u obzir odnose između duljine mlaza i udaljenosti od punjenja. Ova činjenica njihove rezultate čini manje upotrebljivim pri praktičnoj primjeni (Zukas 1990).

Allison i Vitali su proširili teoriju slijedećim pretpostavkama i zaključcima:

a) ***Postojanje izvora.*** Brzina svake pojedinačne čestice mlaza ostaje skoro konstantna. Ako je prostorna distribucija brzine linearna, kao što je to slučaj sa većinom kumulativnih obloga sa konstantnom debljinom, onda se može locirati izvorna točka mlaza.

b) ***Zanemariva čvrstoća materijala.*** Čvrstoće materijala mlaza i mete mogu se zanemariti. Za opis završetaka penetracije sporim kretanjem zadnjeg dijela mlaza, definirana je minimalna brzina penetracije mlaza (v_{min}) .Brzina i procesi penetriranja u metu pri manjoj brzini, moraju zavisiti o čvrstoći materijala mlaza i mete.

c) ***Zanemariva stišljivost.*** Stišljivost nema većeg utjecaja u slučaju sličnosti između materijala mlaza i mete. Za materijale koji nisu slični, utjecaj stišljivosti treba uzeti u obzir. Harlow i Pracht potvrdili su ovaj zaključak u dvodimenzionalnoj simulaciji kumulativnih mlazova od željeza i aluminija koji probijaju mete sa sličnim materijalima. Dokazano je da se može zanemariti utjecaj stišljivosti kod penetracije mlaza u metu od sličnih materijala. Ukoliko se koristi meta od pleksiglasa ili sličnog materijala, koji se znatno razlikuje od materijala obloge, stišljivost se ne može zanemariti.

d) ***Simultani prekid***. Do prekida kumulativnog mlaza dolazi trenutno. Za konvencionalne eksplozivne naboje, gdje se čestice mlaza razdvajaju ili prekidaju u jednom vremenskom intervalu od vrha prema zadnjem dijelu, pretpostavka o istovremenom prekidu mlaza je, u najboljem slučaju, aproksimacija prvog reda. Pretpostavka pruža zadovoljavajuće rezultate za većinu konvencionalnih kumulativnih naboja. Alison i Vitali su predložili izraz za proračun penetracije u funkciji vremena za slučaj kad mlaz djeluje na metu prije prekida mlaza.

$$l_p(t) = v_0 t \left(\frac{t_0}{t}\right)^{y/(1+y)} - t_0 v_0 \tag{5-54}$$

gdje je:

$y = \sqrt{\rho_m/\rho_{\text{ml}}}$,

v_0 - brzina vrha mlaza prilikom nailaska na metu (m/s) i

t_0 - vrijeme nailaska vrha mlaza na metu (s).

e) ***Svaki prekinuti segment mlaza penetrira u metu poput neprekidnog mlaza***. Osnovna načela Eichelbergerove hidrodinamičke teorije penetracije temelje se na Bernoullijevoj jednadžbi i jednadžba kontinuiteta.

$$\frac{dl_p}{v_{\text{ml}}} = \frac{d\xi}{v_{\text{ml}} - v_{\text{pen}}} \tag{5-55}$$

gdje je:

$d\xi$ - inkrement duljine mlaza.

Principi koje su predložili Alison i Vitali predstavljaju osnovu za proračun penetracije mlaza u metu. DiPersio i Simon su na osnovi teorije Alisona i Vitalija predložili jednadžbe za različite slučajeve penetracije mlaza (DiPersio & Simon 1964).

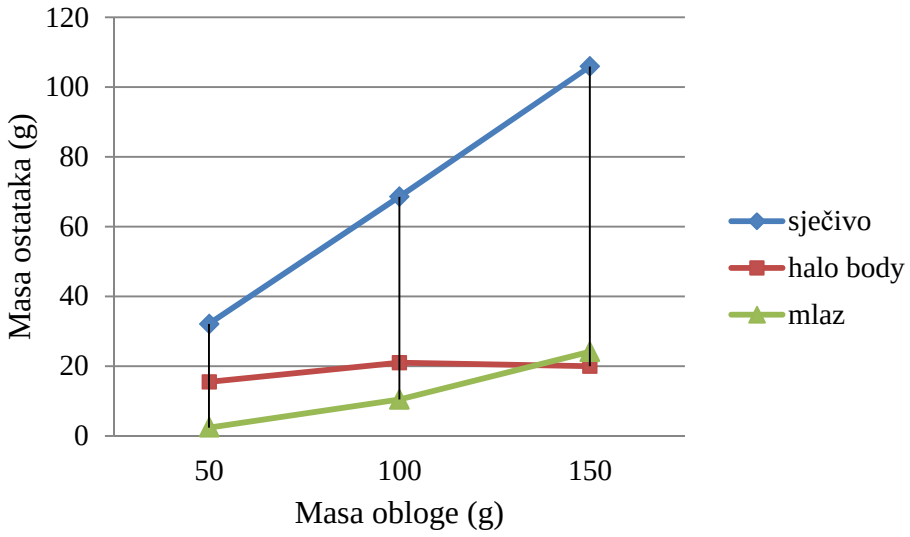
5.1.6 Teorija sječiva

U novije vrijeme iznose se teorije o djelovanju linearnih kumulativnih rezača koje objašnjavaju način djelovanja rezača na značajno drugačijem fizikalnom modelu. Osnova za teoriju je različito iniciranje te širenje udarnog detonacijskog vala u prostoru i u odnosu na oblogu. Detonacijski val kod konusnih perforatora djeluje u pravcu jedne osi, dok je kod linijskih kumulativnih rezača djelovanje detonacijskog vala je u dvije osi. Značajne su razlike i u obliku obloge između linijskih kumulativnih rezača i konusnih perforatora. Oblogu linijskih kumulativnih rezača čine dvije simetrične metalne površine pravilnog oblika koje međusobno zatvaraju kut od približno 90º. Kod konusnih perforatora obloga je ljevkastog oblika, a kut između izvodnica dvaju nasuprotnih strana konusa iznosi otprilike 60º.

Lim u svojim radovima (Lim 2005, Lim 2006) iznosi novu teoriju o načinu djelovanja linijskih kumulativnih rezača. U radovima se iznosi stajalište da se princip rezanja linijskog kumulativnog rezača ne zasniva na djelovanju mlaza, već rez nastaje kao posljedica djelovanja kinetičke energije sječiva na metu. Sječivo čine dvije međusobno nasuprotne plohe obloge koje su ubrzane i spojene uslijed djelovanja detonacijskog udarnog vala eksplozivnog naboja. Do svojih je zaključaka došao prilikom istraživanja načina djelovanja kumulativnih rezača na armirani beton, kad je primijetio ostatke u betonu u obliku sječiva. Na početku su

rezultati pripisani nepravilnom funkcioniranju rezača. Budući da su se rezultati ispitivanja sustavno ponavljali, autor ih je pokušao objasniti pomoću nove teorije načina funkcioniranja linijskih kumulativnih rezača.

Lim je otpucavao linijske kumulativne rezače u dva različita medija; pijesku i vodi. Nakon otpucavanja sakupljeni su ostaci obloge koji su s obzirom na postav ispitivanja bili minimalno poremećeni. Nakon otpucavanja, pregledavanjem ostataka metalne obloge, razdvojio je tri različite cjeline: sječivo, *halo body* (odvojeni donji dijelovi obloge u obliku traka) i ostaci mlaza. Masa sječiva, halo bodyja i mlaza nakon otpucavanja, u odnosu na prvobitnu masu obloge, prikazana je Slikom 5-12.



Slika 5-12. Masa sječiva, halo bodyja i mlaza nakon otpucavanja (Lim 2005)

Ispitivanja su provedena na komercijalnim linijskim kumulativnim rezačima i na kumulativnim rezačima vlastite izrade. Zaključci dobiveni istraživanjem:

- sječivo se tvori od dvije nasuprotne površine metalne obloge koji su međusobno spojene (zavarene),
- sječivo ima glavnu ulogu u procesu rezanja,
- nema izduljivanja i raspada sječiva,
- dio obloge koji sudjeluje u stvaranju mlaza ima malu masu, samim time i malu kinetičku energiju, i ne utječe bitno u procesu rezanja i
- odbačeni dijelovi u obliku trakica imaju značajnu masu i dimenzije u odnosu na ukupnu masu i dimenzije obloge, ali također nemaju utjecaj u procesu rezanja.

Na osnovi rezultata autor zaključuje bitne razlike u načinu djelovanja između linijskih kumulativnih rezača i konusnih perforatora.

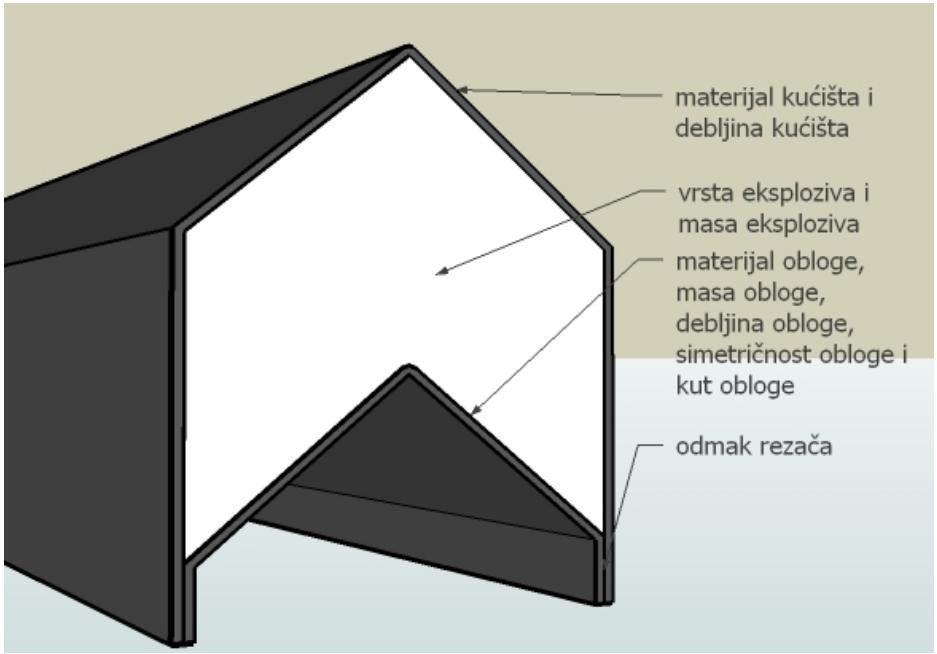
5.2 Utjecajni čimbenici

Većina autora su suglasni da sljedeći čimbenici imaju značajan utjecaj na učinak linijskih kumulativnih rezača:

- obloga kumulativnog prostora,
- eksplozivno punjenje,
- udaljenost kumulativnog rezača od ciljanog materijala,
- mjesto iniciranja i način iniciranja i
- kućište.

Značajan broj čimbenika koji utječu na učinkovitost linijskog kumulativnog rezača komplicira proces optimiziranja djelovanja linijskih kumulativnih rezača, budući da je u svrhu determiniranja utjecaja pojedinog čimbenika ispitivanja potrebno provesti uz nepromijenjenost ostalih, što multiplicira potreban broj ispitivanja. Iz tog se razloga, autori uglavnom bave proučavanjem utjecajem pojedinog čimbenika na učinkovitost kumulativnog naboja.

Shematski prikaz utjecajnih čimbenika prikazan je na Slici 5-13.



Slika 5-13. Čimbenici koji utječu na učinak linijskih kumulativnih rezača

5.2.1 Obloga linijskih kumulativnih rezača

Razmjerno najvažniji element kumulativnih naboja je obloga kumulativnoga prostora. Parametri povezani sa oblogom su materijal obloge i oblik obloge. Obloga služi kao izvor teških molekula koje se ubrzavaju energijom detonacije i usmjeravaju prema ciljanom materijalu (Barbour 1981). Masa ubrzanih molekula obloge povećava kinetičku energiju koja je zaslužna za nastajanje reza linijskih kumulativnih rezača. Oblogu kumulativnoga prostora nužno je uskladiti s masom eksploziva po jedinici duljine kumulativnoga rezača kako bi se dobio maksimalan učinak linijskog kumulativnog rezača. Najvažniji parametri obloge su materijal obloge i oblik obloge.

5.2.1.1 Materijal obloge

Materijal obloge kumulativnoga prostora izložen je ekstremno visokim naprezanjima, tlakovima i temperaturama u izrazito kratkom vremenskom razdoblju. U pravilu, ponašanje bilo kojeg materijala pri takvim uvjetima nije u potpunosti poznato. Ponašanje metala nakon djelovanja detonacijskoga udarnog vala eksploziva objašnjava se hidrodinamičkom teorijom i pretpostavka je da se metal ponaša kao fluid. Povijesno gledano za materijale obloge su se najviše koristili pojedini metali visoke gustoće.

Buc (Buc 1991) analizira različite vrste metala s obzirom na rasprostranjenost, proizvodnju, troškove, mehanička svojstva i mogućnost primjene za pojedini oblik kumulativnih naboja. Karakteristike analiziranih materijala dana su u Tablici 5-3.

Tablica 5-3. Karakteristike analiziranih materijala (Buc 1991)

	Grupa	Gustoća (g/cm^3)	Brzina zvuka (km/s)	Zapaljivost	Točka tališta (^oC)
Aluminij	III	2,71	6,4	Da	657
Bakar	I	8,9	4,7	Ne	1083
Zlato	I	19,3	3,2	Ne	1064
Molibden	VI	10,2	6,4	Ne	2610
Srebro	I	10,5	3,6	Ne	961
Tantal	V	16,6	4-4,5	Ne	2996
Volfram	VI	19,25	5,2	Ne	3410
Uranij	III	19,05	2,5-3	Da	1133
Cirkonij	IV	6,49	4,62	Da	1852

Held (Held 2001) analizira pojedine metale koji se primjenjuje za oblogu kumulativnog prostora na osnovi gustoće, brzine prolaza zvuka, maksimalne teoretske brzine primarnoga mlaza te umnoška brzine primarnoga mlaza i gustoće materijala. Na osnovi rezultata, metali su poredani od najboljega prema najlošijem s obzirom na mogućnost primjene za kumulativne naboje. Mogućnosti primjene različitih metala za oblogu kumulativnih naboja prikazana je u Tablici 5-4.

Tablica 5-4. Mogućnosti primjene različitih metala za oblogu kumulativnih naboja (Held 2001)

	Al	**Ni**	**Cu**	**Mo**	**Ta**	**U**	**W**
Gustoća (g/cm^3)	2,7	8,8	8,9	10	16,6	18,5	19,4
Brzina zvuka (km/s)	5,4	4,4	4,3	4,9	2,4	2,5	4
$v_{p\ maks}$ (km/s)	12,3	10,1	9,8	11,3	5,4	5,7	9,2
$v_{p\ maks}\sqrt{\rho_p}$	20,2	30	29,2	35,7	22	22	40,5
Poredak	**7**	**3**	**4**	**2**	**6**	**5**	**1**

Rezultati analize pokazuju da uz bakar, koji je najraširenija u primjeni, Volfram, Molibden i Nikal imaju dobra svojstva. Aluminij zauzima zadnje mjesto na listi zbog svoje male gustoće i mogućnosti postizanja maksimalne kinetičke energije. Rezultat je zanimljiv s obzirom da se aluminij nakon bakra najviše upotrebljava za oblogu linijskih kumulativnih rezača. Prema hidrodinamičkoj teoriji materijali koji se koriste za obloge moraju imati sljedeće karakteristike:

- visoku temperatura taljenja,
- veliku gustoća,
- izraženu duktilnost,
- ravnomjerna granulaciju, pravilnu orijentaciju zrna, pravilna duljinu zrna,
- visoku brzinu prolaza zvuka i
- visoku otpornost na dinamička naprezanja.

Ovim zahtjevima potrebno je pridružiti i zahtjeve koji se odnose na proizvodnju i upotrebu kumulativnih naboja, prema njima materijal treba biti:

- raspoloživ na tržištu,
- jeftin,
- jednostavan za proizvodnju i oblikovanje i
- ne smije biti toksičan.

Hidrodinamička teorija i primjena matematičkih modela nisu od značaja prilikom ispitivanju mogućnosti uvođenja novih materijala u upotrebu za oblogu kumulativnih rezača. Ograničenost matematičkih modela, te prisutna pojava prilagođavanja rezultata modela rezultatima empirijskih ispitivanja onemogućuje upotrebu matematičkih modela za zadovoljavajuće predviđanje utjecaja obloge na dubinu reza. Sugerira se primjena dinamičkih svojstava materijala te izrada modela koji će dinamička svojstva koristiti za ulazne parametre. Prilikom ispitivanja materijala pri visokim dinamičkim naprezanjima predlaže se primjena udarnih čekića s velikim visinama pada, koji bi vjernije prikazali utjecaj detonacije eksplozivnog punjenja na materijal (Doig 1998).

Sadašnje spoznaje u području linearnih rezača govore da metalna obloga može biti konstruirana od bilo kojeg relativno mekanog metala, a uobičajeno se koriste bakar, aluminij, olovo ili srebro. Bakar se najčešće koristi kod kumulativnih rezača s većim masama eksplozivnog punjenja. Aluminijske obloge koriste se kod zahtjeva na čistoću materijala u okolini reza kao i za rezanje materijala manje gustoće. Za manja fleksibilna punjenja koja se koriste za rezanje kružnih ili nepravilnih elemenata, zbog prilagođavanja oblika rezača rezanom elementu, koriste se obloge od olova.

Materijali s nižom temperaturom taljenja (olovo i kadmij) daju nešto slabiji učinak nego materijali s većom temperaturom taljenja. Druga povoljna osobina materijala je velika gustoća koja svakako povećava kinetičku energiju mlaza. Materijali s ovim karakteristikama ne moraju obavezno imati i visoku statičku izdržljivost. Dodatna poželjna karakteristika materijala je sitnozrnata struktura, s odgovarajućom orijentacijom zrna (Ćatović 2003).

Iako se za materijale obloge uglavnom koriste metali, zabilježeni su uspješni slučajevi upotrebe drugih materijala poput stakla, grafita pa čak i drveta balze.

5.2.1.2 Oblik obloge

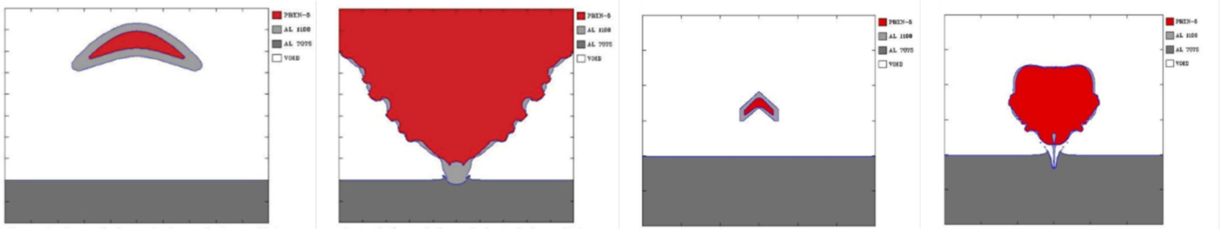
Oblik i geometrijske karakteristike kumulativnog prostora određuju karakteristike nastalog reza i namjenu rezača. Najčešće korišteni linearni kumulativni rezači imaju poprečni presjek kumulativnog prostora u obliku obrnutog V (Novotney & Mallery 2007). Oblik obloge se mijenjao kroz vrijeme usporedo sa razvijanjem različitih načina proizvodnje linijskih kumulativnih rezača i uvođenjem novih materijala u upotrebu. Prilikom odabira najpovoljnijeg oblika obloge kombinira se upotreba matematičkih kodova i računalnih programa čije rezultate je nužno potvrditi eksperimentom ili se koristi samo eksperiment. U drugom slučaju je potreban veći broj otpucavanja, ali su rezultati pouzdaniji.

S obzirom na poprečni presjek linearnog kumulativnog rezača, kumulativni prostor može imati sljedeće oblike:

- obrnuto V,
- obrnuto U,
- položeno D,
- W i
- oblik polukruga.

Obloga linijskih kumulativnih rezača, konstrukcijski gledano, može biti zaseban element izveden od materijala koji nije istovjetan kućištu kumulativnog rezača ili može biti istovjetan materijalu kućišta. Upotreba pojedinog modela ovisi o tehnologiji izrade linijskog kumulativnog rezača.

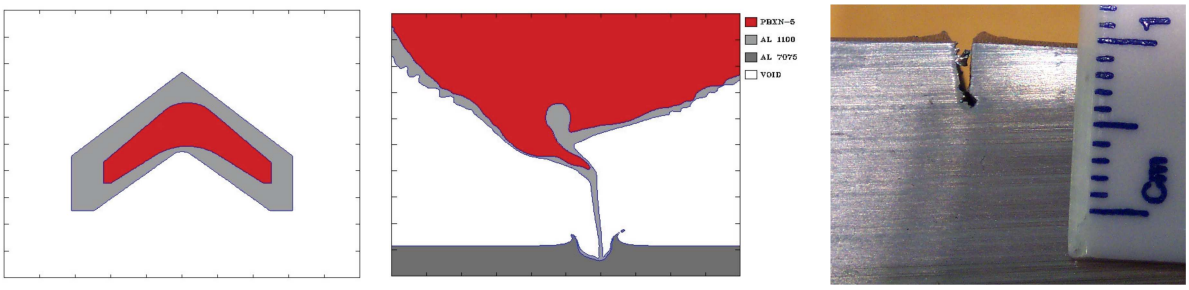
Utjecaj vršnog kuta kumulativnog prostora značajno utječe na dimenzije reza. Manje vrijednosti vršnog kuta kumulativnog prostora formiraju rez veće dubine i manje širine. Budući da se dubina reza zasniva na kinetičkoj energiji nužno je postići odnos mase i brzine s kojim će se postići najveća moguća kinetička energija. Utjecaj kuta kumulativnog prostora na karakteristike reza prikazani su na Slici 5-14.



Slika 5-14. Utjecaj kuta kumulativnoga prostora na karakteristike reza (Novotney & Mallery 2007)

Za proces uspješnog djelovanja kumulativnih naboja od iznimne je važnosti simetrija dvije polovice poprečnog presjeka s obzirom na centralnu os. Najmanja devijacija u odnosu na os linijskog kumulativnog naboja utjecat će na smanjivanje učinkovitosti. U praksi je nemoguće postići savršeno simetričan kumulativni naboj zbog ograničenja koja se odnose na proizvodni proces (Ayisit 2008). U pravilu je, kod proizvodnje obloge linijskih kumulativnih rezača vrlo malih i vrlo velikih dimenzija, teško postići zadovoljavajuću toleranciju.

Obloga mora biti ujednačene debljine i simetrična u odnosu na centralnu os. Vrlo male razlike u debljini obloge uzrokovati će nepravilnosti u rezu linijskih kumulativnih rezača. Utjecaj različite debljine obloge prikazan je na Slici 5-15.



Slika 5-15. Utjecaj različite debljine obloge (Novotney & Mallery 2007)

Rondot (Rondot 2007) je proveo ispitivanje kojemu je cilj bio objasniti zašto kumulativni rezači nisu prošli kvalifikacijski test za upotrebu prilikom odvajanja spremnika raketnog goriva za svemirsku letjelicu Ariane 5. Analiza je uključivala eksperimentalni dio i numeričku simulaciju. Rezultati su pokazali da bilo koji defekt u oblozi negativno utječe na rez linijskog kumulativnog rezača te da su nepravilnosti izraženije prilikom veće udaljenosti kumulativnog rezača od ciljanog materijala. Numeričke simulacije pokazuju da će nepravilnosti obloge u iznosu od 0,1 mm značajno utjecati na pravilnost reza linijskog kumulativnog rezača.

5.2.2 Eksplozivno punjenje

Za eksplozivno punjenje kumulativnih rezača uobičajeno se koriste eksplozivi koji imaju veliku brzinu detonacije i visok tlak detonacije (Zukas 1998). Kako se brzina metala ubrzanog eksplozivom može proračunati na osnovi Gurneyjevog modela u kojem su ulazni parametri masa eksploziva, masa metala i Gurneyjeva konstanta za pojedini metal, očito je da će brzina ubrzanog metala pri istim masenim odnosima metala i eksploziva ovisiti o Gurneyjevoj konstanti za pojedini eksploziv. Gurneyjeva konstanta je približno jednaka trećini brzine detonacije pojedinog eksploziva. Drugim riječima ukoliko se koristi eksploziv sa većom brzinom detonacije za punjenje linijskog eksplozivnog rezača, rezač će imati veću učinkovitost zbog veće postignute kinetičke energije ubrzanog metala.

Smatra se da eksplozivi s brzinom detonacije ispod 4500 m/s imaju znatno manji učinak i nisu pogodni za eksplozivno punjenje kumulativnih naboja (Barbour 1981). U Tablici 5-5. su navedeni pojedini eksplozivi koji se koriste kao eksplozivno punjenje kumulativnih naboja i njihova svojstva.

Tablica 5-5. Eksplozivi koji se koriste za eksplozivno punjenje kumulativnih naboja

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

Pored velike brzine detonacije i visokog tlaka detonacije eksploziv mora biti homogen (bez šupljina, mjehura i nečistoća), ujednačene granulacije te mora dobro prianjati uz stjenke kumulativnog rezača. Mjehurići i neprianjanje eksploziva uz stjenke kumulativnog rezača predstavlja oblik asimetrije koja negativno utječe na učinak. Pretpostavke je ispitivanjima potvrdio Ayisit (Ayisit 2008) koji je umjetno načinio mjehuriće zraka na jednom dijelu eksplozivnog punjenja. U drugoj ispitnoj konfiguracije je odvojio eksplozivno punjenje od kućišta kumulativnog naboja. U oba je slučaja primjetna devijacija primarnoga mlaza i maniji učinak kumulativnog naboja.

Uz navedena svojstva, eksploziv koji se koristi mora biti prilagođen postupku proizvodnje linijskih kumulativnih rezača. Prilikom izrade jednodijelnih rezača obično se koristi pentrit koji se preša u cijev, dok se kod višedijelnih rezača koriste različiti plastični eksplozivi tipa Semtex i C4 ili lijevani pentolit. Osim ovih eksploziva sa većom ili manjom uspješnosti su korištene i druge vrste eksploziva, primjerice emulzijski eksplozivi (Dobrilović et al 2009).

Budućnost razvoja linijskih kumulativnih rezača vezana je uz razvoj i pronalazak eksploziva koji mogu postići veće brzine detonacije od danas prisutnih eksploziva. Pored velike brzine detonacije ovi eksplozivi bi trebali biti pogodni za oblikovanje i sigurni za rad. Shekhar (Shekhar 2012) iznosi mogućnost primjene eksploziva čiji je osnovni sastojak Nitrometan (NM). Nitrometan (CH3NO2) u svom prirodnom stanju nije osjetljiv na inicijalni impuls RK 8, ali uz dodatak drugih tvari postaje eksploziv. NM s dodatkom od 5% do 6% amonijaka kao senzibilizatora čini eksploziv čija je energija oko 24 % veća od konvencionalnog TNT-a. Prednost ovih eksploziva je što su na sobnoj temperaturi u tekućem stanju, te mogu zauzeti bilo koji oblik kućišta i homogeno ga ispuniti. Ova prednost dolazi do izražaja u proizvodnji kumulativnih naboja. Iako postoje eksplozivi veće brzine detonacije tekuće stanje eksploziva baziranih na nitrometanu je velika prednost u odnosu na ostale eksplozive.

5.2.3 Iniciranje

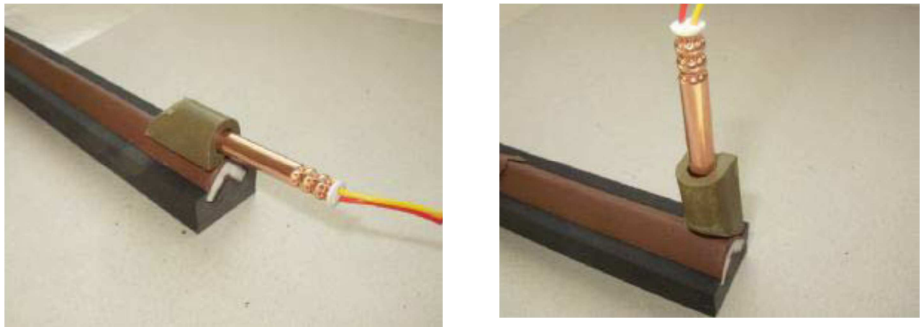
Za iniciranje linijskih kumulativnih rezača se najčešće koriste detonatori, koji mogu biti električni ili neelektrični. Nekad se dodatno uz detonator koristi i pojačnik. Pojedini proizvođači preporučuju upotrebu detonirajućeg štapina za iniciranje linijskog kumulativnog rezača.

U odnosu na linijski kumulativni rezač položaj detonatora može biti na jednom od krajeva, sredini ili se mogu koristiti dva detonatora u paru postavljeni na suprotne krajeve linijskog kumulativnog rezača. S obzirom na uzdužnu os linijskog kumulativnog rezača položaj detonatora može biti paralelan sa osi ili okomit na os.

Na Slici 5-23. prikazano je iniciranje linijskog kumulativnog rezača upotrebom detonatora koji je postavljen na kraju i sredini, paralelno i okomito u odnosu na uzdužnu os linijskog kumulativnog rezača, a na Slici 5-24. iniciranje linijskog kumulativnog rezača upotrebom detonatora i pojačnika paralelno i okomito na uzdužnu os.

a) detonator paralelan s osi b) detonator okomit na os

Slika 5-16. Iniciranje pomoću detonatora



c) pojačnik paralelan s osi d) pojačnik okomit na os

Slika 5-17. Iniciranje pomoću detonatora i pojačnika

Daniels (Daniels 2002) je ispitivanjima utvrdio kako položaj detonatora prilikom iniciranja utječe na oblik kumulativnog mlaza konusnih perforatora.

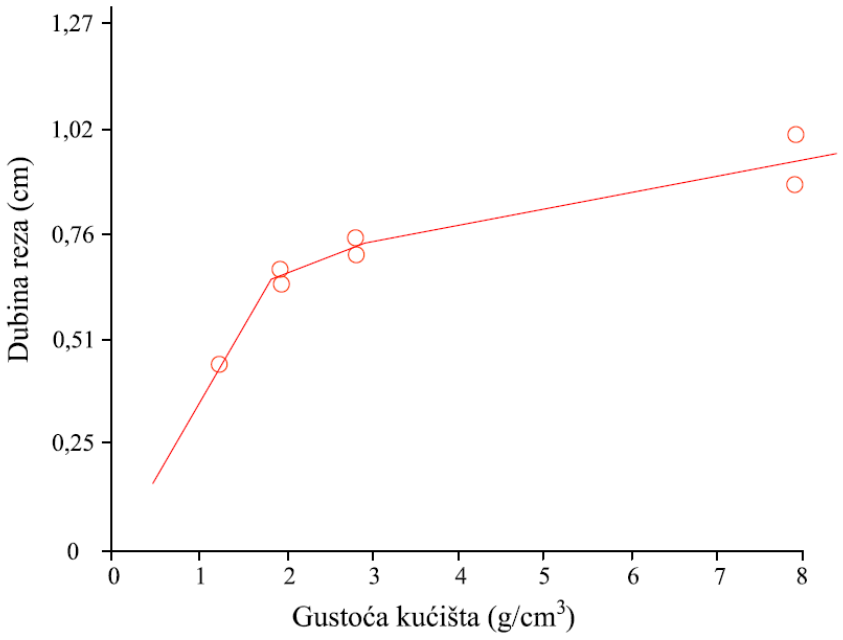
5.2.4 Kućište

Uloga kućišta je da dodatno usmjeri produkte detonacije u pravcu obloge linijskih kumulativnih rezača te da osigura nepromijenjen oblik rezača pri manipulaciji i upotrebi. U pravilu se za kućište izabiru materijali velike gustoće, niske cijene i pogodni s obzirom na način proizvodnje linijskih kumulativnih rezača (Vigil 1996). U minerskoj praksi poznata je činjenica da će eksplozivni naboj pokriven metalnom pločom s gornje strane imati veću učinkovitost od neprekrivenog eksplozivnog naboja. Ova činjenica se koristi prilikom konstrukcije linijskih kumulativnih rezača. (Akštein & Riha 2004). Na primjeru Gurneyevog modela vidljivo je da će brzina ubrzanog metala biti veća kod zatvorenog simetričnog sustava u odnosu na otvoreni simetrični sustav.

S obzirom na način proizvodnje linijskih kumulativnih rezača i upotrebu kućišta razlikujemo tri oblika linijskih kumulativnih rezača:

- linijski kumulativni rezači bez kućišta,
- linijski kumulativni rezači kod kojih kućište i obloga čine cjelinu i izrađeni su od istog materijala i
- linijski kumulativni rezači kod kojih je kućište izrađeno kao poseban dio, materijal kućišta se u pravilu razlikuje od materijala obloge.

S porastom gustoće kućišta povećava se učinkovitost linijskih kumulativnih rezača. Utjecaj gustoće materijala kućišta na dubinu nastalog reza u aluminiju prikazan je na Slici 5-31.

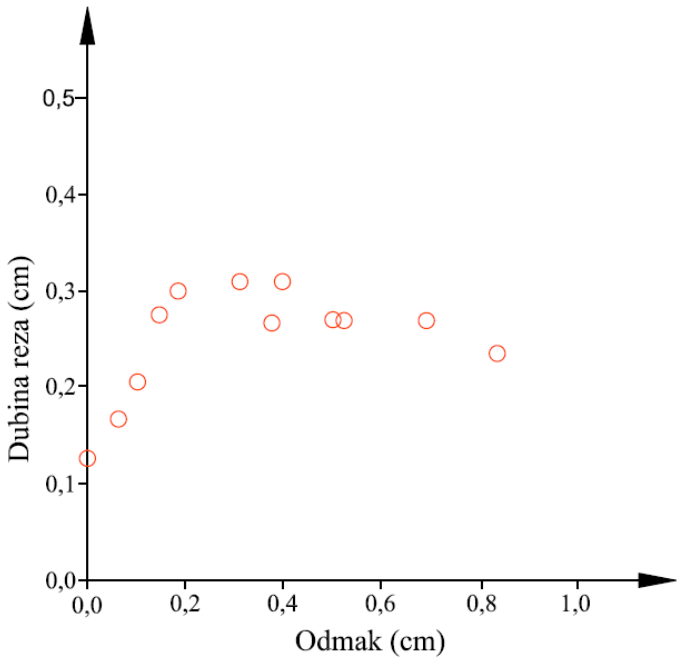


Slika 5-18. Utjecaj gustoće materijala na dubinu reza (Vigil & Marchi 1994)

5.2.5 Udaljenost od ciljanoga materijala

Udaljenost kumulativnog naboja od materijala na koji se djeluje (*engl. stand-off distance*) je čimbenik koji utječe na karakteristike reza kumulativnog naboja. Odmicanjem rezača od obratka postiže se optimalna udaljenost na kojoj mlaz djeluje na obradak. Učinak rezača se poboljšava do određene udaljenosti, koju nazivamo optimalnom, a nakon te udaljenosti opada zbog slabljenja mlaza i pojave raspadanja mlaza. Optimalna udaljenost rezača uvjetovana je geometrijskim značajkama konstrukcije rezača, vršnim kutom i širinom rezača uz stalne karakteristike materijala na koji se djeluje, jednakog eksplozivnog punjenja i karakteristika obloge kumulativnog rezača. Rezači jednakih geometrijskih karakteristika, jednake mase eksplozivnog punjenja imaju različiti učinak na istoj udaljenosti od obradka, što znači da je optimalna udaljenost različita za pojedine materijale obloge. Posljedica je to različita odnosa mase eksploziva i mase metala pri upotrebi iste mase punjenja, iste geometrije obloge i materijala obloge koji imaju različitu gustoće.

Na Slici 5-32. grafički je prikazan odnos dubine reza i odmaka kumulativnog rezača od mete.

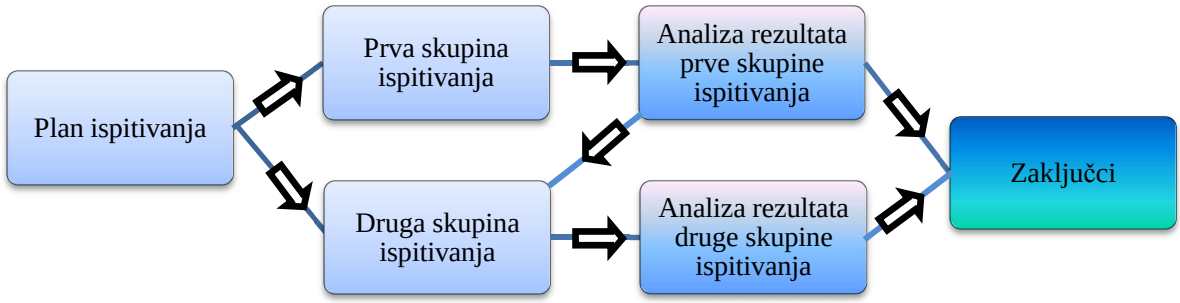


Slika 5-19. Odnos dubine reza i odmaka kumulativnog rezača od mete (Vigil 1996)

Prilikom prodaje linijskih kumulativnih rezača proizvođač deklarira optimalni odmak od rezača i minimalnu dubinu reza pri tom odmaku za pojedine materijale. Uobičajeno se navode podaci za dubinu u čeliku i aluminiju poznatih fizičko-mehaničkih svojstava. Optimalna udaljenost se određuje eksperimentalnim putem ili uz pomoć računalnih programa uz naknadnu eksperimentalnu verifikaciju rezultata

6 Ispitivanja i analiza ispitivanja

Planom ispitivanja različite vrste ispitivanja grupirane su u dvije skupine u skladu sa pregledom dosadašnjih ispitivanja. Plan ispitivanja shematski je prikazan Slikom 6-1.



Slika 6-1. Plan ispitivanja

Cilj prve skupine ispitivanja je prikupljanje informacija o načinu formiranja kumulativnog efekta, načinu djelovanja linijskog kumulativnog rezača, brzini mlaza i iznosu tlaka kojim mlaz djeluje na metu, dok je druga skupina ispitivanja usmjerena ka određivanju utjecaja pojedinih čimbenika na učinkovitost linijskih kumulativnih rezača. Nakon završetka ispitivanja pojedinih skupina, rezultati ispitivanja su obrađeni i analizirani. Analizom rezultata prve skupine istraživanja dobiveni su podaci koji su služili kao smjernice za kvantificiranje utjecajnih čimbenika ispitivanih drugom skupinom ispitivanja. Iz analize rezultata obje skupine ispitivanja proizišli su zaključci o načinu formiranja kumulativnog mlaza, načinu djelovanja linijskih kumulativnih rezača i utjecaju pojedinih čimbenika na dubinu reza linijskih kumulativnih rezača. Ispitivanja su izvedena u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari RGN fakulteta i na ispitnom poligonu laboratorija.

S obzirom da su ispitivanja izvedena sa uzorcima (linijskim kumulativnim rezačima) vlastite izrade, prije početka ispitivanja, bilo je nužno konstruirati i izraditi linijske kumulativne rezače te validirati mogućnost njihove primjene.

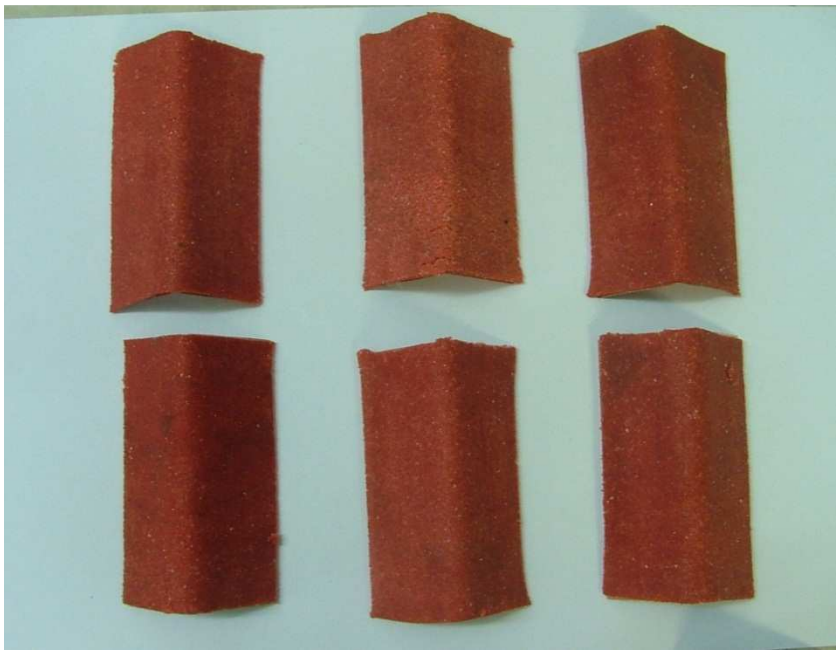
6.1 Ispitni uzorci

Postupak izrade ispitnih uzoraka uključivao je: određivanje konstrukcijskih parametara, izbor prikladnog eksploziva za eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača, izbor materijala obloge, debljine obloge i kuta obloge. Linijski kumulativni rezači vlastite izrade korišteni su zbog:

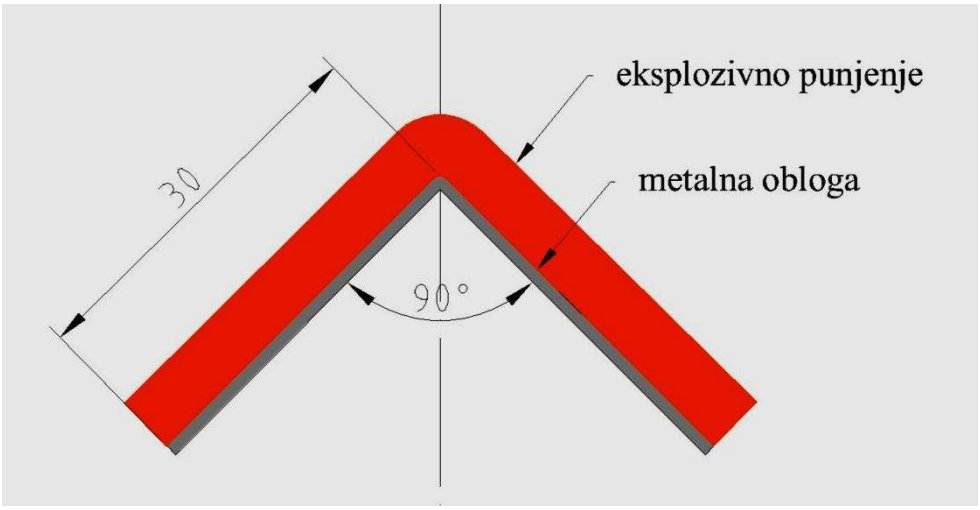
- jednostavnosti izrade,
- relativno niske cijene u usporedbi s visokom cijenom komercijalnih linijskih kumulativnih rezača,
- velikog broja uzoraka potrebnih za ispitivanje,
- potrebe izmjene i podešavanja konstrukcijskih utjecajnih čimbenika linijskog kumulativnog rezača; mase obloge, debljine obloge, *M/C* odnosa i udaljenosti linijskog kumulativnog rezača od ciljanog materijala,
- mogućnosti prilagođavanja eksplozivnog punjenja i dimenzija linijskih kumulativnih rezača obliku i dimenzijama materijala i
- u RH nema proizvođača ili uvoznika linijskih kumulativnih rezača.

6.1.1 Konstrukcija ispitnih uzoraka

Ispitni uzorci linijskih kumulativnih rezača izrađeni su u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari, Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta. Obloga linijskih kumulativnih rezača izrađena je iz bakrenoga ili aluminijskoga lima debljine od 0,5 mm do 2 mm, strojno savijenog pod određenim kutom. Na oblogu je postavljen eksploziv u obliku traka različite debljine i mase. Trake eksploziva izrađene su primjenom uređaja za valjanje. Na taj način osigurana je ujednačena debljina i masa eksplozivnog punjenja po jedinici površine poprečnog presjeka. Za eksplozivno punjenje kumulativnih rezača korišten je plastični eksploziv na bazi pentrita i polimernoga veziva. Odabrani eksploziv ima veliku brzinu i tlak detonacije, te se lako oblikuje što ga svrstava u eksplozive pogodne za eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača. Na Slici 6-2. prikazani su ispitni uzorci linijskih kumulativnih rezača, a na Slici 6-3. prikazan je poprečni presjek s osnovnim dimenzijama. Karakteristike eksplozivnog punjenja dane su u poglavlju 6.1.2, a karakteristike obloge u poglavlju 6.1.3.



Slika 6-2. Linijski kumulativni rezači



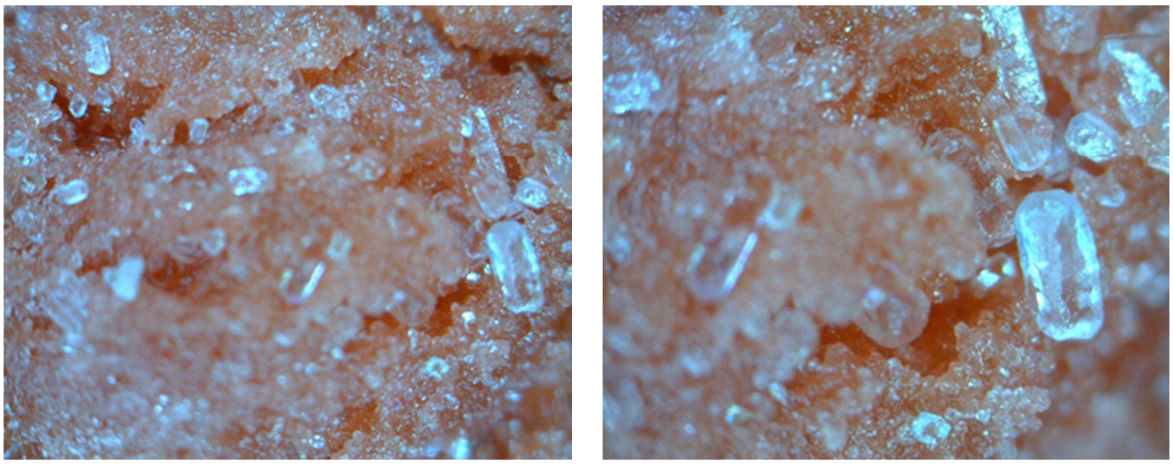
Slika 6-3. Poprečni presjek linijskog kumulativnoga rezača

Ispitni uzorci rezača izvedeni su bez kućišta što je i osnovna razlika u odnosu na komercijalne rezače. Smatra se da su fizikalni procesi koji vrijede za rezače s kućištem istovjetni onima kod rezača bez kućišta. Pri istraživanju linijskih kumulativnih rezača ova ili slična izvedba je često u upotrebi (Bohanek 2011, Lim 2006, Sućeska et al. 2005, Nariman-Zadeh et al. 2001).

6.1.2 Eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača.

Za eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača izabran je plastični eksploziv koji se sastoji od pentrita i neeksplozivnog plastifikatora koji služi kao vezivni materijal. Pentrit (PETN, pentaerythrol tetranitrate) je vrlo stabilan, netopljiv u vodi, djelomično topljiv u alkoholu i topljiv u acetonu. Koristi se kao eksplozivno punjenje detonirajućih štapina i za sekundarno punjenje detonatora. Može se flegmatizirati dodavanjem manje količine voska i prešati za eksplozivna punjenja manjih projektila (Meyer 1997).

Na Slici 6-4. prikazana je struktura eksploziva povećana 90 puta i 150 puta, a na Slici 6-5. kristal pentrita povećan je 500 puta. Slike su snimljene pomoću digitalnih mikroskopa Dyno Lyte.



Povećanje 90 puta Povećanje 150 puta

Slika 6-4. Struktura eksploziva povećana 90 i 150 puta

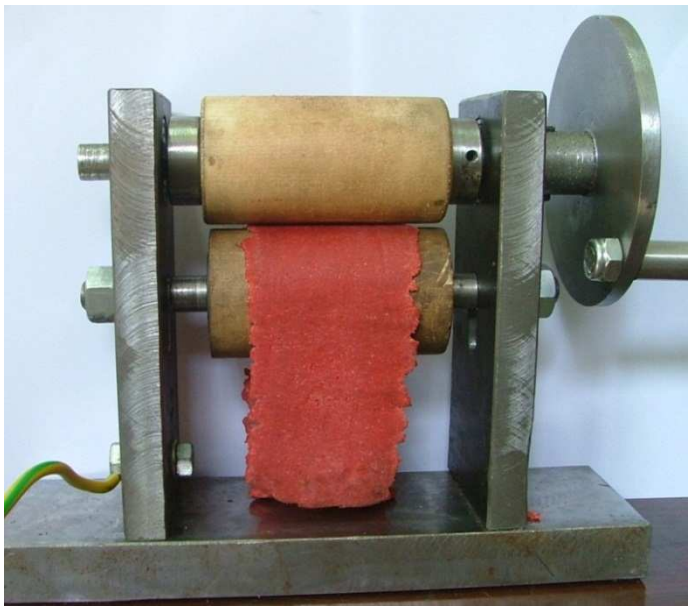
Povećanje 500 puta

Slika 6-5. Kristal pentrita povećan 500 puta

Plastični eksplozivi se lako mogu oblikovati u željeni oblik, a moguće ih je dobaviti u obliku listova. Punjenje ispitnih uzoraka izrađeno je iz traka eksploziva valjanih na uređaju

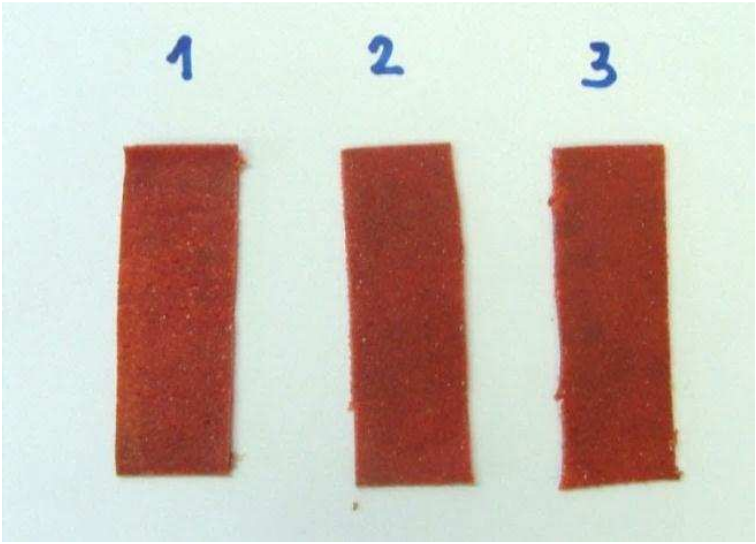
vlastite konstrukcije i izvedbe. Uređaj se sastoji od dva rotirajuća drvena valjka. Pomicanjem jednog od valjaka moguće je podesiti debljinu valjanja. Točnost debljine traka kontrolirana je pomičnim mjerilom.

Uređaj je prikazan Slikom 6-6., a poprečni presjek uređaja dan je u prilogu broj 1.



Slika 6-6. Uređaj za valjanje eksploziva

Iz valjane trake određene debljine, izrezivane su manje trakice. Trakice eksploziva dimenzija 90 mm x 30 mm i debljine 2 mm prikazane su na Slici 6-7.

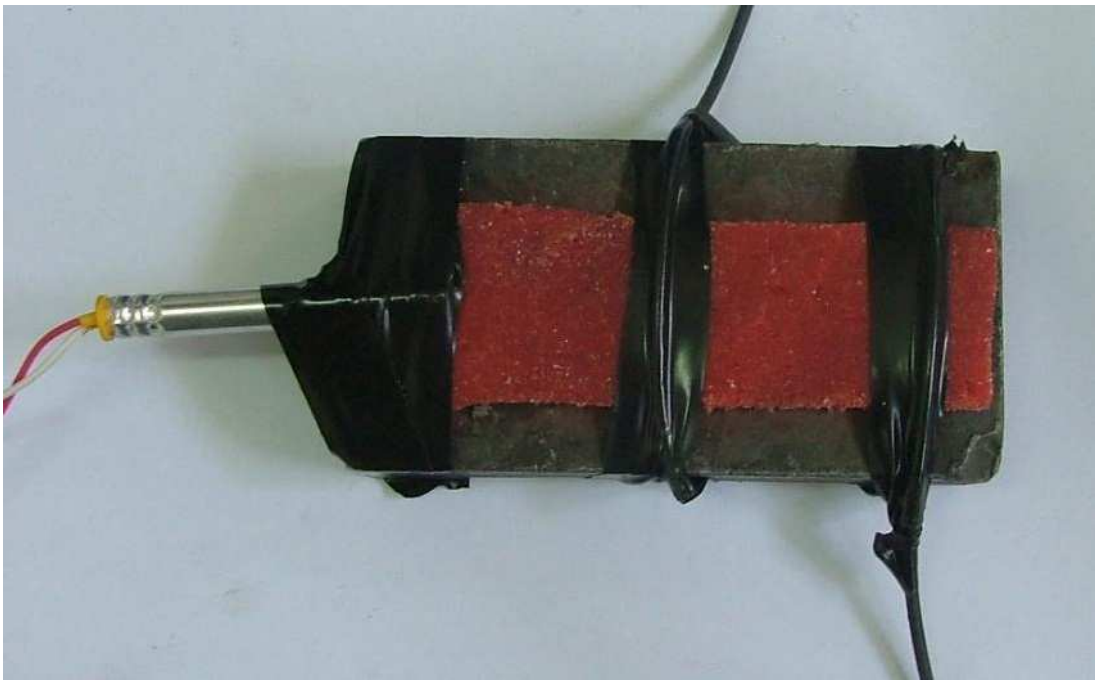


Slika 6-7. Trakice eksploziva

6.1.2.1 Brzina detonacije eksplozivnog punjenja

Brzina detonacije eksploziva je bitan parametar za ocjenu mogućnosti primjene eksploziva za eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača. Prema Gurneyju i drugim autorima, s porastom brzine detonacije eksploziva raste brzina ubrzane metalne obloge. Eksploziv namijenjen za eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača oblikovan je u trakice debljine 2 mm, 4 mm i 8 mm na kojima je izmjerena brzina detonacije. Brzina detonacije eksploziva mjerena je u skladu sa normom HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu-Jaki eksplozivi-14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2003). Brzine detonacije eksplozivnog punjenja mjerene su elektrooptičkom metodom elektroničkim satom "Explomet - Fo". Uređaj bilježi trenutak pojave svjetlosnog signala koji se svjetlovodima dovodi kronometru. Svjetlovodi se postavljaju na poznatoj međusobnoj udaljenosti iz koje se proračunava brzina detonacije eksploziva za izmjereni vremenski interval. Najveća brzina koju uređaj može mjeriti je 10 000 m/s, vremenski interval između 0,1 μs do 10 s, s točnosti od ± 0,1 μs.

Svjetlovodi su postavljeni na razmaku od 40 mm. Postav mjerenja brzine detonacije eksploziva prikazan je na Slici 6-8.

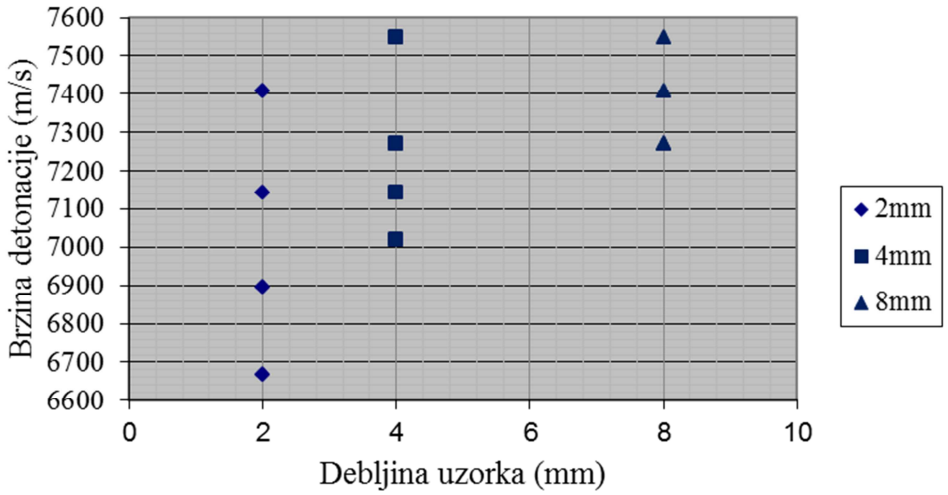


Slika 6-8. Postav mjerenja brzine detonacije eksploziva

Rezultati mjerenja brzine detonacije dani su Tablicom 6-1., a grafički prikaz rezultata mjerenja brzine detonacije Slikom 6-9.

Tablica 6-1. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva

Redni broj	Debljina uzorka (mm)	Duljina uzorka (mm)	Širina uzorka (mm)	Masa uzorka (g)	Razmak između sondi (mm)	Izmjerene vrijeme (µs)	Brzina detonacije (m/s)	Srednja vrijednost (m/s)
1	2	90	30	8,32	40	5,8	6896	7028
2	2	90	30	8,4	40	5,6	7142	
3	2	90	30	8,36	40	6	6667	
4	2	90	30	8,28	40	5,4	7407	
5	4	90	25	15,52	40	5,5	7272	7245
6	4	90	25	15,55	40	5,7	7018	
7	4	90	25	15,58	40	5,6	7142	
8	4	90	25	15,46	40	5,3	7547	
9	8	90	15	16,65	40	5,4	7407	7375
10	8	90	15	16,67	40	5,5	7272	
11	8	90	15	16,63	40	5,3	7547	
12	8	90	15	16,71	40	5,5	7272	



Slika 6-9. Grafički prikaz rezultata mjerenja brzine detonacije eksploziva.

6.1.2.2 Analiza rezultata mjerenja brzine detonacije eksplozivnog punjenja

Prilikom mjerenja brzine detonacije eksploziva otpucano je tri puta po četiri uzorka debljina 2 mm, 4 mm i 8 mm. Srednja vrijednost brzine detonacije eksploziva, uz mjernu nesigurnost metode (± 65 m/s), za pojedine debljine uzorka iznosi:

- za uzorak debljine 2 mm iznosi 7028 m/s,
- za uzorak debljine 4 mm iznosi 7245 m/s i
- za uzorak debljine 8 mm iznosi 7375 m/s.

Najniža izmjerena brzina svih mjerenja je zabilježena kod uzorka debljine 2 mm i iznosi 6667 m/s, a najveća izmjerena brzina je kod uzoraka debljine 4 mm i 8 mm i iznosi 7547 m/s. Iz izmjerenih rezultata i grafičkog prikaza rezultata mjerenja može se zaključiti da brzina detonacije eksploziva raste s porastom debljine trakice eksploziva. Prisutno rasipanje rezultata mjerenja je najveće kod uzoraka debljine 2 mm, a najmanje kod uzoraka debljine 8 mm.

Priprema uzoraka za mjerenje brzine detonacije eksploziva poslužila je i za validaciju uređaja za valjanje eksploziva. Nakon izrezivanja trakicama je izmjerena masa. Usporedbom mase trakica istih dimenzija vidljivo je da je najveće odstupanje mase trakice od srednje vrijednosti za pojedinu debljinu trakice vrlo malo i iznosi:

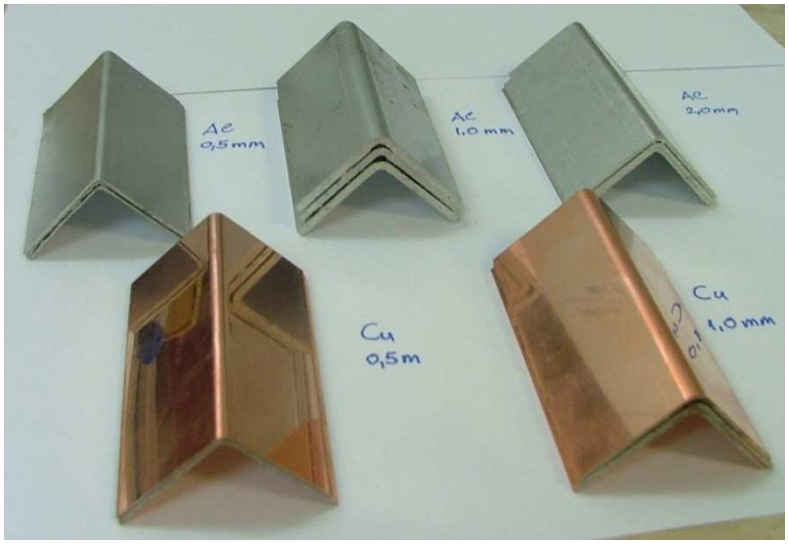
- za trakice debljine 2 mm iznosi 0,06 g ili 0,7 % od srednje mase uzorka (standardna devijacija $\sigma = 0,052$),
- za trakice debljine 4 mm iznosi 0,07 g ili 0,5 % od srednje mase uzorka (standardna devijacija $\sigma = 0,051$) i
- za trakice debljine 8 mm iznosi 0,05 g ili 0,3 % od srednje mase uzorka (standardna devijacija $\sigma = 0,034$).

U sva tri slučaja odstupanja su mala, odnosno ispod 1 % mase uzorka. S obzirom da su dimenzije uzorka i masa trakica eksploziva ujednačene, može se reći da je uređaj za valjanje eksploziva konstruiran i izrađen na zadovoljavajući način sukladno zahtjevima za pripremu uzorka.

Prema vrijednostima izmjerene brzine detonacije eksploziva, mogućnosti oblikovanja eksploziva, malih odstupanja dimenzija i masa trakica može se zaključiti da eksploziv zadovoljava zahtjeve za eksplozivno punjenje linijskih kumulativnih rezača.

6.1.1 Materijal obloge

Za izradu obloge linijskih kumulativnih rezača izabrani su bakreni i aluminijski limovi. Bakar i aluminij se najčešće koriste za izradu obloge komercijalnih kumulativnih linijskih rezača. Obloge debljine 0,5 mm, 1 mm i 2 mm, strojno su savijene pod kutom od 90°. Cu-i Al-obloge različitih debljina prikazane su na Slici 6-10.



Slika 6-10. Cu- i Al-obloge različitih debljina

Za Cu-oblogu odabran je Cu-lim visoke čistoće pod oznakom SF-Cu. Kemijski sastav prema deklaraciji proizvođača čini 99,9% Cu, a udio fosfora P je manji od 0,02%. Gustoća materijala je 8,94 g/cm^3. Proizvođač je deklarirao odstupanje u debljini lima u skladu s normom HRN EN 1652:2002/AC:2007 Bakar i bakrene legure – ploče limovi trake i rondele opće namjena. Odstupanja su navedena u Tablici 6-2.

Tablica 6-2. Odstupanje u debljini Cu-lima prema deklaraciji proizvođača

Debljina lima (mm)	Odstupanje (mm)
0,1-0,2	0,018
0,2-0,3	0,022
0,3-0,4	0,025
0,4-0,5	0,030
0,5-0,8	0,040
0,8-1,2	0,050
1,2-1,8	0,060
1,8-2,5	0,070

Aluminijski lim je izrađen od legure aluminija 1050 H14, gustoće 2,71 g/cm^3. Odlikuje se visokom otpornosti na koroziju, visokom duktilnošću i visokim sjajem. Kemijski sastav legure dan je u Tablici 6-3.

Tablica 6-3. Kemijski sastavlegure1050

Element	Udio (%)
Al	min 99,5
Cu	0,012
Mn	0,021
Mg	0,0007
Si	0,082
Fe	0,3567
Zn	0,009
Ti	0,0219

Oznaka H14 odnosi se na način izrade limova i mehaničke karakteristike lima. Mehaničke karakteristike za leguru 1050H14 su dane u Tablici 6-4.

Tablica 6-4. Mehaničke karakteristike legure 1050H14

Svojstvo	Vrijednost
Granica razvlačenja	80 MPa
Vlačna čvrstoća	100 MPa
Izduljenje	12%
Posmična čvrstoća	60 MPa
Tvrdoća po Vickersu	30 HV

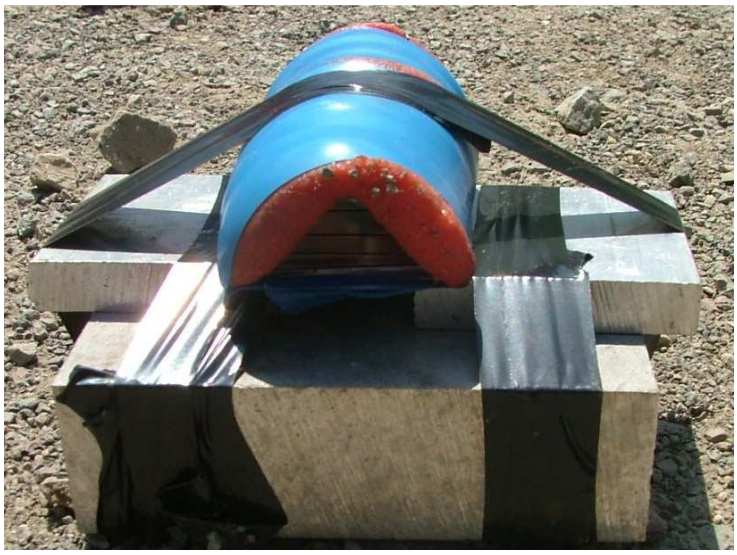
6.2 Prva skupina ispitivanja

Teorije i modeli koji opisuju nastajanje i djelovanje kumulativnog mlaza uglavnom se odnose na konusne perforatore, ali se primjenjuju i za linijske kumulativne rezače, budući da se smatra da su procesi formiranja oba efekta temeljeni na istim fizikalnim principima. Razlike u obliku i konstrukciji konusnih perforatora i linijskih kumulativnih rezača upućuju i na različitost njihovog djelovanja, odnosno na specifičnosti linijskih kumulativnih rezača. Prva skupina ispitivanja ima za cilj prikupljanje informacija o ponašanju materijala obloge pod djelovanjem detonacijskog vala eksplozivnog punjenja i interakciji ubrzane obloge pri udaru u ciljani materijal-metu. Ispitivanja prve skupine obuhvaćaju:

a) snimanje linijskog kumulativnog efekta brzom kamerom,
b) određivanje promjene mase mete prije i nakon djelovanja kumulativnih rezača,
c) promatranje oblika i stanja obloge linijskog kumulativnog rezača nakon detonacije eksplozivnog punjenja,
d) mjerenja brzine mlaza linijskog kumulativnog rezača i
e) mjerenje tlaka mlaza na različitim materijalima mete.

6.2.1 Snimanje brzom kamerom

Za potrebe ispitivanja konstruirani su linijski kumulativni rezači s oblogom kumulativnog prostora izrađenom od Cu-lima debljine 1 mm, kutom obloge od 90º i masom 44 g. Duljina rezača je 80 ± 1 mm. Eksploziv u obliku traka debljine 9 mm postavljen je na kutni profil, odnosno oblogu. Masa eksplozivnog punjenja iznosi 50 ± 1 g. Izvedenom konstrukcijom rezača osiguran je konstantan kut obloge, debljina obloge i simetrija obloge. Rezač je postavljen na aluminijsku metu, debljine 30 mm. Za postizanje odmaka između mete i linijskog kumulativnog rezača korištene su aluminijske pločice debljine 10 mm. Uzorak prije otpucavanja prikazan je na Slici 6-11.



Slika 6-11. Uzorak prije otpucavanja

Za snimanje detonacije linijskog kumulativnog naboja korištena je brza kamera "Mrel Blasters Troubleshooter" namijenjena za snimanje i računalnu analizu miniranja. Po svojoj izvedbi i načinu rada pripada u digitalne videokamere, a snimljene podatke pohranjuje na elektronički medij, u ovom slučaju memorijsku karticu. Budući da kamera ima mogućnost vremenske rezolucije snimanja do 16000 fps-a (slika u sekundi), njome je moguće snimiti sve probleme vezane uz pomak i odbacivanje odminiranog stjenskog materijala.

Osnovni dijelovi kamere su:

- elektronički sklop kamere sa digitalnim zaslonom,
- objektiv i
- baterija za napajanje kamere električnom energijom.

Elektronički sklop kamere je zaštićen aluminijskom oplatom, te je osmišljen za rad na terenu. Kućište kamere, kao i sva sučelja i priključci zatvorene su konstrukcije, kako bi bili otporni na prašinu i vlagu (Blasters Operation Manual Edition 1.6). Objektiv raspolaže žarišnim duljinama u rasponu od 16 do 160 mm. Brza kamera "Mrel Blasters Troubleshooter" prikazana je Slikom 6-12.

Slika 6-12. Brza kamera "Mrel Blasters Troubleshooter" (Blasters MAS Operation Manual)

Okidač kamere je elektroničke izvedbe što omogućuje veliku brzinu okidanja, odnosno kratko vrijeme ekspozicije. Međutim, što su vremena ekspozicije kraća, to je potrebna više svjetla za snimanje. Za snimanje kvalitetne, razlučive slike bez zamućenja, potrebno je podesiti optimalni odnos između brzine promatrane pojave i količine raspoloživog svjetla, kao i odabir načina snimanja na danjem ili umjetnom svjetlu. Odnos brzine okidača i vremena ekspozicije dane su u Tablici 6-5.

Tablica 6-5. Odnos brzine okidača i vremena ekspozicije (Blasters Operation Manual Edition 1.6)

faktor povećanja brzine okidača	broj slika u sekundi (fps)					
	50	60	125	250	500	1000
	vrijeme ekspozicije (s)					
1	0.0200	0.0167	0.00800	0.00400	0.002000	0.001000
2	0.0100	0.0083	0.00400	0.00200	0.001000	0.000500
3	0.0067	0.0056	0.00267	0.00133	0.000667	0.000333
4	0.0050	0.0042	0.00200	0.00100	0.000500	0.000250
5	0.0040	0.0033	0.00160	0.00080	0.000400	0.000200
10	0.0020	0.0017	0.00080	0.00040	0.000200	0.000100
20	0.0010	0.0008	0.00040	0.00020	0.000100	0.000050

Prilikom snimanja su korištena dva postava kamere. U prvom postavu snimanja, broj snimljenih slika u sekundi iznosi 125, a vrijeme između pojedine zabilježene slike je 0,008 s

U drugom postavu snimanja broj slika u sekundi je 1000, a vremenski razmak između slika 0,001 s. Fotografije izdvojene iz snimke prikazane su na Slici 6-13, a sve fotografije pojedine snimke su dane u prilogu broj 1 i prilogu broj 2.

Slika 6-13. Fotografije izdvojene iz snimke kamere

6.2.2 Određivanje promjene mase mete

Prilikom nailaska mlaza na metalnu metu dolazi do bočnog razmicanja metala mete uslijed djelovanja visokog tlaka ubrzanog materijala obloge. Rezanje metala linijskim kumulativnim rezačima, razlikuje se od ostalih vrsta rezanja jer ne dolazi do gubitka materijala nakon rezanja, odnosno masa materijala mete prije i nakon rezanja je jednaka. Korištena je obloga od aluminija debljine 2 mm, masa eksplozivnog punjenja je iznosila 20 ± 1 g, a duljina rezača 80±1 mm.

Izabrani materijali mete su čelik i aluminij koji se znatno razlikuju u gustoći. Dimenzije čeličnih meta iznosile su 100 mm x 50 mm x 20 mm, a masa približno 800g. Dimenzije aluminijskih meta iznosile su 100 mm x 50 mm x 30 mm, a masa približno 400 g. Metama je izmjerena masa prije i nakon otpucavanja linijskog kumulativnog rezača.

Karakteristični rezovi nastali na čeličnoj i aluminijskoj meti su prikazani Slikom 6-14. Rezultati ispitivanja dani su u tablicama 6-6. i 6-7. Na slikama od 6-15. do 6-17. dan je grafički prikaz rezultata ispitivanja.

Rez u čeličnoj meti

Rez u aluminijskoj meti

Slika 6-14. Rezovi u čeličnoj i aluminijskoj meti

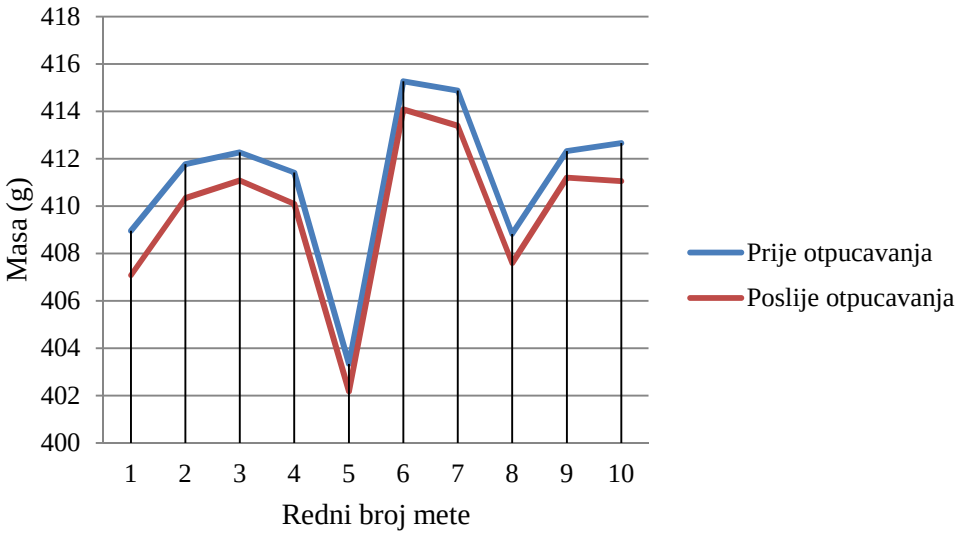
Tablica 6-6. Rezultati ispitivanja za čeličnu metu

Meta br.	Masa eksplozivne tvari (g)	Meta	Masa mete prije otpucavanja (g)	Masa mete poslije otpucavanja (g)	Razlika masa (g)	Razlika masa (%)
1	20,06	Č	802,85	801,61	1,24	0,15
2	20,06	Č	822,8	821,48	1,32	0,16
3	20,08	Č	814,19	812,43	1,76	0,22
4	20,09	Č	819,21	818,13	1,08	0,13
5	20,06	Č	841,65	840,62	1,03	0,12
6	20,05	Č	823,2	822,22	0,98	0,12
7	20,06	Č	828,43	827,06	1,37	0,17
8	20,08	Č	818,87	817,75	1,12	0,14
9	20,09	Č	787,75	786,7	1,05	0,13
10	20,09	Č	845,43	843,22	2,21	0,26

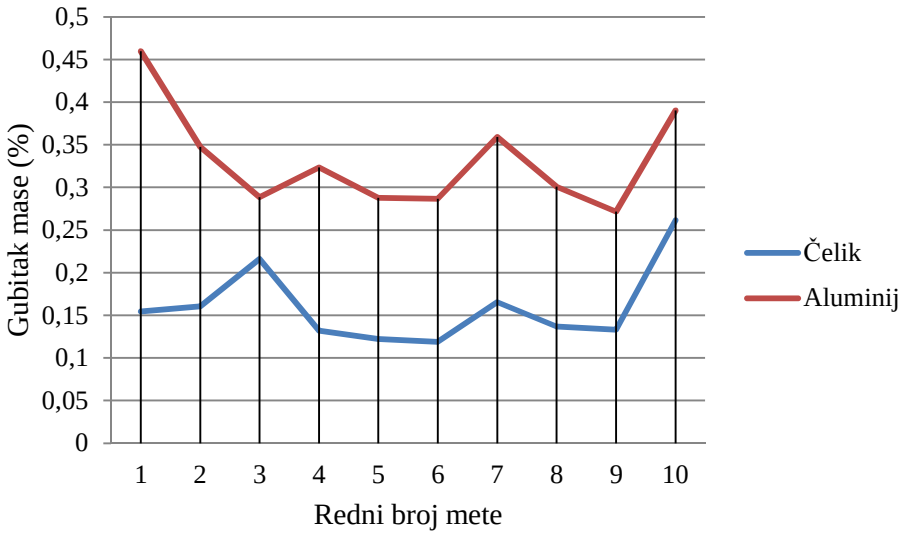
Tablica 6-7. Rezultati ispitivanja za aluminijsku metu

Meta br.	Masa eksplozivne tvari (g)	Meta	Masa mete prije otpucavanja (g)	Masa mete poslije otpucavanja (g)	Razlika masa (g)	Razlika masa (%)
1	20,07	Al	408,95	407,07	1,88	0,46
2	20,08	Al	411,76	410,33	1,43	0,35
3	20,08	Al	412,26	411,07	1,19	0,29
4	20,07	Al	411,42	410,09	1,33	0,32
5	20,08	Al	403,33	402,17	1,16	0,29
6	20,09	Al	415,27	414,08	1,19	0,29
7	20,09	Al	414,88	413,39	1,49	0,36
8	20,08	Al	408,82	407,59	1,23	0,30
9	20,09	Al	412,32	411,2	1,12	0,27
10	20,07	Al	412,66	411,05	1,61	0,39

Slika 6-15. Izmjerena masa čelične mete prije i poslije otpucavanja



Slika 6-16. Izmjerena masa aluminijske mete prije i poslije otpucavanja

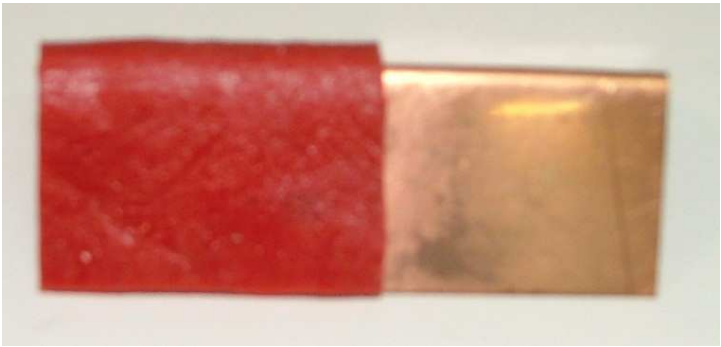


Slika 6-17. Gubitak mase čelične i aluminijske mete u postocima

6.2.3 Oblik i stanje materijala obloge nakon detonacije eksplozivnog punjenja

Obloga linijskog kumulativnog rezača se uslijed djelovanja udarnog vala iniciranog eksplozivnog naboja deformira i ubrzava. Ponašanje materijala obloge i način promjene geometrijskih značajki obloge prije i poslije djelovanja eksplozivnog naboja se različito tumače. Prema konvencionalnim modelima (Birkhoff, PER) ubrzana obloga se razdvaja u dva segmenta, primarni i sekundarni mlaz koji se značajno razlikuju po svojim masama i brzinama. Na dubinu reza utječe samo primarni mlaz koji ima veću brzinu i manju masu, a sekundarni mlaz ne doprinosi rezanju. Prema drugoj teoriji (Lim 2006), masa primarnoga mlaza linijskih kumulativnih rezača je vrlo mala, a njegova kinetička energija je nedovoljna da bi uzrokovala rez u ciljanom materijalu. Rez se ostvaruje uslijed kinetičke energije sječiva koje čine dvije spojene (zavarene) stranice obloge linijskog kumulativnog rezača ubrzane djelovanjem udarnog vala eksplozivnog naboja. S ciljem određivanja oblika i stanja obloge nakon detonacije eksplozivnog punjenja izvedena su dva ispitivanja.

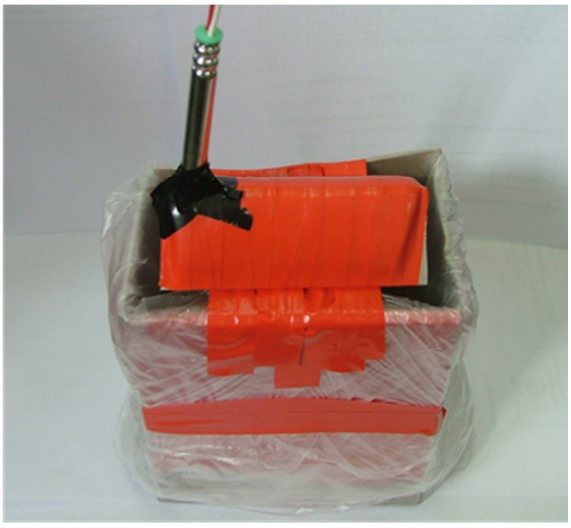
U prvom ispitivanju konstruiran je linijski kumulativni rezač s oblogom duljine 80±1 mm, a eksplozivno punjenje je postavljeno samo na polovicu obloge u duljini od 40±1 mm. Nakon otpucavanja promatran je oblik obloge na koji nije bio postavljen eksploziv. Postav ispitivanja prikazan je na Slici 6-18.



Slika 6-18. Ispitivanje oblika i stanja obloge – mjerni postav I

U drugom slučaju su linijski kumulativni rezači otpucavani u pijesku ili vodi. Eksplozivno punjenje je postavljeno na ukupnu duljinu obloge. Na ovaj način je omogućeno prikupljanje ostataka obloge nakon otpucavanja. Uloga pijeska i vode je u usporenju ubrzane metalne obloge uz minimalni utjecaj na deformiranje metalne obloge. Smatra se da su u tom slučaju ostaci obloge deformirani samo uslijed djelovanja detonacije eksplozivnog naboja. Postav ispitivanja u pijesku prikazan je na Slici 6-19., a postav ispitivanja u vodi na Slici 6-20.

Slika 6-19. Ispitivanje oblika i stanja obloge –postav II u pijesku



Slika 6-20. Ispitivanje oblika i stanja obloge –postav II u vodi

Nakon otpucavanja linijskog kumulativnog rezača prikupljeni su ostaci obloge. Ostaci obloge za prvi mjerni postav prikazani su na Slici 6-21., dok su ostaci obloge za drugi mjerni postav prikazani na Slici 6-22.

Bočna strana Prednja strana Donja strana

Slika 6-21. Ostaci obloge na koju nije postavljen eksploziv – mjerni postav I

Slika 6-22. Ostaci Al obloge otpucavane u pijesku – mjerni postav II

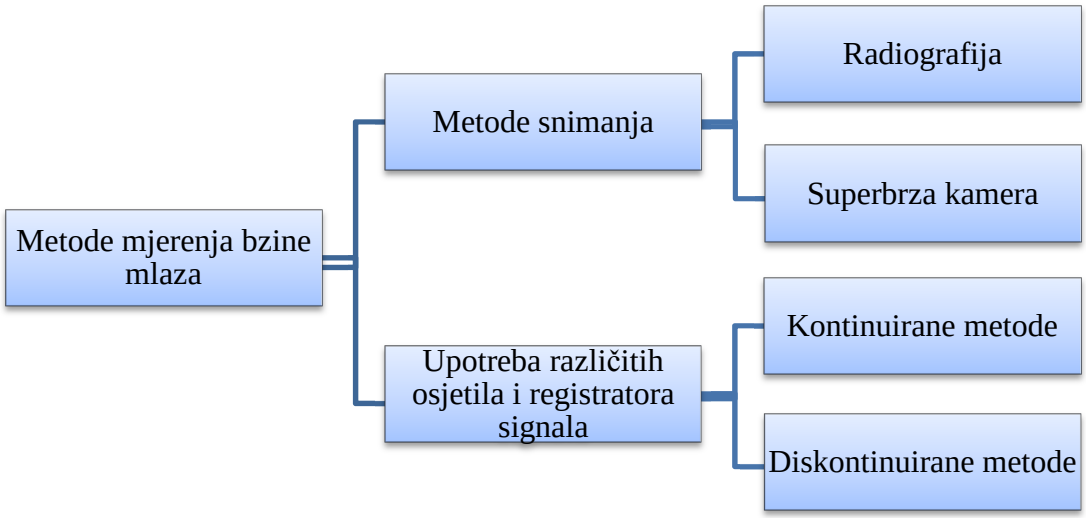
6.2.4 Mjerenje brzine mlaza u osi okomitoj na uzdužnu os rezača

Brzina mlaza u osi okomitoj na uzdužnu os linijskog kumulativnog rezača je, uz masu mlaza, osnovni čimbenik na osnovi kojeg se procjenjuje dubina reza linijskog kumulativnog rezača. Dubina reza je proporcionalna kinetičkoj energiji mlaza, što znači da će pri istoj masi mlaza prirast kinetičke energije, uslijed povećanja brzine mlaza, imati oblik kvadratne funkcije. Brzina mlaza obrnuto je proporcionalna gustoći medija kroz koji mlaz putuje. Izmjerena brzina mlaza u zraku je parametar na osnovi kojeg se računa brzina penetracije mlaza u materijalu mete.

Mjerenje brzine mlaza je zahtjevno zbog velike brzine mlaza i kratkog vremena trajanja događaja (reda veličina μs) te zahtijeva specifičnu mjernu opremu. Za razliku od kumulativnih perforatora, koji imaju veću duljinu penetracije u metu, te je razmjerno jednostavno izmjeriti brzinu mlaza u materijalu meti, rez linijskih kumulativnih rezača u meti je relativno plitak, te se uglavnom izvode mjerenja brzine mlaza u zraku, na osnovi kojih se procjenjuje brzina mlaza u materijalu meti.

6.2.4.1 Metode mjerenja brzine mlaza

U literaturi se nalazi značajan broj istraživanja s primjerima mjerenja brzine mlaza konusnih perforatora i manji broj mjerenja brzine mlaza linijskih kumulativnih rezača. Primjeri mjerenja brzine mlaza linijskih kumulativnih rezača izvedeni su uglavnom za potrebe validiranja proračuna hidrokodova i simulacija pri čemu je izveden mali broj mjerenja za pojedini tip rezača. Različite metode mjerenja brzine mlaza mogu se grubo sistematizirati na način prikazan Slikom 6-23.



Slika 6-23. Sistematizacija metoda mjeranja brzina mlaza

Metode mjerenja brzine mlaza mogu se podijeliti na mjerenja koja se temelje na snimanju procesa i metode mjerenja koje se zasnivaju na upotrebi različitih osjetila sa pripadajućim registratorom signala.

Radiografija *(engl. flash radiography)* je tehnika snimanja koja omogućuje čiste, nezamagljene snimke objekata koji se gibaju velikom brzinom, primjenom vrlo kratkog vremena izloženosti rendgenskim zrakama. Na taj način se eliminira utjecaj neprozirnosti plinova detonacije koja onemogućuje primjenu optičkih brzih kamera. Tehnika je razvijena neovisno u SAD-u i Velikoj Britaniji 1943. godine, za potrebe istraživanja kumulativnih naboja. Radiografija je najčešće korištena metoda za proučavanje kumulativnih naboja. Radiografske snimke mlaza kumulativnih naboja slične ostalim vrstama rendgenskih snimaka, a osnovna razlika je u vremenu ekspozicije koja uobičajeno iznosi manje od 1µs. Obzirom na brzinu mlaza kumulativnih perforatora koja može biti i 10 000 m/s, primijenjenom ekspozicijom trajanja 1 µs moguće je zabilježiti pomak mlaza od 0,1 mm na pojedinoj slici. Ukoliko se koristi veće vrijeme ekspozicije, javlja se pogreška mjerenja uslijed zamagljenosti snimke. Rendgenska zraka ili X zraka je elektromagnetski val kratke valne duljine i visoke frekvencije. Valne duljine iznose od 0,01 nm do 10 nm, a frekvencije od 3×10^{16} Hz do 3×10^{19} Hz ovisno o vrsti zrake. Valovi se mogu generirati na više načina, a najčešće je korišten postav u kojem elektroni ubrzani električnim poljem udaraju u metu od Volframa i induciraju snop rendgenskih zraka (Zukas 1990).

Kim i suradnici (Kim et al. 2007) su koristili radiografiju za mjerenje brzine mlaza linijskih kumulativnih rezača. Izmjerena vrijednost brzine, iz jednog izvedenog mjerenja, iznosila je približno 2300 m/s. Snimke mlaza toga mjerenja prikazane su na Slici 6-24.

52 µs nakon detonacije 76 µs nakon detonacije

Slika 6-24. Snimke mlaza 52 µs i 76 µs nakon detonacije (Kim et al. 2007).

Chase i suradnici iz Lawrence Livermore National Laboratory (Chase et al. 1999) su koristili radiografiju za istraživanje mlaza linijskih kumulativnih rezača.

Mjerenja brzine mlaza pomoću osjetila mogu se podijeliti na kontinuirane i diskontinuirane metode. U oba slučaja, mjerni sustav, uz osjetilo čini i prikladan registrator signala. Kod kontinuiranih metoda uobičajeno se koriste elektrootporna osjetila kojima se način rada temelji na promjeni električnog otpora unutar vremenskog intervala tijekom djelovanja mlaza kumulativnih naboja i osciloskop kao registrator. Wiśniewski (Wiśniewski, 2011) je koristio elektootporna osjetila i osciloskop za mjerenje različitih brzina pojedinih dijelova obloge kumulativnih naboja.

Diskontinuiranim metodama mjeri se prosječna brzina mlaza na duljinskom segmentu, primjenom elektro, optičkih , piezo ili drugih osjetila, uz upotrebu osciloskopa ili drugog brojača signala s prikladnom brzinom uzorkovanja.

Gazonas i suradnici (Gazonas et al. 1995) su koristili dvostruku olovnu žicu i osciloskop. Olovne žice, međusobno električno izolirane, su spojene s izvorom električne energije (baterija) i postavljene na međusobnom razmaku u zraku od 50 mm. U trenutku prekidanja žica (električnog vodiča) mlazom, a uslijed električne vodljivosti mlaza, dolazi do spajanja strujnog kruga koji se osciloskopom registrira u obliku električnog naponskog signala. Prema rezultatima dva mjerenja zaključeno je da mlaz nakon formiranja ima konstantnu brzinu u zraku koja iznosi 3520 ± 100 m/s. Rezultati mjerenja su upotrjebljeni za validaciju proračuna dobivenog upotrebom hidrokoda EPIC 92.

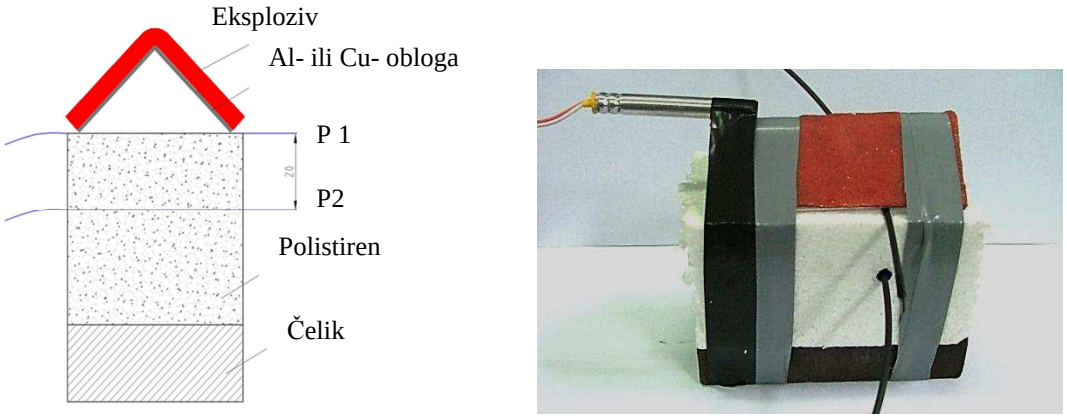
6.2.4.2 Mjerni postav i rezultati mjerenja

Za potrebe mjerenja konstruirani su linijski kumulativni rezači obloge izrađene od bakrenoga i aluminijskoga lima različite mase eksplozivnog punjenja. Kombinacijom dva materijala različite debljine i mase obloge s eksplozivnim punjenjem različitih masa ostvareni

su jedinični odnosi između mase metala i mase eksploziva (*M/C*). U svrhu određivanja *M/C* odnosa mjerena je masa metalne obloge. Na metalnu oblogu postavljen je eksploziv u trakama određene debljine te je izmjerena masa obloge i punjenja. Oduzimanjem mase obloge od mase uzorka izračunata je masa eksploziva i odnos *M/C.*

Mjerenja su provedena diskontinuiranom metodom, elektroničkim satom i svjetlovodima. Za materijal mete je izabran polistiren (stiropor), koji ima malu gustoću i pruža minimalni otpor penetraciji mlaza. Svjetlovodi su postavljeni na određenoj udaljenosti uzduž vertikalne osi polistirenske ploče. Detonacija eksploziva uzrokuje ubrzanje obloge linijskog kumulativnog rezača i stvaranje mlaza, koji presijeca svjetlovode. U trenutku prekida svjetlovoda oni primaju svjetlost nastalu detonacijom eksplozivnog punjenja i signal predaju elektroničkom satu koji mjeri vrijeme između signala prenesenih svjetlovodima. Na osnovi razmaka između mjesta postavljanja svjetlovoda i zabilježenog vremena proračunava se prosječna brzina mlaza linijskih kumulativnih rezača na promatranom segmentu.

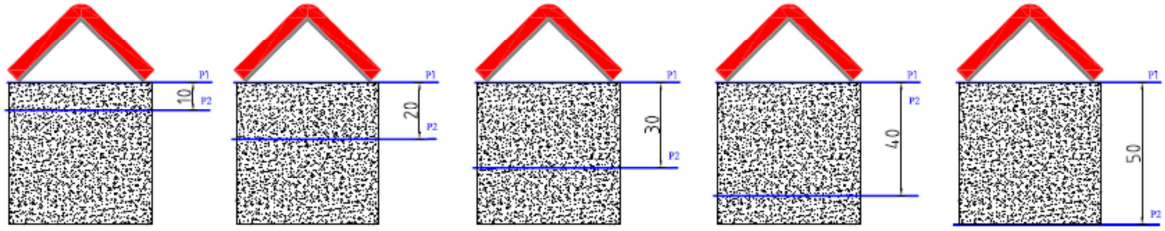
Mjerenja su podijeljena u dvije skupine. U prvoj skupini ispitivan je utjecaj različitog odnosa *M/C* na izmjerenu brzinu mlaza za oba materijala. Preliminarni rezultati ukazivali su na razliku izmjerenih brzina mlaza pri istom odnosu *M/C* za Cu- i za Al-oblogu. Stoga je mjerenje brzine obloge izvedeno posebno za Al- i posebno za Cu-oblogu. Udaljenost između svjetlovoda (P1 i P2) je bila konstantna i iznosila je 20 mm, a mijenjane su debljine obloge pojedinog materijala i mase eksplozivnog punjenja u svrhu postizanja različitih *M/C* odnosa. Na Slici 6-25. prikazan je mjerni postav mjerenja brzine mlaza



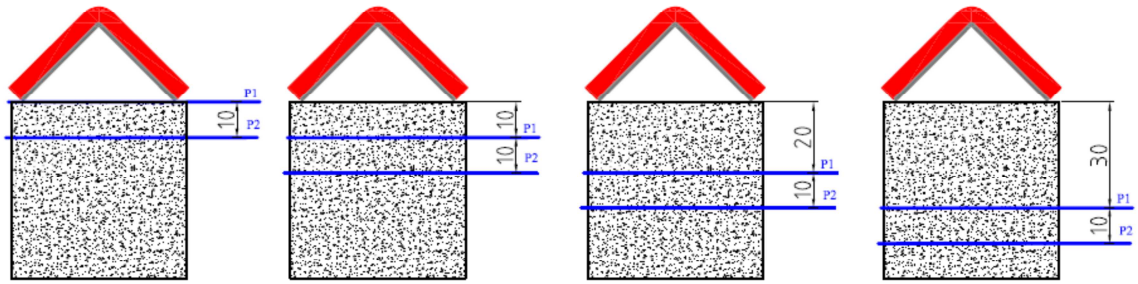
Slika 6-25. Mjerni postav mjerenja brzine mlaza linijskog kumulativnog rezača

U drugoj skupini mjerenja brzine mlaza izvedena su dva različita postava mjerenja za linijske kumulativne rezače sa Al-oblogom. U prvom postavu odnos mase obloge i mase eksploziva bio je konstantan, a mijenjala se udaljenost između svjetlovoda osjetila. Udaljenost je iznosila: 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm i 50 mm. Duljina mjernog segmenta mijenjana je

unutar okomite osi polistirenske mete te se povećanjem duljine mjernog segmenta odredila promjena prosječne brzine mlaza. U drugom postavu mjerenja izabrani su reprezentativni *M/C* odnosi, a razmak između svjetlovodnih osjetila iznosio je 10 mm. Pozicija mjernog segmenta mijenjana je unutar okomite osi rezača. Na taj način, izmjerene su prosječne ili srednje brzine mlaza na pojedinom segmentu, na različitoj udaljenosti od početnog položaja rezača. Mjerni postavi s promjenljivom udaljenosti između svjetlovoda prikazan je Slikom 6-26., a mjerni postav s konstantnom udaljenosti između svjetlovoda Slikom 6-27.



Slika 6-26. Mjerni postav sa promjenljivom udaljenosti između svjetlovoda

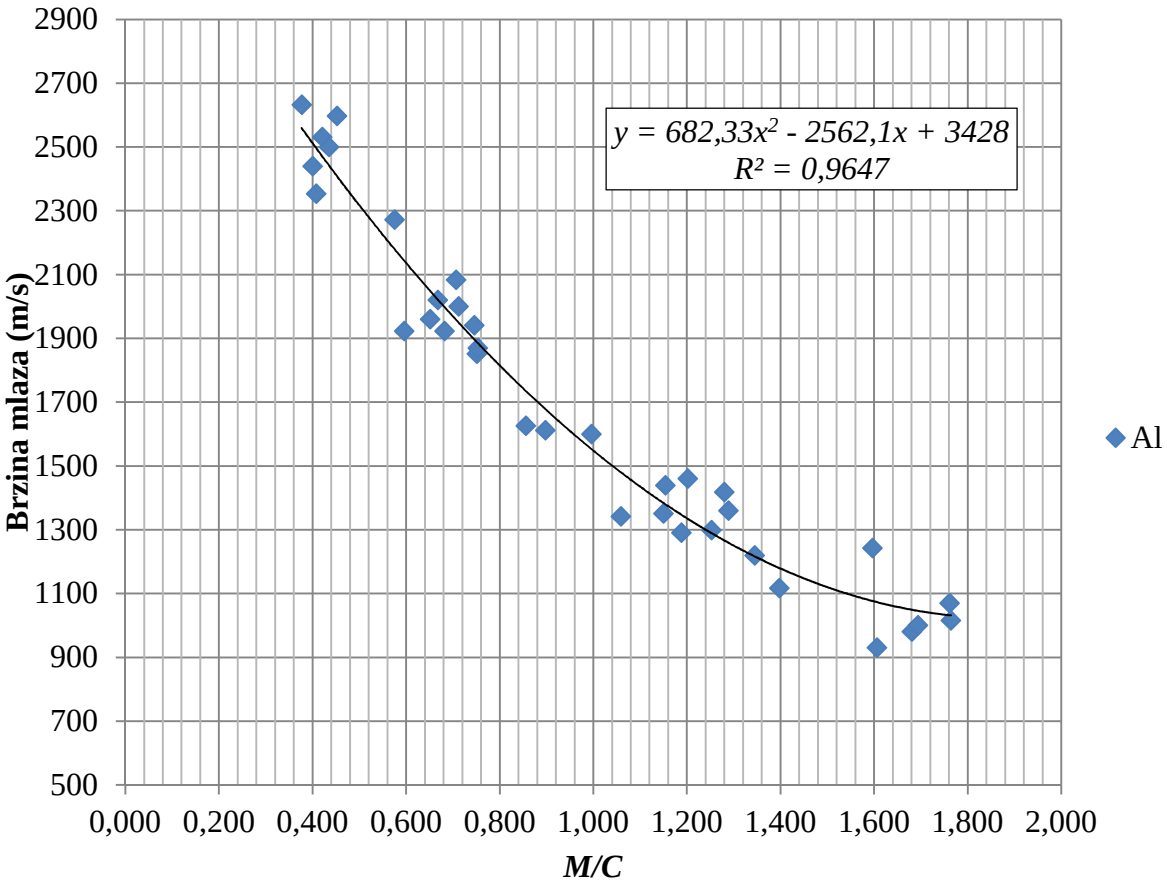


Slika 6-27. Mjerni postav sa konstantnom udaljenosti između svjetlovoda

Konstrukcijski podaci linijskih kumulativnih rezača i izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na razmaku od 20 mm dani su Tablicom 6-8. Na Slici 6-28. dan je grafički prikaz rezultat mjerenja brzina mlaza Al-obloge.

Tablica 6-8. Izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na razmaku od 20 mm

Redni broj	Materijal obloge	Debljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa uzorka (g)	Masa eksploziva (g)	*M/C*	Izmjereno vrijeme (µs)	Brzina mlaza (m/s)
1	Al	0,5	5,94	21,70	15,76	0,377	7,6	2632
2	Al	0,5	5,93	20,75	14,82	0,400	8,2	2439
3	Al	0,5	5,99	20,68	14,69	0,408	8,5	2353
4	Al	0,5	6,01	20,29	14,28	0,421	7,9	2531
5	Al	0,5	6,00	19,79	13,79	0,435	8,0	2500
6	Al	0,5	5,98	19,20	13,22	0,452	7,7	2597
7	Al	1,0	13,32	36,45	23,13	0,576	8,8	2272
8	Al	0,5	5,90	15,80	9,90	0,596	10,4	1923
9	Al	0,5	5,89	14,93	9,04	0,652	10,2	1960
10	Al	1,0	13,44	33,57	20,13	0,668	9,9	2020
11	Al	0,5	6,00	14,79	8,79	0,683	10,4	1923
12	Al	1,0	13,38	32,30	18,92	0,707	9,6	2083
13	Al	1,0	13,48	32,41	18,93	0,712	10,0	2000
14	Al	1,0	13,40	31,37	17,97	0,746	10,3	1941
15	Al	1,0	13,38	31,18	17,80	0,752	10,8	1851
16	Al	0,5	6,10	14,20	8,10	0,753	10,7	1869
17	Al	1,0	13,19	28,60	15,41	0,856	12,3	1626
18	Al	1,0	13,20	27,90	14,70	0,898	12,4	1612
19	Al	1,0	13,26	26,57	13,31	0,996	12,5	1600
20	Al	1,0	13,40	26,05	12,65	1,059	14,9	1342
21	Al	1,0	13,23	24,73	11,50	1,150	14,8	1351
22	Al	2,0	25,84	48,23	22,39	1,154	13,9	1439
23	Al	1,0	13,68	25,19	11,51	1,189	15,5	1290
24	Al	2,0	26,13	47,87	21,74	1,202	13,7	1460
25	Al	2,0	27,12	48,77	21,65	1,253	15,4	1298
26	Al	2,0	26,82	47,77	20,95	1,280	14,1	1418
27	Al	2,0	27,99	49,71	21,72	1,289	14,7	1360
28	Al	2,0	27,23	47,47	20,24	1,345	16,4	1219
29	Al	2,0	26,00	44,60	18,60	1,398	17,9	1117
30	Al	2,0	26,43	42,98	16,55	1,597	16,1	1242
31	Al	2,0	26,31	42,69	16,38	1,606	21,5	930
32	Al	2,0	26,04	41,53	15,49	1,681	20,4	980
33	Al	2,0	25,92	41,22	15,30	1,694	20,0	1000
34	Al	2,0	26,30	41,23	14,93	1,762	18,7	1070
35	Al	2,0	26,45	41,44	14,99	1,765	19,7	1015

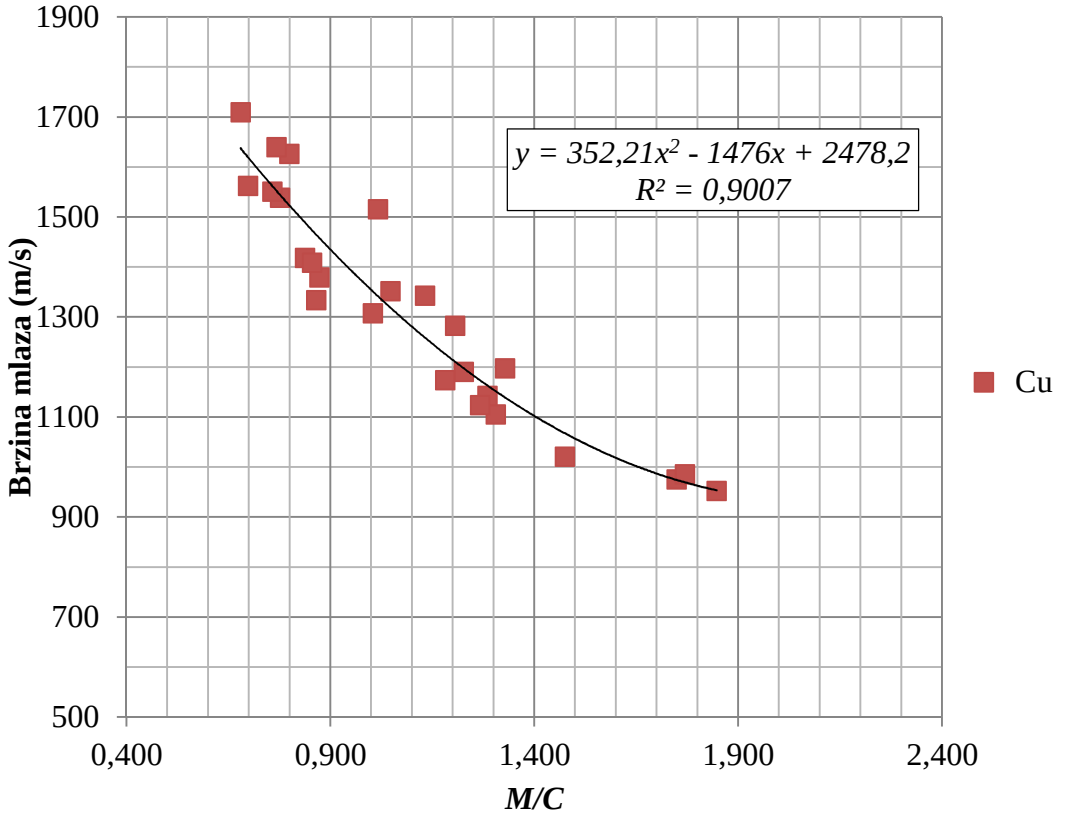


Slika 6-28. Grafički prikaz raspodjele brzine mlaza za Al-oblogu na razmaku od 20mm

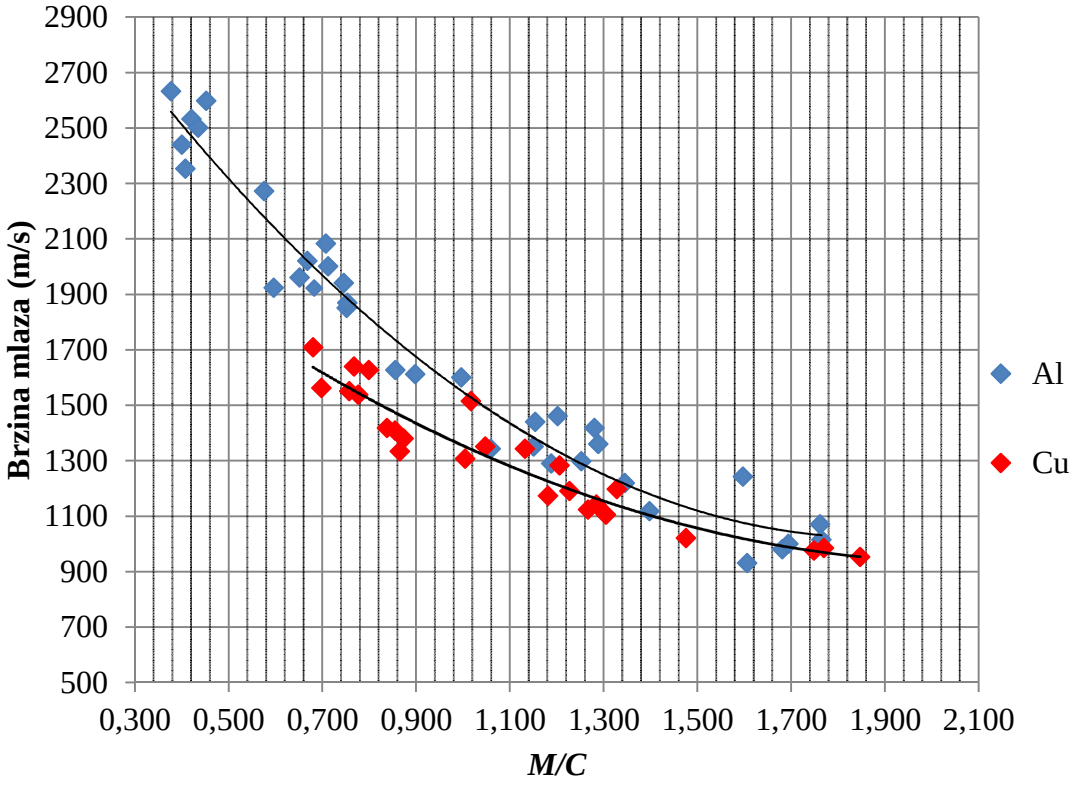
U Tablici 6-9. dani su podaci o konstrukciji linijskih kumulativnih rezača i izmjerena brzina mlaza za Cu-oblogu. Na Slici 6-29. dan je grafički prikaz rezultat mjerenja mlaza linijskih kumulativnih rezača s Cu-oblogom, a na Slici 6-30. usporedni prikaz izmjerenih brzina mlaza za Al- i Cu-oblogu na razmaku od 20 mm.

Tablica 6-9. Izmjerena brzina mlaza za Cu-oblogu na razmaku od 20 mm

Redni broj	Materijal obloge	Debljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa uzorka (g)	Masa eksploziva (g)	*M/C*	Izmjereno vrijeme (μs)	Brzina mlaza (m/s)
1	Cu	0,5	20,52	50,70	30,18	0,680	11,7	1709
2	Cu	0,5	20,89	50,82	29,93	0,698	12,8	1562
3	Cu	0,5	20,86	48,40	27,54	0,757	12,9	1550
4	Cu	0,5	21,06	48,50	27,44	0,767	12,2	1639
5	Cu	0,5	20,82	47,63	26,81	0,777	13,0	1538
6	Cu	0,5	21,26	47,86	26,60	0,799	12,3	1626
7	Cu	0,5	20,80	45,63	24,83	0,838	14,1	1418
8	Cu	0,5	21,06	45,69	24,63	0,855	14,2	1408
9	Cu	0,5	20,64	44,49	23,85	0,865	15,0	1333
10	Cu	0,5	21,00	45,05	24,05	0,873	14,5	1379
11	Cu	0,5	20,86	41,63	20,77	1,004	15,3	1307
12	Cu	0,5	20,59	40,84	20,25	1,017	13,2	1515
13	Cu	0,5	20,73	40,52	19,79	1,047	14,8	1351
14	Cu	0,5	20,76	39,10	18,34	1,132	14,9	1342
15	Cu	0,5	20,81	38,42	17,61	1,182	17,9	1173
16	Cu	0,5	20,77	37,99	17,22	1,206	15,6	1282
17	Cu	0,5	20,82	37,79	16,97	1,227	16,8	1190
18	Cu	0,5	20,79	37,20	16,41	1,267	17,8	1123
19	Cu	0,5	21,16	37,63	16,47	1,285	17,5	1142
20	Cu	0,5	20,83	36,79	15,96	1,305	18,1	1105
21	Cu	0,5	20,55	36,02	15,47	1,328	16,7	1197
22	Cu	0,5	20,95	35,15	14,20	1,475	19,6	1020
23	Cu	0,5	20,55	32,30	11,75	1,749	20,5	975
24	Cu	0,5	20,74	32,46	11,72	1,770	20,3	985
25	Cu	0,5	21,06	32,46	11,40	1,847	21,0	952



Slika 6-29. Grafički prikaz raspodjele brzine mlaza za Cu-oblogu na razmaku od 20 mm

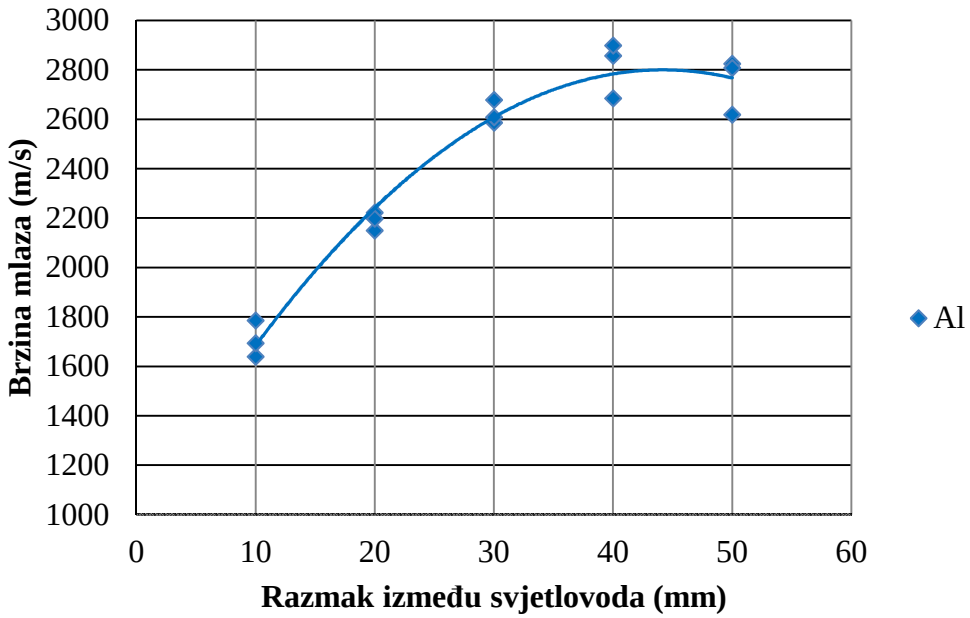


Slika 6-30. Usporedni prikaz brzine mlaza za Al- i Cu-oblogu na razmaku od 20 mm

U Tablici 6-10. dane su izmjerene brzine mlaza za Al oblogu pri konstantnom *M/C* odnosu na različitim udaljenostima, a na Slici 6-31. grafički prikaz rezultata mjerenja

Tablica 6-10. Izmjerena brzina mlaza za Al obloge konstantnom *M/C* odnosu i različitom razmaku svjetlovoda

Redni broj	Materijal obloge	Debljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa eksploziva (g)	*M/C*	Razmak (mm)	Izmjereno vrijeme (µs)	Brzina mlaza (m/s)
1	Al	1	13,4	22,7	0,6	10	6,1	1639
2	Al	1	13,5	23,0	0,6	10	5,6	1785
3	Al	1	13,3	23,2	0,6	10	5,9	1694
4	Al	1	13,2	22,7	0,6	20	9,3	2150
5	Al	1	12,9	22,2	0,6	20	9,0	2222
6	Al	1	13,1	22,4	0,6	20	9,1	2198
7	Al	1	12,9	23,4	0,6	30	11,2	2678
8	Al	1	13,2	22,2	0,6	30	11,6	2586
9	Al	1	13,3	23,0	0,6	30	11,5	2608
10	Al	1	13,9	23,3	0,6	40	14,0	2857
11	Al	1	13,7	22,9	0,6	40	13,8	2898
12	Al	1	13,3	23,3	0,6	40	14,9	2684
13	Al	1	13,2	23,5	0,6	50	17,7	2824
14	Al	1	13,2	22,5	0,6	50	19,1	2618
15	Al	1	13,6	23,2	0,6	50	17,8	2808



Slika 6-31. Izmjerene brzine mlaza za Al-oblogu pri istom *M/C* odnosu i različitom razmaku svjetlovoda

U tablicama od 6-11. do 6-13. dan je prikaz izmjerenih brzina obloge pri različitim *M/C* odnosima na pojedinom segmentu vertikalne osi, a na Slici 6-32. grafički prikaz brzina po pojedinom segmentu za različite *M/C* odnose.

Tablica 6-11. Izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na pojedinom segmentu, *M/C* = 0,40

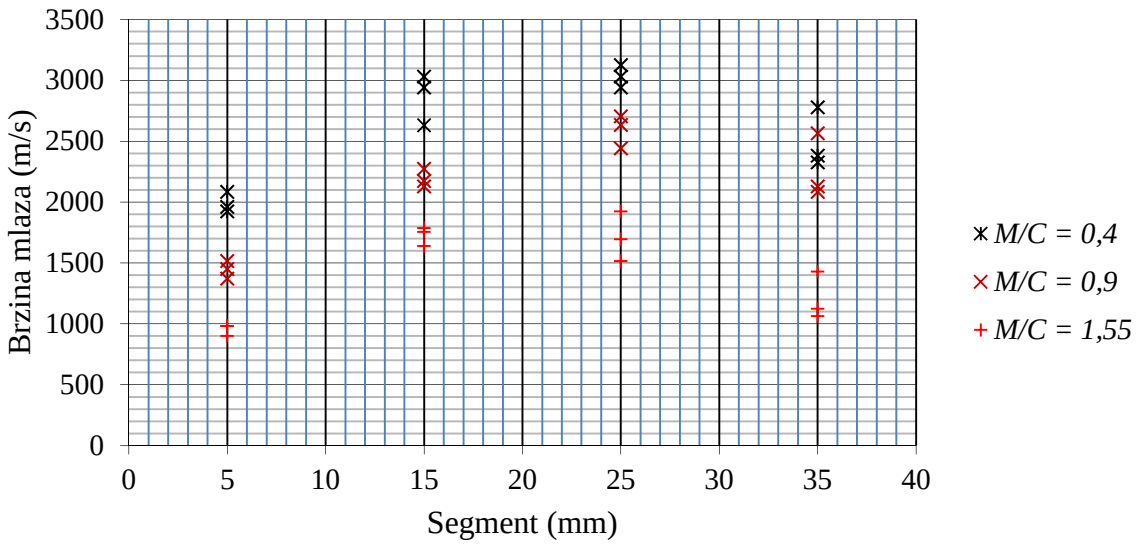
Redni broj	Materijal obloge	Debljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa eksploziva (g)	*M/C*	Segment (mm)	Izmjereno vrijeme (μs)	Brzina obloge (m/s)
1	Al	0,5	5,87	14,67	0,40	0-10	4,8	2083
2	Al	0,5	5,95	14,54	0,41	0-10	5,1	1960
3	Al	0,5	5,87	14,45	0,41	0-10	5,2	1923
4	Al	0,5	5,96	14,60	0,41	10-20	3,3	3030
5	Al	0,5	5,96	14,69	0,41	10-20	3,4	2941
6	Al	0,5	5,87	14,68	0,40	10-20	3,8	2631
7	Al	0,5	5,93	14,55	0,41	20-30	3,2	3125
8	Al	0,5	5,91	14,74	0,40	20-30	3,3	3030
9	Al	0,5	5,84	14,87	0,39	20-30	3,4	2941
10	Al	0,5	5,96	14,57	0,41	30-40	4,3	2325
11	Al	0,5	5,99	15,14	0,40	30-40	3,6	2777
12	Al	0,5	6,01	14,56	0,41	30-40	4,2	2380

Tablica 6-12. Izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na pojedinom segmentu, *M/C* = 0,90

Redni broj	Materijal obloge	Debljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa eksploziva (g)	*M/C*	Segment (mm)	Izmjereno vrijeme (μs)	Brzina obloge (m/s)
1	Al	1,0	13,13	14,52	0,90	0-10	6,6	1515
2	Al	1,0	13,20	14,65	0,90	0-10	6,9	1449
3	Al	1,0	13,11	14,42	0,91	0-10	7,3	1369
4	Al	1,0	13,21	14,67	0,90	10-20	4,4	2272
5	Al	1,0	13,24	14,49	0,91	10-20	4,6	2173
6	Al	1,0	13,29	14,87	0,89	10-20	4,7	2127
7	Al	1,0	13,20	14,80	0,89	20-30	3,8	2631
8	Al	1,0	13,12	14,63	0,90	20-30	3,7	2702
9	Al	1,0	13,11	14,68	0,89	20-30	4,1	2439
10	Al	1,0	13,36	14,85	0,90	30-40	3,9	2564
11	Al	1,0	13,35	14,74	0,91	30-40	4,8	2083
12	Al	1,0	13,45	15,06	0,89	30-40	4,7	2127

Tablica 6-13. Izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na pojedinom segmentu, *M/C* =1,55

Redni broj	Materijal obloge	Debljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa eksploziva (g)	*M/C*	Segment (mm)	Izmjereno vrijeme (µs)	Brzina obloge (m/s)
1	Al	2,0	26,10	16,82	1,55	0-10	10,2	980
2	Al	2,0	26,08	16,94	1,54	0-10	11,1	900
3	Al	2,0	25,77	16,69	1,54	0-10	10,2	980
4	Al	2,0	26,30	16,90	1,56	10-20	5,7	1754
5	Al	2,0	26,07	16,70	1,56	10-20	6,1	1639
6	Al	2,0	26,51	17,13	1,55	10-20	6,3	1785
7	Al	2,0	26,27	17,06	1,54	20-30	6,6	1515
8	Al	2,0	26,36	17,12	1,54	20-30	5,2	1923
9	Al	2,0	26,67	17,06	1,56	20-30	5,9	1694
10	Al	2,0	26,68	17,26	1,55	30-40	7,0	1428
11	Al	2,0	26,23	16,84	1,56	30-40	8,9	1123
12	Al	2,0	26,24	16,96	1,55	30-40	9,4	1063



Slika 6-32. Grafički prikaz izmjerenih brzina mlaza za različite odnose *M/C* po pojedinom segmentu

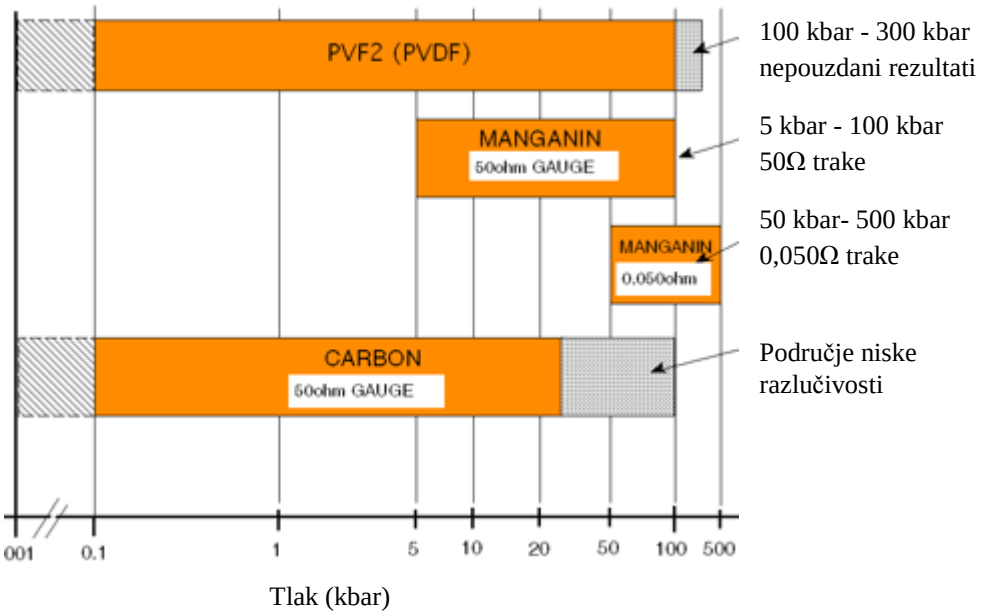
6.2.5 Mjerenje iznosa tlaka mlaza prilikom nailaska na metu

Udarni valovi generiraju tlakove visokog iznosa i vrlo kratkog vremena djelovanja. Za mjerenje takvih tlakova potrebna su osjetila vrlo brzog odziva i odgovarajućeg mjernog područja. Tlakove reda veličina kbar-a do nekoliko stotina kbar-a moguće je mjeriti na dva načina. Prvi način mjerenja uključuje upotrebu piezootpornih osjetila, kojima se uslijed deformacije izazvane djelovanjem udarnog vala na aktivni dio osjetila mijenja električni otpor. Promjena otpora razmjerna je padu električnog napona unutar mjernoga mosta koji se registrira i mjeri osciloskopom. Piezootporna osjetila često su izvedena u obliku traka te se nazivaju „strain gauges“ (*strain*-deformacija, *gauge*-osjetilo). Namijenjene su za mjerenje visokih tlakova brzih pojava, a vrijeme odziva im je ispod 1 μs, odnosno do desetina ns. S obzirom na materijal aktivnog elementa (piezootpornika) mogu se podijeliti na manganinske, iterbijske i ugljične trake.

Drugi način mjerenja se zasniva na principu piezoefekta. Na elektrodama piezoelektričnih osjetila, djelovanjem promjenjive sile generira se električni naboj.

Piezoelektrični materijali primjenjuju se za izradu aktivnog dijela osjetila za mjerenje tlakova visokoga iznosa, generiranih udarom ili eksplozijom. U početku su se najviše koristila osjetila čiji je aktivni element kristal kvarca s dimenzijama od nekoliko milimetara. Piezoelektrična svojstva polivinilflourida (PVDF, PVF) otkrio je Kawai 1969. godine, a uz njih i feroelektrična svojstva potvrdio je Kepler 1978. godine. Upotreba PVDF-osjetila za mjerenja tlakova započinje znatno kasnije. Suradnjom Instituta Franco-Allemand resarches de Saint-Louis i Sandia National Laboratories dokazano je da se PVDF-filmovi debljine od 25 μm mogu pouzdano koristiti za mjerenje visokih tlakova i naprezanja (Bauer 2000). Gustavson i suradnici (Gustavsom et al. 1994) u tehničkom izvještaju daju detaljan prikaz PVDF-senzora, područja primjene i primjere mjerenja visokih tlakova nastalih detonacijom eksploziva ili metala ubrzanog energijom eksploziva.

Izbor osjetila tlaka temelji se na iznosu tlaka, mjernom postavu i cijeni osjetila. Usporedba različitih piezootpornih i PVDF-osjetila za mjerenje tlaka s obzirom na iznos tlaka prikazan je Slikom 6-33.



Slika 6-33. Usporedba različitih osjetila tlaka s obzirom na iznos tlaka (http://www.dynasen.com/html/stressgaugeintro.html)

S obzirom da su očekivani tlakovi mlaza kumulativnog rezača unutar 100 kbar-a, za mjerenje su korištena piezoelektrična osjetila koja daju dovoljno kratko vrijeme odziva, pokrivaju zahtijevano područje tlakova, jeftinija su i jednostavna su za upotrebu.

Mjerni sustav sastoji se od:

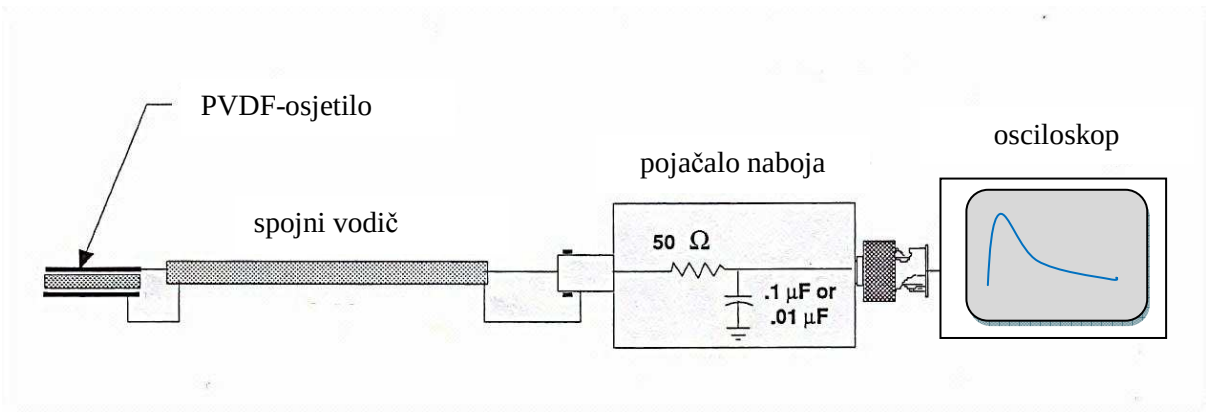
-PVDF-osjetila tlaka,

-pojačala naboja,

-registratora (digitalni osciloskop) i

-spojnih vodiča.

Shematski prikaz mjernog sustava dan je Slikom 6-34.



Slika 6-34. Shematski prikaz mjernog sustava

Registrator signala

Registrator, digitalni osciloskop LeCroy Waverunner 64Xi sljedećih je tehničkih karakteristika:

-frekvencijski opseg: 600 MHz,

-broj kanala: 4,

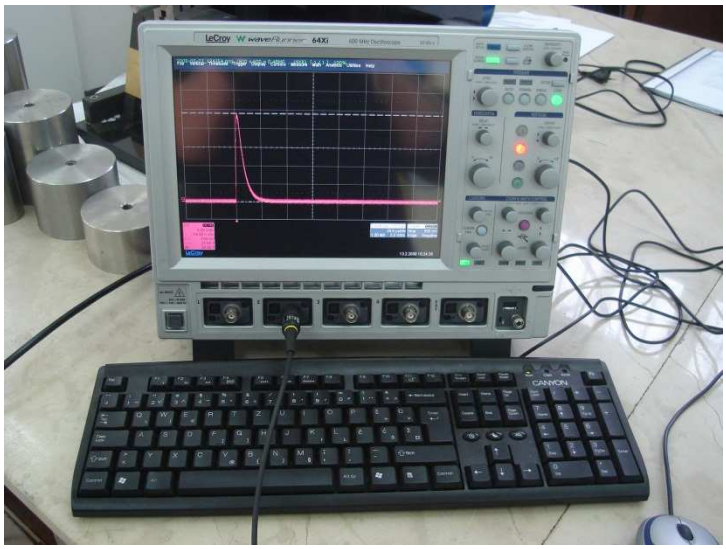
-frekvencija uzorkovanja: 5 GS/s, standardno, 10 5 GS/s, maksimalno,

-memorija: 12.5 Mpts/kanalu, standardno, 25 Mpts, maksimalno,

-vremensko područje: od 200 ps - 10 s/div do 1000 s,

-naponsko područje : 2 m/V - 10V/div.

Osciloskop je mjerni uređaj za dvodimenzionalno prikazivanje trenutnih vrijednosti jedne ili više brzo promjenjivih električnih veličina u ovisnosti o vremenu ili nekoj drugoj električnoj veličini. Fotografija osciloskopa LeCroy Waverunner 64 Xi prikazan je na Slici 6-35.



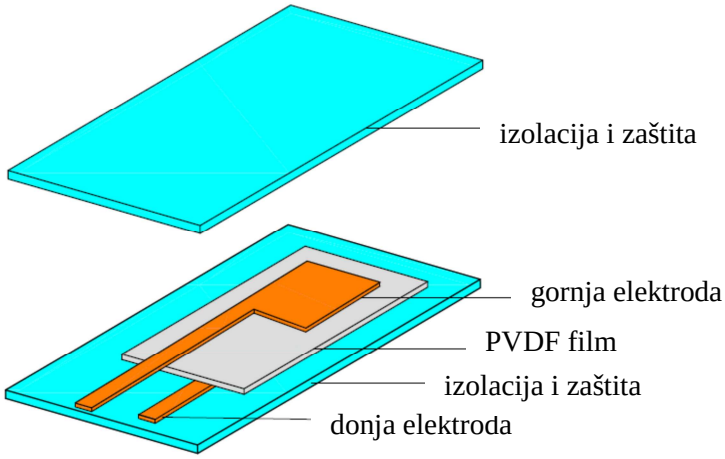
Slika 6-35. Osciloskop LeCroy Waverunner 64 Xi

Osciloskop se sastoji od posebnog hardverskog dijela kombiniranog s računalom u posebnom kućištu i koristi operativni sustav Windows XP ®. Svaki valni oblik se može snimiti na čvrsti disk u digitalnom obliku u binarnom, ASCII, Excell, MathCad i MathLab formatu zapisa. Svaki od navedenih oblika moguće je naknadno učitati i obraditi u prikladnom programu (Dobrilović 2008).

Mjerne trake

Pri mjerenju tlaka korištene su piezoelektrične poliflourne mjerne trake tipa PVF2-11-25-EK, proizvođača Dynasen Inc. Aktivni element, piezofilm PVDF (PVF2) nalazi se između

elektroda, a traka je s obje strane zaštićena izolacijom. Na Slici 6-36. prikazana je konstrukcija PVDF-osjetila, a na Slici 6-37. krivulja za očitavanje tlaka iz mjerenih napona.



Slika 6-36. Konstrukcija PVDF osjetila tlaka

Karakteristike mjerne trake PVF2-11-25-EK su sljedeće:

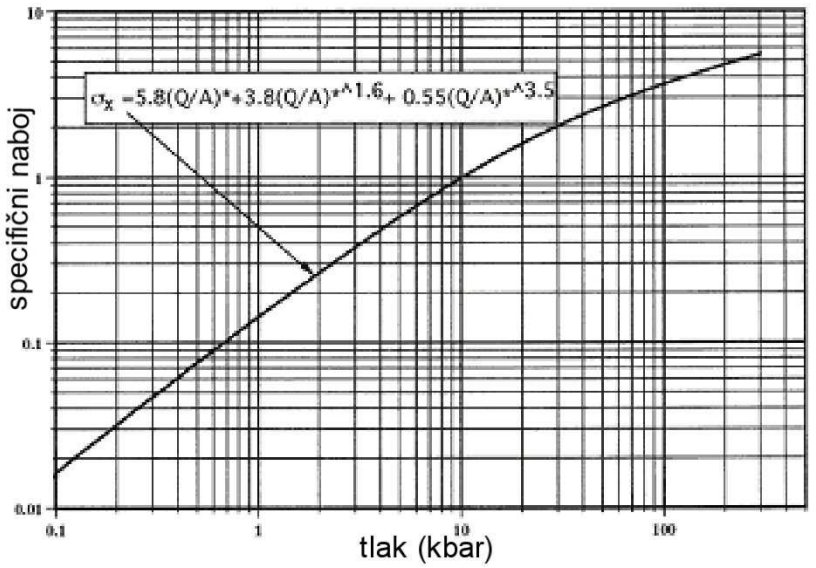
-dimenzije aktivnog dijela osjetila: 6,35x6,35 (mm),

-aktivna površina osjetila: 0,4 (cm^2),

-piezomaterijal: PVDF (PVF2),

-debljina piezomaterijala: 0,028 (mm) i

-debljina izolacijske folije: 0,025 (mm).



Slika 6-37. Mjerni dijagram za očitavanje tlaka

Odnos ($\frac{Q}{A}$) proračunava se iz izmjerenog napona prema obrascu:

$$\left(\frac{Q}{A}\right) = \frac{U_m}{A} \cdot C_c \qquad (\mu C/cm^2) \tag{6-1}$$

gdje je:

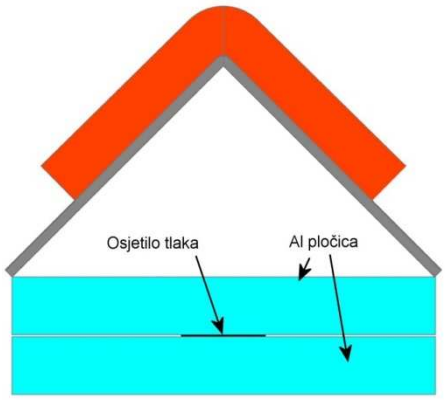
Q - generirani naboj na piezopretvorniku (μC),

A - aktivna površina piezopretvornika (cm^2),

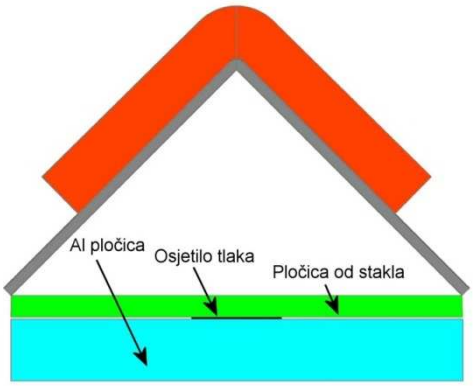
U_m - mjereni vršni napon (V) i

C_c - kapacitet nabojnog pojačala (μF).

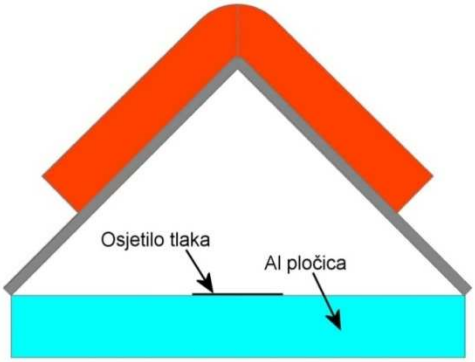
Pri mjerenju tlaka mlaza kumulativnog rezača primijenjena su tri različita mjerna postava s obzirom na položaj osjetila tlaka i korištene ciljane materijale-mete. U prvom slučaju osjetilo tlaka je postavljeno između dvije aluminijske pločice debljine 10 mm - postav I. U drugom slučaju osjetilo je postavljeno između staklene i aluminijske pločice pri čemu je staklena pločica bila gornja, odnosno prva u kontaktu s mlazom - postav II. U trećem slučaju osjetilo tlaka je postavljeno izravno na površinu Al-pločice - postav III. Prikaz položaja osjetila tlaka dan je slikama od 6-38. do 6-40.



Slika 6-38. Mjerenje tlaka mlaza - mjerni postav I (osjetilo između Al-pločica)

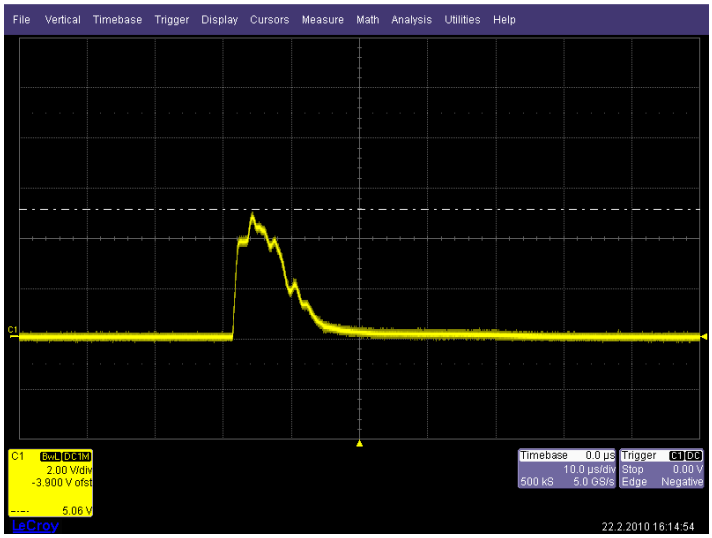


Slika 6-39. Mjerenje tlaka mlaza - mjerni postav II (osjetilo između stakla i Al-pločice)

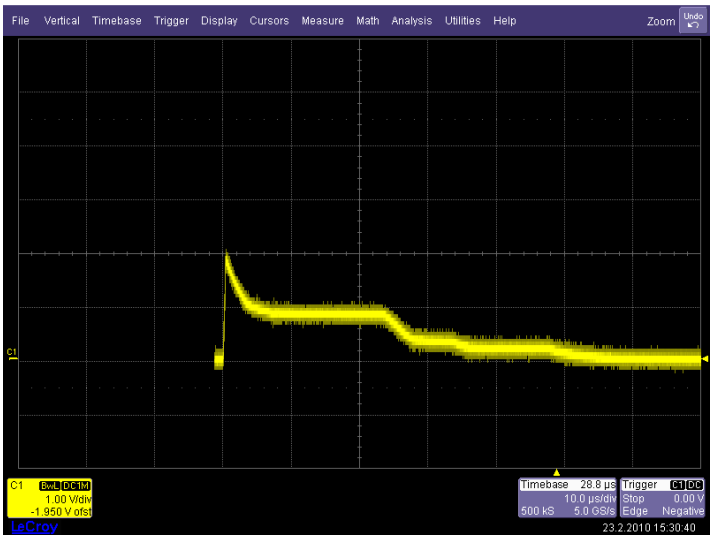


Slika 6-40. Mjerenje tlaka mlaza - mjerni postav III (osjetilo na Al-pločici)

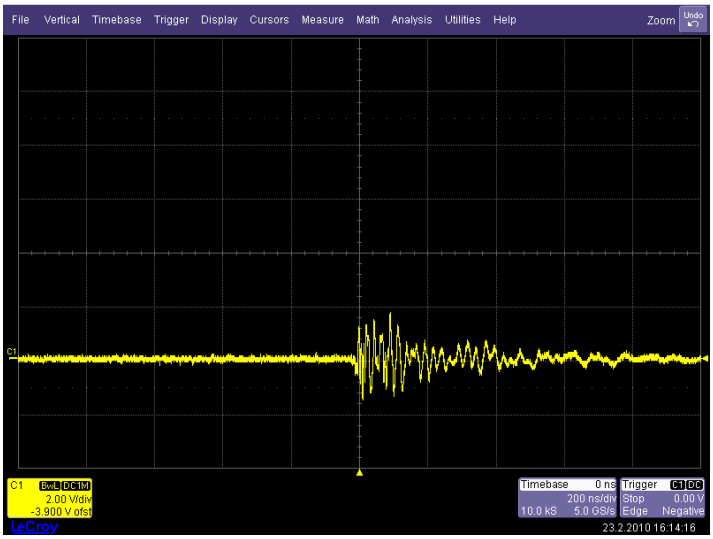
Karakteristični zabilježeni naponski signali pri pojedinom mjernom postavu prikazani su na slikama od 6-41 do 6-43.



Slika 6-41. Mjerni signal na zaslonu osciloskopa - mjerni postav I



Slika 6-42. Mjerni signal na zaslonu osciloskopa - mjerni postav II



Slika 6-43. Mjerni signal na zaslonu osciloskopa - mjerni postav III

6.3 Analiza rezultata prve skupine ispitivanja.

6.3.1 Analiza snimanja brzom kamerom

Pregledom mete nakon otpucavanja utvrđeno je da je aluminijska pločica uspješno presječena. Nakon pregleda i analize snimki može se zaključiti:

- zbog velike količine svjetlosti emitirane detonacijom eksplozivnog punjenja nije bilo moguće snimiti deformaciju obloge uslijed djelovanja detonacijskog udarnoga vala i
- u drugom snimku vidljivo je odbacivanje prerezanog dijela aluminijske pločice nakon detonacije.

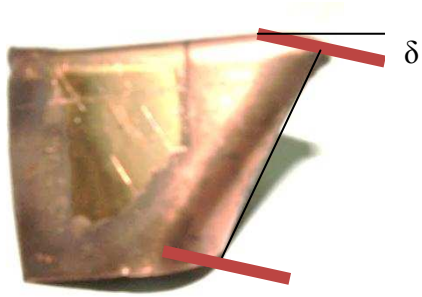
Kamera je ograničena maksimalnom brzinom snimanja i prilagođena je za potrebe analiziranja podataka miniranja te se može uspješno koristiti pri analizi učinka linijskih kumulativnih rezača kod rušenja objekata miniranjem. Za snimanje deformacije obloge i mlaza linijskih kumulativnih rezača potrebno je koristiti kameru koja ima veću vremensku rezoluciju i mjerni postav kojim bi se eliminirao utjecaj svjetlosti detonacije eksplozivnog naboja.

6.3.2 Analiza promjene mase mete

Prema rezultatima mjerenja mase mete prije i poslije otpucavanja može se zaključiti da su mase materijala mete nakon otpucavanja uvijek nešto manje od mase mete prije otpucavanja. Prilikom djelovanja mlaza na materijal mete, kao posljedica interakcije između mlaza i mete, dolazi do gubitka mase materijala mete. Prema hidrodinamičkoj teoriji, penetracija mlaza se interpretira Bernoullijevom jednadžbom za idealne fluide. Uslijed udara mlaza u metu dolazi do odbacivanja djelića materijala mete. Vrijednost izgubljene mase izražena je u gramima izgubljenog materijala i u postocima. Najveći izmjereni gubitak mase za čeličnu metu iznosi 2,21 g ili 0,26 % mase mete. Srednji izmjereni gubitak mase za sve čelične mete iznosi 1,32 g ili 0,16 %. Najveći izmjereni gubitak mase za aluminijsku metu iznosi 1,88 g ili 0,46 % od mase mete. Srednji izmjereni gubitak mase za sve aluminijske mete iznosi 1,363 g ili 0,33 %. Iako su srednji izmjereni gubici mase za čeličnu i aluminijsku metu približno jednaki po iznosu, postotno gledajući gubici mase za aluminijsku metu su znatno veći. Gubici u masi mete su u pravilu veći od izmjerenih, jer dijelovi mlaza često ostaju prilijepljeni na metu u području reza i nije ih moguće odvojiti prije mjerenja mase mete. Mjerenjem mase mete je dokazano da masa materijala mete prije i poslije djelovanja linijskog kumulativnog rezača nije ista, odnosno masa materijala mete nakon rezanja je manja. Iako su gubici u masi materijala mete vrlo maloga iznosa, oni ipak postoje.

6.3.3 Analiza oblika i stanje materijala obloge nakon detonacije eksplozivnog punjenja

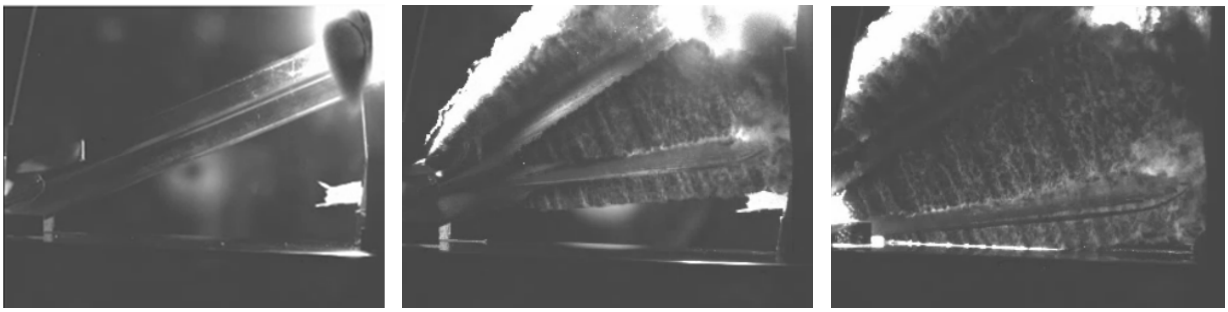
Nakon otpucavanja prvog postava, skupljanja i analize ostatka obloge na koji nije bio postavljen eksploziv pretpostavljeno je da se gornji dio obloge deformira u skladu s Taylorovim modelom. Obloga se deformira u skladu sa Taylorovim modelom i pravac deformacije zatvara određeni kut (Taylorov kut) u odnosu na horizontalnu os u skladu sa Slikom 6-44.



Slika 6-44. Kut otklona obloge od horizontalne ravnine

Ovakav način deformiranja obloge određuje i pravac djelovanja mlaza linijskog kumulativnog rezača. Prema pretpostavci, ukoliko se promatra djelovanje mlaza na metu u uzdužnoj osi rezača, pravac djelovanja mlaza nije okomit na metu**.** Mlaz linijskih kumulativnih rezača sa horizontalnom površinom mete zatvara kut definiran Taylorovim modelom. Pretpostavka je naknadno potvrđena na osnovi snimki djelovanja linijskih kumulativnih rezača na metu. Geometrijski odnos između mlaza linijskih kumulativnih rezača i površine mete prikazani su slikama 6-45 i 6-46.

Slika 6-45. Djelovanje mlaza linijskih kumulativnih rezača na metu – snimka I (http://www.youtube.com/watch?v=ZO_09QdblbY)



Slika 6-46. Djelovanje mlaza linijskih kumulativnih rezača na metu – snimka II (http://www.youtube.com/watch?v=beQi-vUBbr4)

Pregledom ostataka obloge nakon otpucavanja drugog postava, ustanovljena je ponovljivost oblika dijelova obloge. Nakon otpucavanja prisutna su tri različita oblika ostatka obloge:

- sječivo (oštrica),
- pravilni ostaci obloge u obliku traka i
- sitni ostaci, koji predstavljaju frakturirane dijelove mlaza.

Sječivo čine dvije nasuprotne stranice materijala obloge, koje su uslijed djelovanja detonacijskog udarnog vala slijepljene (zavarene) u cjelinu. Izmjerena masa sječiva je različita i iznosi približno od 1/3 do 2/3 početne mase materijala obloge. Masa sječiva čini najveći udio u odnosu na početnu masu obloge.

Ostaci u obliku trakica pravilnog su oblika i ujednačene mase. Trakice su odvojeni dijelovi donjih stranica obloge. Trake ne učestvuju u procesu formiranja kumulativnog mlaza i procesu rezanja linijskih kumulativnih rezača.

Kada se od ukupne početna mase oduzme masa sječiva i masa traka ostatak mase su mase komadića frakturiranog mlaza linijskog kumulativnog rezača. Ostaci obloge su bili manje poremećeni kada je otpucavanje izvedeno u pijesku.

6.3.4 Analiza mjerenja brzine mlaza

Prema izmjerenim vrijednostima brzina mlaza u okomitoj osi za aluminijske i bakrene obloge izrađeni su dijagrami koji prikazuju utjecaj *M/C* odnosa na brzinu mlaza za pojedini materijal obloge, te usporedni dijagram kojim su prikazane vrijednosti brzine mlaza za oba materijala obloge. Za pojedine funkcijske zavisnosti izvedene su korelacijske krivulje, zasebno za svaki materijal obloge. U oba slučaja mjerni rezultati se najbolje podudaraju s krivuljom polinoma drugog stupnja. Utjecaj *M/C* odnosa na brzinu mlaza Al-obloge (Slika 6-28.) izražena je jednadžbom (6-2), a utjecaj *M/C* na brzinu mlaza Cu-obloge (Slika 6-29.), jednadžbom (6-3).

$$y = 682{,}33x^2 - 2562{,}1x + 3428 \quad (6\text{-}2)$$

$$y = 352{,}21x^2 - 1476x + 2478{,}2 \quad (6\text{-}3)$$

Gdje je :

y - brzina mlaza i

x - *M/C* odnos za pojedini materijal.

Za svaku krivulju određen je koeficijent determinacije (R^2) koji iznosi R^2=0,96 za Al-oblogu i R^2=0,90 za Cu-oblogu. Visoka vrijednost koeficijenta determinacije ukazuje na visok koeficijent korelacije r. U oba slučaja prisutna je jaka uzročna veza između *M/C* odnosa i izmjerene brzine mlaza. Nešto manja vrijednost koeficijenta determinacije kod Cu-obloge posljedica je većeg rasipanja mjernih rezultata. Za napomenuti je da jednadžbe vrijede samo za vrijednosti unutar intervala *M/C* za koje je mjerenje provedeno. Matematički, vrijednosti brzine ponovo rastu s vrijednostima odnosa *M/C* većim od dva, odnosno smanjivanjem mase eksplozivnog punjenja došlo bi do porasta brzine obloge što fizikalno nije moguće.

Izmjerena brzina mlaza Cu-obloge, u pravilu je manja od brzine mlaza Al-obloge. Razlike u brzinama povećavaju se smanjenjem odnosa *M/C*. Razlike izmjerenih brzina mlaza za aluminijske i bakarne obloge pri jednakim odnosima *M/C* predstavljaju odstupanje u odnosu na postavke navedenih teorija (Birkhoff i PER). Izmjerene brzine mlaza su manje u odnosu na brzine mlaza proračunate Birkhoffovim modelom ili PER teorijom.

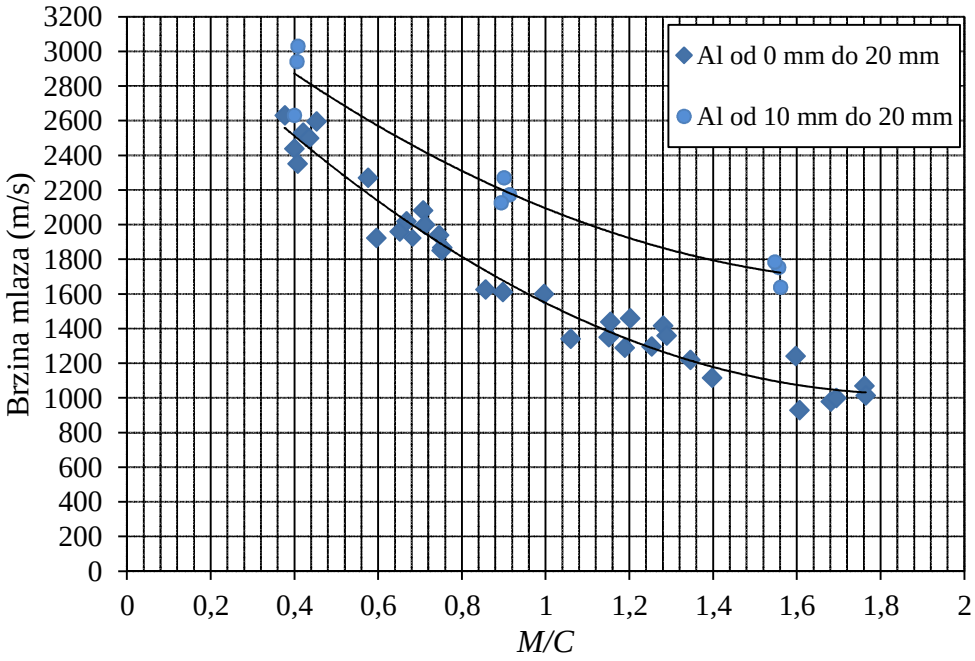
Navedene teorije i modeli pojednostavljuju složeni proces i ne uzimaju u obzir utjecaj svojstava ubrzanog metala, odnosno materijala obloge. S druge strane, izmjerena brzina mlaza je prosječna brzina mlaza na segmentu od 0 mm do 20 mm, a ne najveća vrijednost kojom se ulazi u proračune prema navedenim teorijama.

S ciljem utvrđivanja maksimalne brzine mlaza linijskih kumulativnih rezača s Al-oblogom izvedeno je mjerenje brzine mlaza pri različitom razmaku svjetlovoda te mjerenje brzine mlaza na pojedinim segmentima.

Iz grafičkog prikaza izmjerenih brzina Al-obloge pri različitom razmaku svjetlovoda može se zaključiti da brzina aluminijske obloge raste sa udaljavanjem od baze linijskog kumulativnog rezača. S obzirom da su mjerene prosječne brzine na segmentima duljine: 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm i 50 mm, može se utvrditi porast brzine mlaza sa porastom udaljenosti ali se ne može odrediti točka maksimalne brzina mlaza. Mjerenja brzine mlaza Al-obloge na pojedinim segmentima, čija se pozicija mijenjala unutar okomite osi, izvedena su u svrhu određivanja najveće brzine mlaza i prostornog položaja mlaza najveće brzine. Brzine su mjerene na segmentima duljine 10 mm na udaljenostima od rezača: 0 mm, 10 mm, 20 mm i 30 mm.

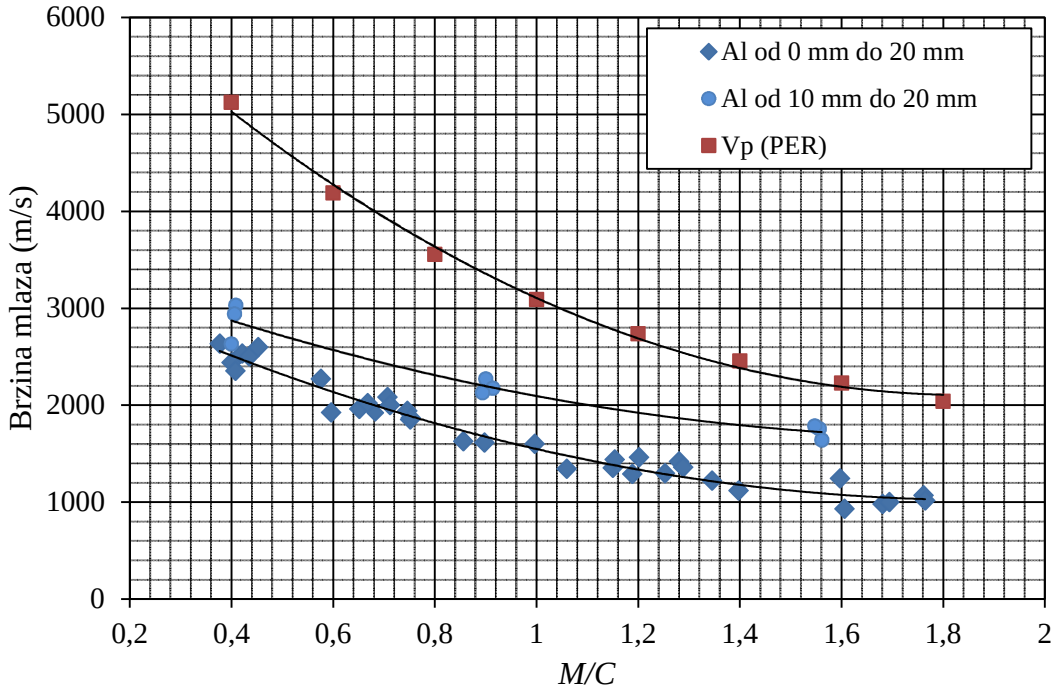
Iz grafičkog prikaza izmjerenih brzina za različite odnose *M/C* po pojedinom segmentu vidljivo je da za različite *M/C* odnose brzina raste na segmentu od 10mm do 30mm, a zatim opada Iz rezultata mjerenja može se zaključiti da se optimalan odmak nalazi u području između 10 mm i 30 mm.

Rezultati opisanog mjerenja brzine Al-obloge na segmentu od 0 mm do 20 mm uspoređeni su s rezultatima mjerenja na segmentu od 10 mm do 20 mm. Grafički prikaz usporedbe rezultata prikazan je na Slici 6-47.



Slika 6-47. Usporedba rezultata mjerenja brzine Al-obloge na segmentima od 0 mm do 20 mm i od 10 mm do 20 mm za različite *M/C* odnose.

Iz usporednih rezultata mjerenja vidljivo da su korelacijske krivulje slične. Vrijednosti izmjerene brzine mlaza na segmentu od 10 mm do 20 mm su približno 500 m/s veće u odnosu na one izmjerene na segmentu od 0 mm do 20mm. Razlika u brzini po segmentima opada sa odnosom *M/C*. Nedostatak ovog načina mjerenja je relativno mali razmak između svjetlovoda koji iznosi 10 mm. U tom slučaju, greška od 1 mm prilikom postavljanju svjetlovoda rezultira pogreškom mjerenja od 10%. Iako je mjerenjima zabilježen porast brzine mlaza u odnosu na segment od 0 mm do 20 mm, mjereni rezultati su znatno manji od rezultata brzina mlaza koje se proračunavaju primjenom Birkhoffovog modela ili PER teorije. Na Slici 6-48. je prikazan odnos između izmjerenih brzina mlaza i brzine primarnoga mlaza (v_p) proračunate prema PER teoriji.



Slika 6-48. Odnos između izmjerenih brzina mlaza i brzine primarnoga mlaza proračunate prema PER teoriji

Pri proračunu su korištene sljedeće vrijednosti i jednadžbe:

$\sqrt{2E_g}$=2337 m/s (prema jednadžbi (5-8), v_d = 7200 m/s),

v_0 - izračunata prema jednadžbi (5-6),

v_p - izračunata prama jednadžbi (5-40),

α=45º, kut obloge prije urušavanja,

δ=10º, Taylorov kut i

β=65 º, kut obloge pri urušavanju ($\beta=\alpha+2\delta$).

Na osnovi izmjerenih rezultata brzine mlaza moguće je, u skladu sa hidrodinamičkom teorijom, izračunati brzinu penetracije mlaza u materijalu mete prema jednadžbi (Zukas 1990):

$$v_{\text{pen}} = \frac{v_{\text{ml}}}{1+\sqrt{\rho_{\text{met}}/\rho_{\text{ml}}}} \tag{6-4}$$

gdje je:

v_{pen} - brzina penetracije (m/s),

v_{ml} - brzina mlaza (m/s),

ρ_{met} - gustoća materijale mete (kg/m^3) i

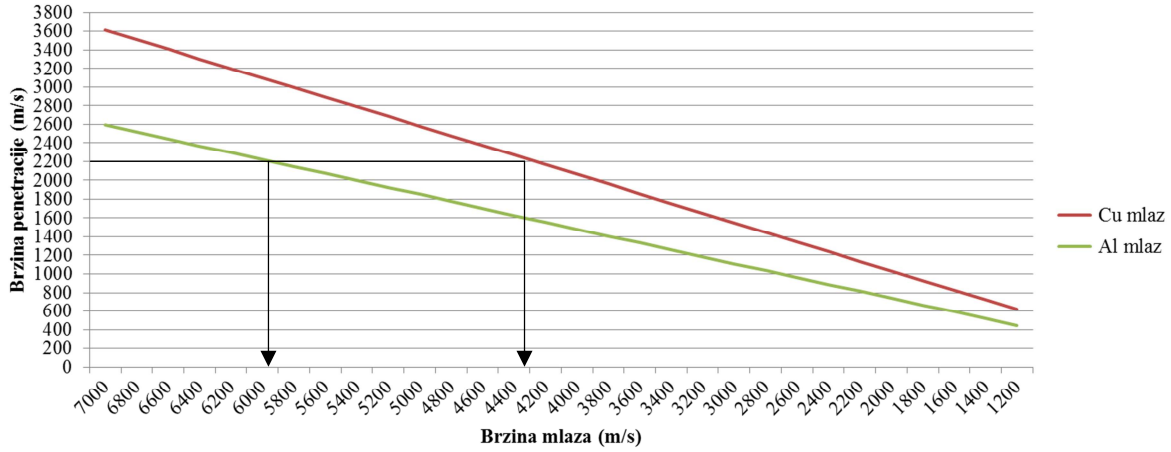
ρ_{ml} - gustoća materijale mlaza (kg/m^3).

Kritična brzina penetracije mlaza u nekom materijalu meti je najmanja brzina pri kojoj je moguće postići penetraciju. Mnogi autori su eksperimentalnim putem pokušali odrediti kritičnu brzinu penetracije mlaza konusnih kumulativnih perforatora u čelik. Eksperimentalno određene kritične brzine penetracije mlaza u čeliku prikazane su Tablicom 6-14.

Tablica 6-14. Kritična brzina penetracije mlaza konusnih perforatora u čeliku (Ugričić 2003)

	Materijal	Gustoća (kg/m^3)	Kritična brzina penetracije (m/s)	Autori
Mlaz Meta	Cu Čelik	8930 7850	2225	Ugričić
Mlaz Meta	Čelik Čelik	7800 7850	2200	Baum i suradnici
Mlaz Meta	Cu Čelik	8960 7850	2200-2300	Held
Mlaz Meta	Cu Čelik	8930 7850	>2000	Defurneaux

Na osnovi jednadžbe (6-4) izrađen je dijagram na kojem su prikazani odnosi između brzine mlaza u zraku i brzine penetracije mlaza u čelik za Cu- i Al-oblogu. Korištena vrijednost za gustoću čelika preuzeta je iz tablice 6-14 i iznosi $\rho_{\text{čelik}}$=7850 kg/m^3, dok su korištene vrijednosti za gustoću Cu- i Al-obloge preuzete iz tablica karakteristika materijala obloge i iznose ρ_{Cu}=8940 kg/m^3 i ρ_{Al}=2710 kg/m^3. Na dijagram je zatim unesena vrijednost za kritičnu brzinu mlaza od 2200 m/s te je očitana brzina mlaza koja je potrebna za penetriranje mlaza u čeliku. Dijagram je prikazan na Slici 6-49.



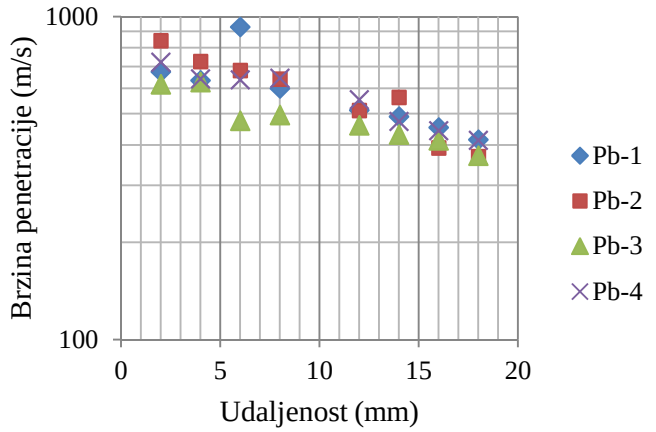
Slika 6-49. Odnos između brzine mlaza u zraku i brzine penetracije mlaza u čeliku

Na osnovi dijagrama očitane su vrijednosti brzine mlaza u zraku koje su potrebne za penetraciju mlaza u čelik. Očitana brzina za Cu-mlaz iznosi približno 4250 m/s, a za Al-mlaz približno 5950 m/s. Najveća izmjerena brzina mlaza iznosila je 3125 m/s, prilikom otpucavanja linijskog kumulativnog rezača s Al-oblogom i *M/C* odnosom 0,4. Usporedbom očitanih rezultata sa izmjerenim rezultatima brzine mlaza u zraku može se zaključiti da su izmjereni rezultati značajno manjih iznosa od proračunatih brzina mlaza potrebnih za penetraciju. Prema tome, izmjerenim brzinama mlaza nije moguće ostvariti penetraciju mlaza u čelik. Rezači konstrukcije i značajki jednakih rezačima korištenim za mjerenja brzine mlaza ostvarili su rez u čeliku. Rezultati mjerenja se stoga mogu interpretirati na sljedeće načine:

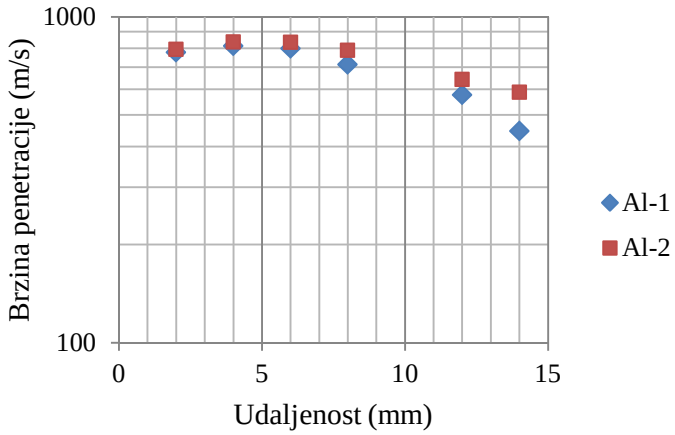
1. budući da su izmjerene brzine mlaza znatno manje od brzina konusnih perforatora, metoda mjerenja nije odgovarajuća, i
2. kritična brzina mlaza linijskih kumulativnih rezača potrebna za rezanje materijala manja je od kritične brzine penetracije konusnih perforatora.

Pregledom dostupnih podataka mjerenja brzine mlaza linijskih kumulativnih rezača utvrđeno je da su izmjerene brzine mlaza u skladu sa podacima mjerenja ostalih autora, odnosno potvrđena je prikladnost metode mjerenja brzine mlaza u zraku. Potvrda pretpostavke da je kritična brzina rezanja mlaza linijskih kumulativnih rezača manja u odnosu na kritičnu brzinu perforiranja kumulativnih perforatora pronađena je u radu Miyoshia i suradnika (Miyoshi et al. 2005). U radu su izneseni podaci o mjerenju brzine mlaza za linijske kumulativne rezače sa Al- i Pb-oblogom. Brzina mlaza je mjerena u zraku i prilikom penetracije mlaza u čelične ploče. Izmjerena brzina mlaza u zraku za rezače s aluminijskom oblogom iznosila je 2400 m/s, a izmjerena brzina penetracije u čeličnu metu za oba rezača iznosila je manje od 1000 m/s. Mjerenja su obavljana pri otpucavanju četiri rezača sa Pb-

oblogom i dva rezača s Al-oblogom. Izmjerene brzine penetracije mlaza u čeliku za rezače s Pb-oblogom prikazane su Slikom 6-50., a za rezače s Al-oblogom Slikom 6-51.



Slika 6-50. Brzina penetracije mlaza u čeliku, linijski kumulativni rezača s Pb-oblogom (Miyoshi et al. 2005)

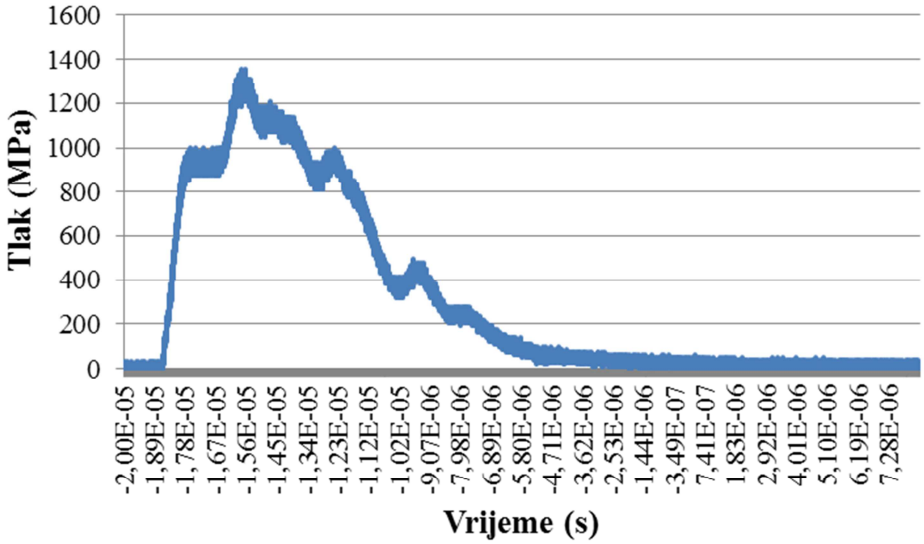


Slika 6-51. Brzina penetracije mlaza u čeliku, linijski kumulativni rezača s Al-oblogom (Miyoshi et al. 2005)

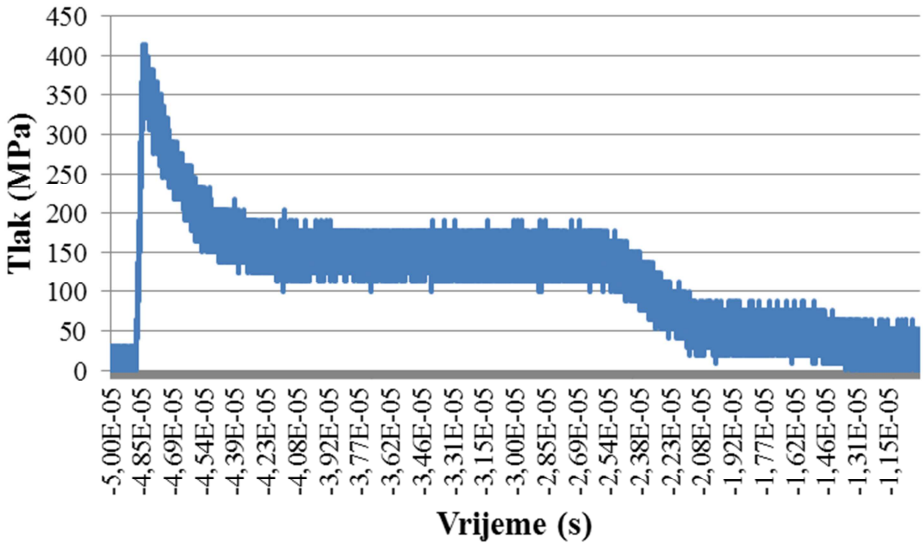
Rezultati mjerenja ukazuju da je brzina penetracije mlaza linijskih kumulativnih rezača do tri puta manja od kritične brzine perforacije mlaza konusnih perforatora u čelik. Iz navedenog može se zaključiti da se teorije i modeli, koji opisuju procese konusnih perforatora ne mogu neposredno, bez prilagodbe primijeniti na linijske kumulativne rezače.

6.3.5 Analiza mjerenja tlaka obloge prilikom nailaska na metu

Osciloskopom su zabilježeni rezultati mjerenja u obliku krivulje na čijoj je apscisi vrijeme, a na ordinati izmjereni napon. Za detaljnu analizu podataka, odnosno očitanje izmjerenog tlaka, vrijednosti izmjerenoga napona se preračunavaju u odgovarajuće tlakove. Izmjereni podaci su importirani u Excell te su upotrebom formule (6-1) i jednadžbe umjerne krivulje PVDF-osjetila dobiveni dijagrami izmjerenog dinamičkog tlaka. Na Slici 6-52. prikazan je dijagram tlaka za mjerni postav I, a na Slici 6-53. za mjerni postav II.



Slika 6-52. Dijagram tlaka u ovisnosti o vremenu - mjerni postav I



Slika 6-53. Dijagram tlaka u ovisnosti o vremenu - mjerni postav II

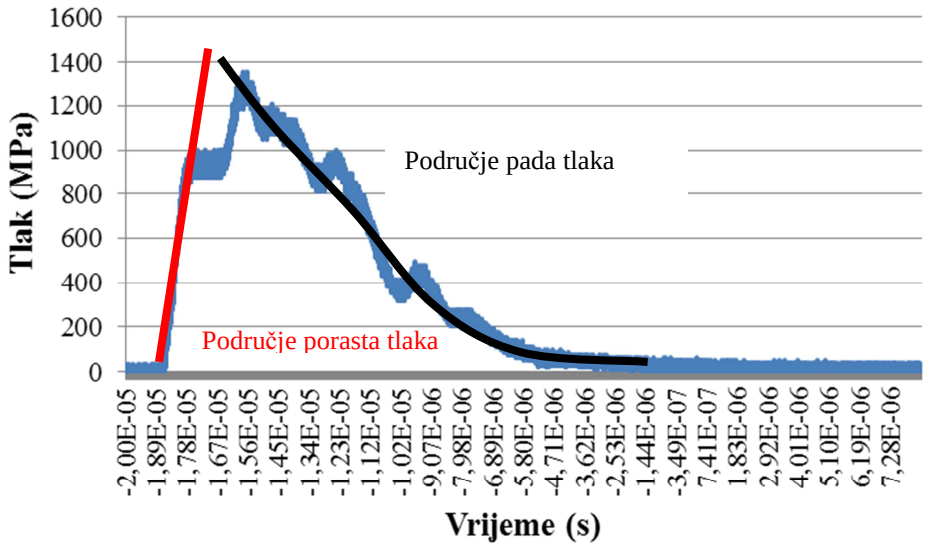
U Tablici 6-15. dani su vršni iznosi izmjerenoga tlaka i oblik signala za pojedini mjerni postav.

Tablica 6-15. Vršne vrijednosti izmjerenog tlaka i oblik signala za pojedino mjerenje

Pozicija senzora (mjerni postav)	Vršni tlak (GPa)	Oblik signala
Između Al-pločica (postav I)	1,358	Pozitivan s vrhom
Između stakla i AL-pločice (postav II)	0,415	Pozitivan s vrhom
Površina Al-pločice (postav III)	0,365	Oscilirajući

Analizom izmjerenih tlakova za tri različita mjerna postava može se zaključiti da je iznos izmjerenog tlaka za pojedini slučaj proporcionalan tvrdoći materijala tj. otporu koji materijal pruža prodiranju mlaza. Najveći iznos tlaka dobiven je prilikom mjerenja tlaka između dvije aluminijske pločice, manji između staklene i aluminijske pločice, a najmanji kada je osjetilo postavljeno na aluminijsku pločicu, odnosno u izravnom kontaktu s mlazom. Oblik mjernog signala ovisi o mjernom postavu. U prva dva slučaja oblik signala je sličnog oblika, a u trećem slučaju signal ima oscilirajući oblik.

Mjerni signal pri prvom mjernom postavu može se podijeliti na dva područja u skladu sa Slikom 6-54.



Slika 6-54. Područje porasta i pada mjerenog tlaka

Nakon kontakta između mlaza i materijala mete, mjereni tlak naglo počinje rasti. Tlak raste sve dok iznos kinetičke energije mlaza ne premaši tvrdoću materijala mete. Najveća izmjerena vrijednost tlaka je u trenutku kada je kinetička energija mlaza jednaka najvećem otporu materijala, odnosno tlačnoj čvrstoći. Nakon toga počinje penetracija mlaza u materijal,

odnosno rezanje materijala, materijal teče i mjereni tlak pada. Tlak mlaza pada do trenutka kada se smanji kinetička energija mlaza ili do trenutaka kada mlaz presiječe metu.

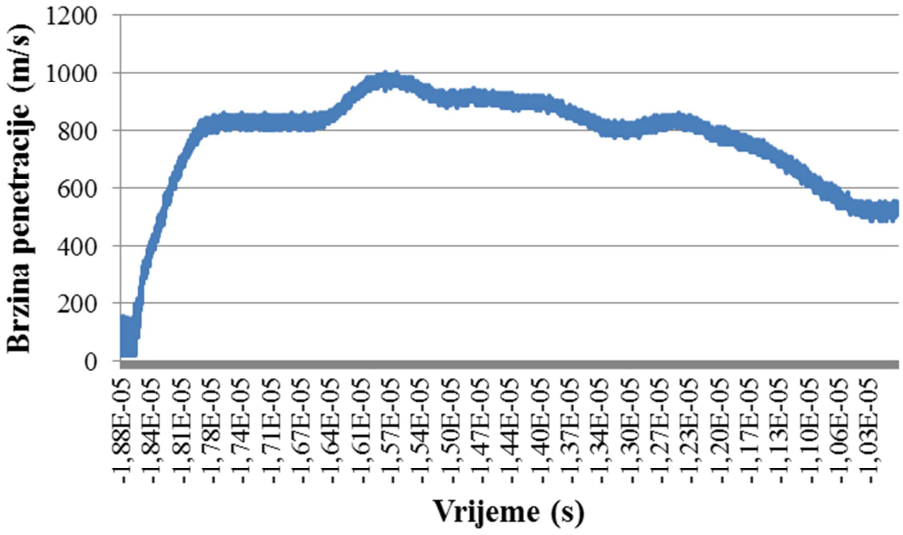
Za inženjerske potrebe se koristi jednadžaba prema kojoj tlak u točki sudara između materijala i mete iznosi (Zukas 1990):

$$p_s = 0{,}5\rho_m v_p^2 \tag{6-5}$$

gdje je:

p_s - tlak u točki sudara (Pa),
ρ_m - gustoća materijala mete (kg/m^3) i
v_p - brzina penetracije (prodiranja) kroz metu (m/s).

S obzirom da je brzinu penetracije linijskih kumulativnih rezača prilikom prolaska kroz metu iznimno teško izmjeriti, pomoću jednadžbe (6-5) i izmjerenih podataka za tlak kad je osjetilo bilo između dvije Al pločice proračunata je brzina penetracije mlaza u aluminijskoj meti. Prilikom proračuna korištena je gustoća za Al metu od 2700 kg/m^3. Dijagram penetracije u aluminijsku metu prikazan je Slikom 6-55.

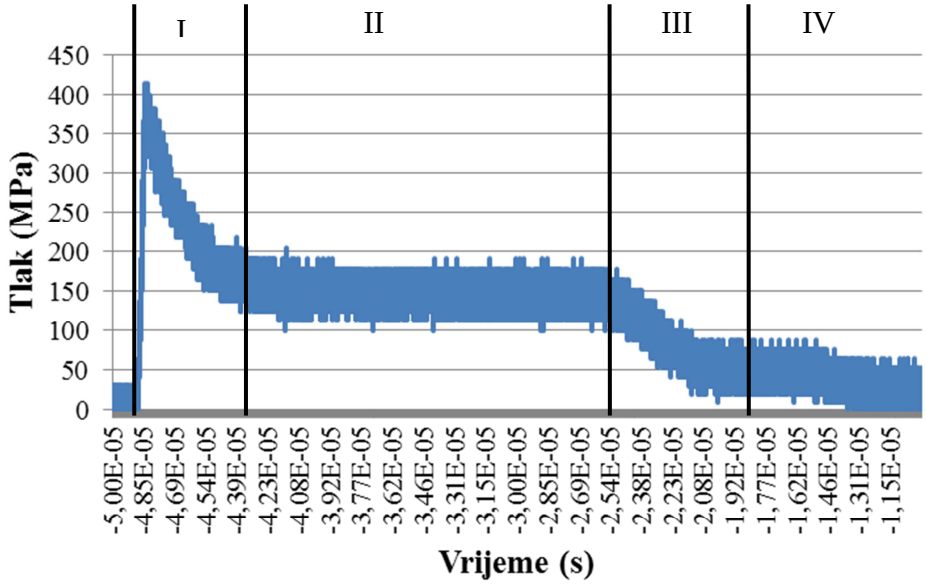


Slika 6-55. Brzina penetracije mlaza u Al-metu

Maksimalna izračunata brzina penetracije mlaza kroz aluminij iznosi 1003 m/s. Brzina je približno jednaka polovici brzine mlaza izmjerenog u polistirenu za jednaki *M/C* odnos što je u skladu sa teoretskom pretpostavkom da je brzina prodiranja mlaza, ukoliko se koristi isti materijal mete i obloge, po iznosu jednaka polovici brzine mlaza u zraku. Treba napomenuti da tlak nije mjeren u točki kontakta mlaza i mete već između dvije aluminijske mete.

Rezultati mjerenja potvrđuju pretpostavku u manjoj kritičnoj brzini penetracije mlaza linijskih kumulativnih rezača u odnosu na mlaz konusnih perforatora.

Dijagram mjerenog tlaka drugog mjernog postava se može interpretirati u skladu sa teorijom penetracije projektila velike brzine. Teorija razlikuje četiri različita stadija penetracije (Christmas & Gehring 1966). Stadiji penetracije u skladu sa teorijom prikazani su na Slici 6-56.



Slika 6-56. Stadiji penetracije projektila visoke brzine

I stadij – uslijed kontakta projektila i mete generira se visoki tlak između projektila i mete. Visoki tlak se javlja zbog tromosti materijala mete. Karakteristika prvog stadija je visok iznos mjerenog tlaka i kratko vrijeme trajanja.

II stadij – predstavlja područje stabilne penetracije. U ovom stadiju udarni valovi djeluju iz točke kontakta projektila i mete u oba materijala; mete i projektila. Projektil troši kinetičku energiju uzrokujući penetraciju u materijal mete te se brzina prodiranja konstantno smanjuje. Stadij karakterizira konstantan iznos tlaka kroz određeno vremensko razdoblje.

III stadij –. Stadij kavitacije nastupa kada se kinetička energija projektila u potpunosti istroši. Krater nastao djelovanjem projektila, nastavlja se povećavati uslijed energije zarobljene u materijalu mete. Stadij traje dok energija udarnih valova ne postane premala u odnosu na čvrstoću materijala. Za ovaj stadij je karakterističan konstantan pad tlaka kroz određeno vremensko razdoblje.

IV stadij – stadij karakterizira reakcija mete nakon što je prodiranje završeno. Eksperimentima je dokazano nekoliko različitih reakcija mete nakon što se udarni val priguši na vrijednost pri kojoj penetracija više nije moguća.

6.4 Druga skupina ispitivanja

Pojedini čimbenici imaju različiti utjecaj na dubinu reza linijskih kumulativnih rezača. Značajan broj utjecajnih čimbenika zahtijeva prevelik broj ispitivanja, te se stoga prilikom istraživanja promatrao utjecaj onih čimbenika za koje je ocijenjeno da imaju najveći utjecaj na dubinu reza linijskih kumulativnih rezača. Promatrani čimbenici su:

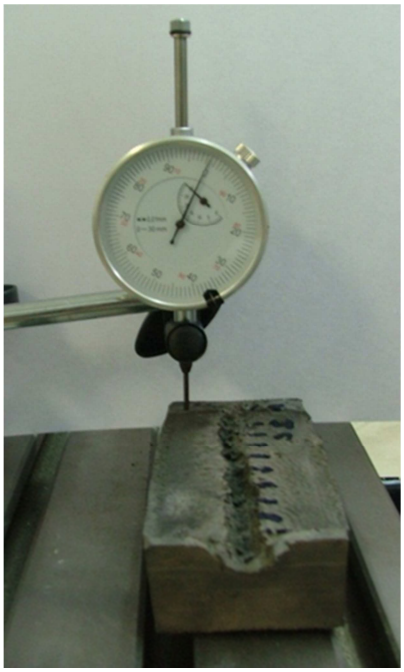
a) masa eksplozivnog punjenja linijskih kumulativnih rezača,
b) materijal obloge,
c) odmak linijskog kumulativnog rezača od mete,
d) način iniciranja linijskih kumulativnih rezača i
e) udio metalnog praha u eksplozivnom punjenju linijskih kumulativnih rezača.

Istraživanja unutar druge skupine ispitivanja su kvantificirala i kvalificira utjecaj pojedinog čimbenika na dubinu reza i odredila njihovu međusobnu vezu u svrhu postizanja maksimalne učinkovitosti linijskih kumulativnih rezača.

6.4.1 Mjerenje dubine reza

Učinak linijskih kumulativnih rezača ocijenjen je na osnovi dubine reza u ciljanom materijalu. Mjerenje dubine reza izvedeno je mikrourom mjernog područja od 0 mm do 30 mm. Mikroura se magnetnim stalkom pričvršćuje na posmični stol. Prije početka mjerenja ticalo mikroure se pozicionira na neporemećeni dio materijala mete. Na toj poziciji mikroura se dovede u položaj maksimalnog očitanja od 30 mm. Mjerenje dubine reza po pojedinom segmentu reza, izvodi se od točke iniciranja prema kraju reza. Mikroura se pozicionira na željenu poziciju uz očitanje vrijednosti dubine. Oduzimanjem izmjerene vrijednosti od prije postavljene vrijednosti očitanja izračunava se dubina reza. Izmjerene vrijednosti dubine reza i udaljenosti se, po potrebi, prenose u grafički prikaz koji predočuje karakteristični uzdužni presjek pojedinog reza.

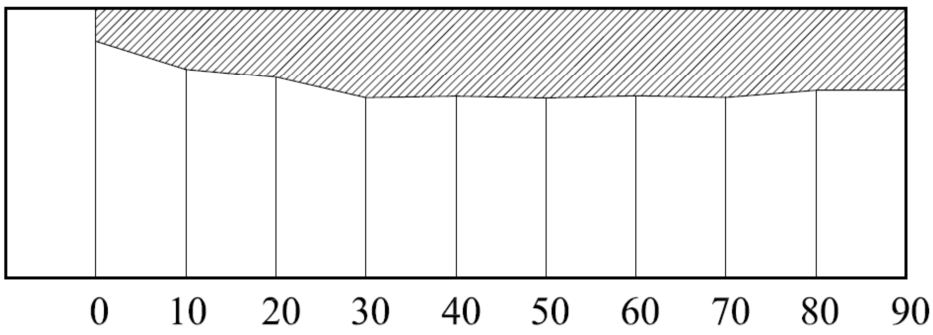
Na Slici 6-57. prikazan je način očitanja dubine reza mikrourom, na Slici 6-58. je fotografija karakterističnog poprečnog presjeka reza u metalu, a na Slici 6-59. je grafički prikaz karakterističnoga uzdužnog presjeka reza.



a) pozicioniranje mikroure prije početka mjerenja b) mjerenje dubine reza

Slika 6-57. Način očitanja dubine reza pomoću mikroure

Slika 6-58. Poprečni presjek reza u metalu



Slika 6-59. Grafički prikaz karakterističnoga uzdužnog presjeka reza

6.4.2 Utjecaj mase eksplozivnog punjenja, odmaka i materijala obloge

Masa eksplozivnog punjenja, odmak rezača od mete i materijal obloge linijskog kumulativnog rezača značajni su čimbenici koje je potrebno uskladiti za uspješno djelovanje i postizanje maksimalne dubine reza linijskog kumulativnog rezača.

Povećanjem specifične mase eksplozivnog punjenja po jedinici mase materijala obloge, smanjuje se odnos *M/C* i povećava dubina reza. Dubina reza raste do određene točke u kojoj je dubina reza maksimalna, a nakon toga daljnje povećavanje mase eksploziva ne doprinosi značajno povećanju dubine reza. Mjerenjem brzine mlaza u ravnini okomitoj na os rezača primjećuje se porast brzine mlaza s povećanjem mase eksplozivnog punjenja po jediničnoj masi obloge. Veća izmjerena brzina mlaza ne dovodi nužno i do veće dubine reza. Za postizanje veće dubine reza potrebna je i veća kinetička energija mlaza tijekom djelovanja na metu, odnosno potrebna je i veća masa mlaza.

Karakteristike materijala obloge utječu na dubinu reza. Različiti materijali, uglavnom metali, koriste se za oblogu linijskih kumulativnih rezača. Metali i karakteristike metala koji se najčešće koriste za materijal obloge opisani su u poglavlju 5.2.1.1.

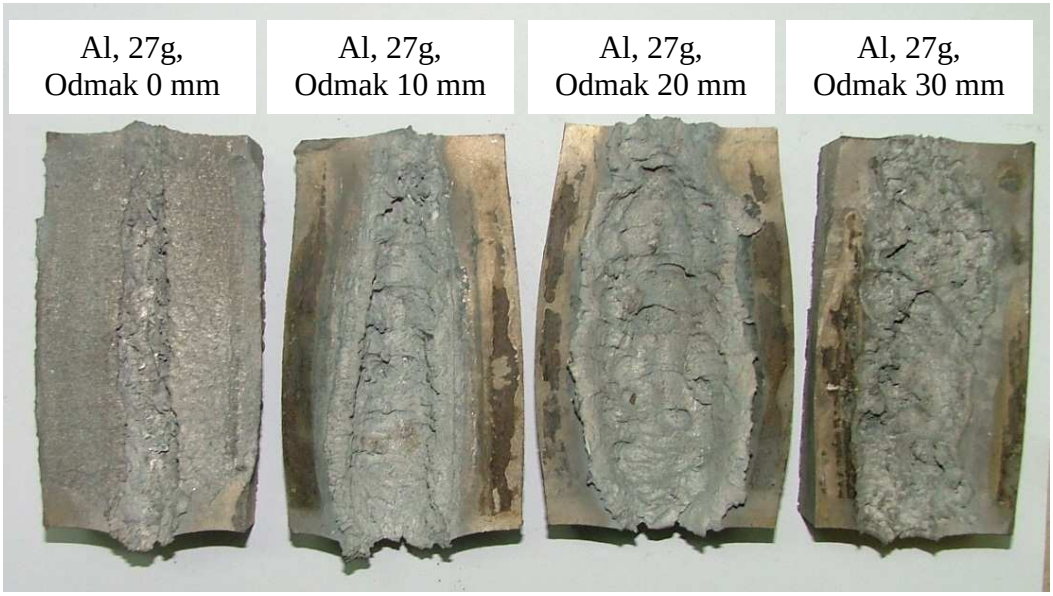
Optimalan odmak linijskog kumulativnog rezača od ciljanog materijala uzrokuje najdublji rez u meti. Manji ili veći odmak od optimalnog ima–za posljedicu manju dubinu reza. Utjecaj odmaka na dubinu reza prikazan je u poglavlju 5.2.5.

Za potrebe ispitivanja utjecaja mase eksplozivnog punjenja, odmaka i materijala obloge na dubinu reza ispitano je ukupno 48 linijskih kumulativnih rezača. Kumulativni rezači su podijeljeni u dvije grupe s obzirom na korišteni materijal obloge. Prvu grupu su činili rezači sa Al-oblogom debljine 1 mm, a drugu grupu rezači sa Cu-oblogom debljine 0,5 mm. Masa, debljina i kut obloge su bile konstantne kod svih uzoraka rezača, a mijenjana je masa eksplozivnog punjenja i odmak linijskog kumulativnog rezača od materijala mete. Mase eksplozivnog punjenja za rezače sa Al-oblogom iznosile su približno 14 g, 19 g i 27 g, a njima ostvareni *M/C* odnosi iznosili su 0,9; 0,7; i 0,5. Mase eksplozivnog punjenja za rezače sa Cu-oblogom iznosile su približno 15 g**,** 20 g i 27 g, a ostvareni *M/C* odnosi 1,4; 1,0; i 0,8. Odabrani su odmaci od 0 mm, 10 mm, 20 mm i 30 mm. Najveća masa eksplozivnog punjenja ograničena je s obzirom na mogućnosti laboratorijske ispitne bombe, odnosno komore.

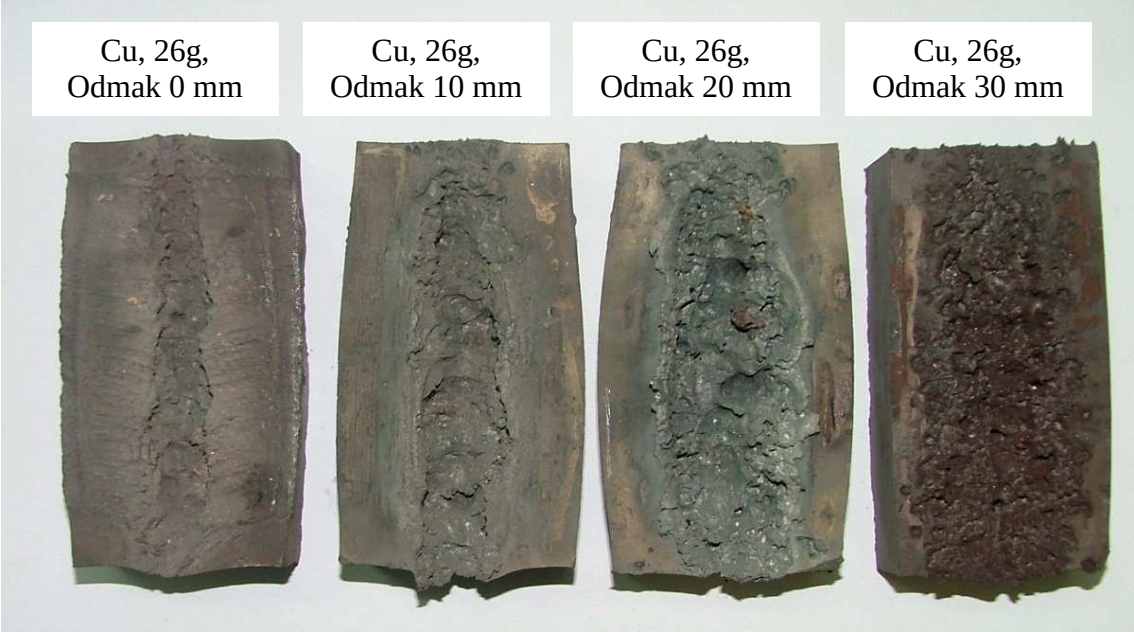
Različiti su odmaci ostvareni drvenim letvicama dimenzija 10x10 mm, 20x10 mm i 30x10 mm postavljenim između mete i linijskog kumulativnog rezača. Ispitivanja su obavljena s aluminijskim metama u kojima linijski kumulativni rezači imaju veću učinkovitost u odnosu na čelične mete, što omogućava jednostavniju i precizniju analizu reza

obzirom na utjecajne čimbenike. Prilikom analize mjerene su najveće i prosječne dubine rezova. Postav ispitivanja prikazan je na Slici 6-60, rezovi linijskog kumulativnog rezača s Al-oblogom Slikom 6-61., a rezovi linijskog kumulativnog rezača s Cu-oblogom Slikom 6-62.

Slika 6-60. Postav ispitivanja prilikom određivanja utjecaja mase eksplozivnog punjenja, odmaka i materijala obloge



Slika 6-61. Rezovi linijskih kumulativnih rezača s Al-oblogom pri različitim odmacima, masa eksplozivnog punjenja 27 g



Slika 6-62. Rezovi linijskih kumulativnih rezača s Cu-oblogom pri različitim odmacima, masa eksplozivnog punjenja 26 g

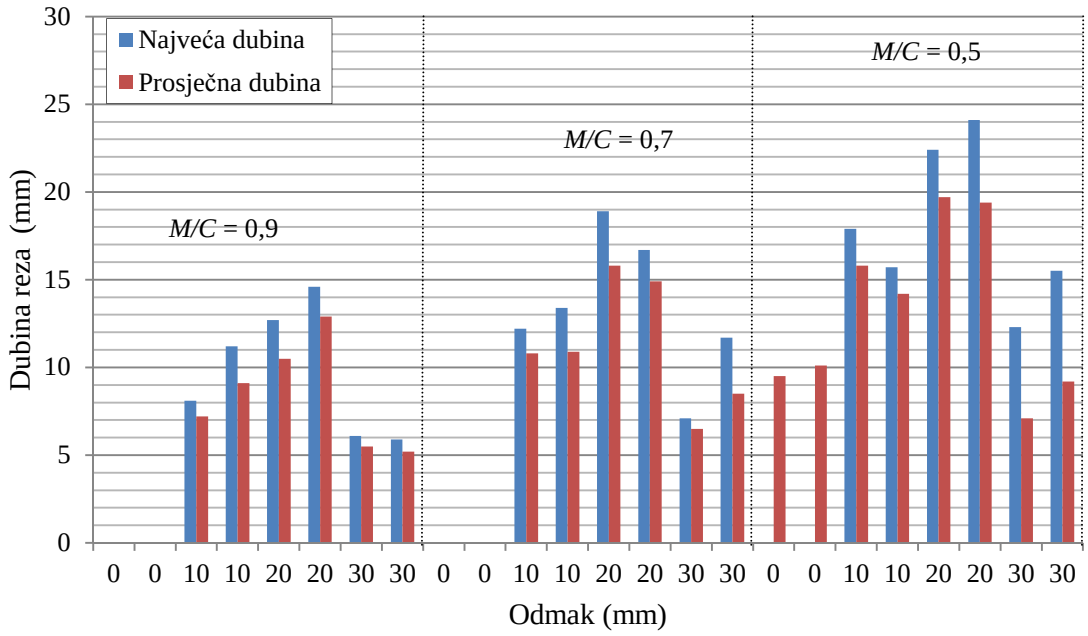
U Tablici 6-16. dane su konstrukcijske karakteristike rezača s Al-oblogom, odmak te najveća i prosječna dubina reza.

Tablica 6-16. Konstrukcijske karakteristike, odmak, najveća i prosječna dubina reza linijskih kumulativnih rezača s Al-oblogom.

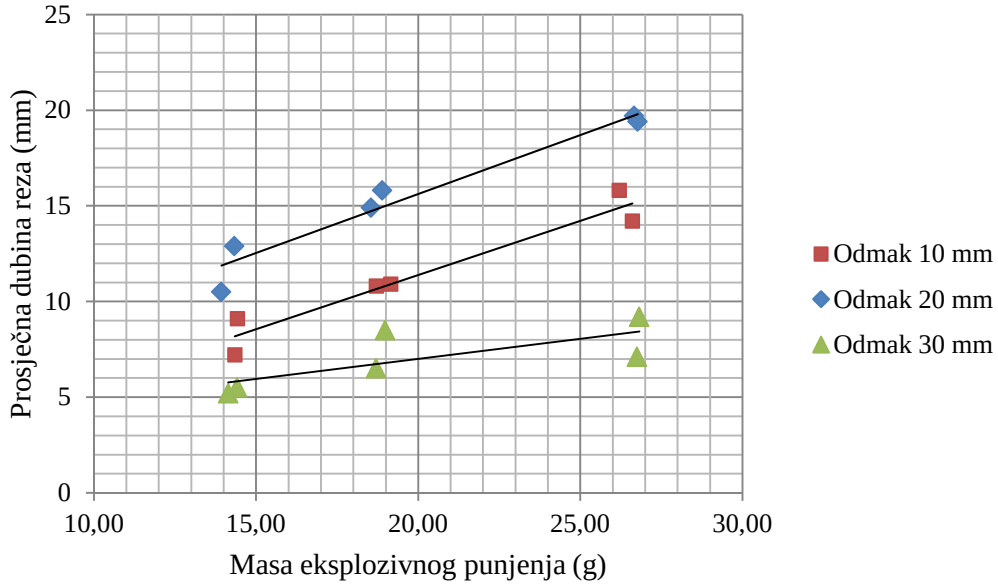
Redni broj	Debljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa uzorka (g)	Masa eksploziva (g)	*M/C*	Odmak (mm)	Najveća dubina reza (mm)	Prosječna dubina reza (mm)
1	1	12,93	27,07	14,14	0,9	0	*	*
2	1	12,98	26,77	13,79	0,9	0	*	*
3	1	12,95	27,30	14,35	0,9	10	8,1	7,2
4	1	13,14	27,57	14,43	0,9	10	11,2	9,1
5	1	12,97	26,90	13,93	0,9	20	12,7	10,5
6	1	12,94	27,27	14,33	0,9	20	14,6	12,9
7	1	13,14	27,56	14,42	0,9	30	6,1	5,5
8	1	13,14	27,28	14,14	0,9	30	5,9	5,2
9	1	13,19	32,28	19,09	0,7	0	*	*
10	1	13,20	32,61	19,41	0,7	0	*	*
11	1	12,99	31,70	18,71	0,7	10	12,2	10,8
12	1	13,02	32,18	19,16	0,7	10	13,4	10,9
13	1	12,91	31,80	18,89	0,7	20	18,9	15,8
14	1	13,01	31,56	18,55	0,7	20	16,7	14,9
15	1	13,03	31,73	18,70	0,7	30	7,1	6,5
16	1	13,06	32,04	18,98	0,7	30	11,7	8,5
17	1	12,96	39,68	26,72	0,5	0	*	9,5
18	1	13,11	39,70	26,59	0,5	0	*	10,1
19	1	12,90	39,11	26,21	0,5	10	17,9	15,8
20	1	12,99	39,60	26,61	0,5	10	15,7	14,2
21	1	13,04	39,70	26,66	0,5	20	22,4	19,7
22	1	12,96	39,73	26,77	0,5	20	24,1	19,4
23	1	13,05	39,80	26,75	0,5	30	12,3	7,1
24	1	13,00	39,82	26,82	0,5	30	15,5	9,2

* Dubinu reza nije bilo moguće izmjeriti zbog slijepljenog metala obloge u području reza

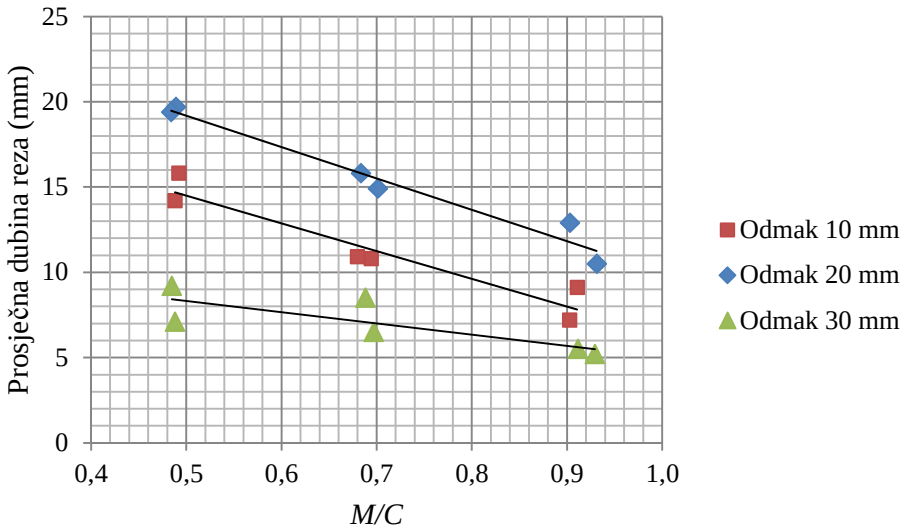
Na Slici 6-63. dan je grafički prikaz odnosa najveće dubine reza i prosječne dubine reza za pojedino mjerenje. Na slikama od 6-64. do 6-66. dan je utjecaj mase eksplozivnog punjenja, *M/C* odnosa i odmaka na prosječnu dubinu reza linijskih kumulativnih rezača.



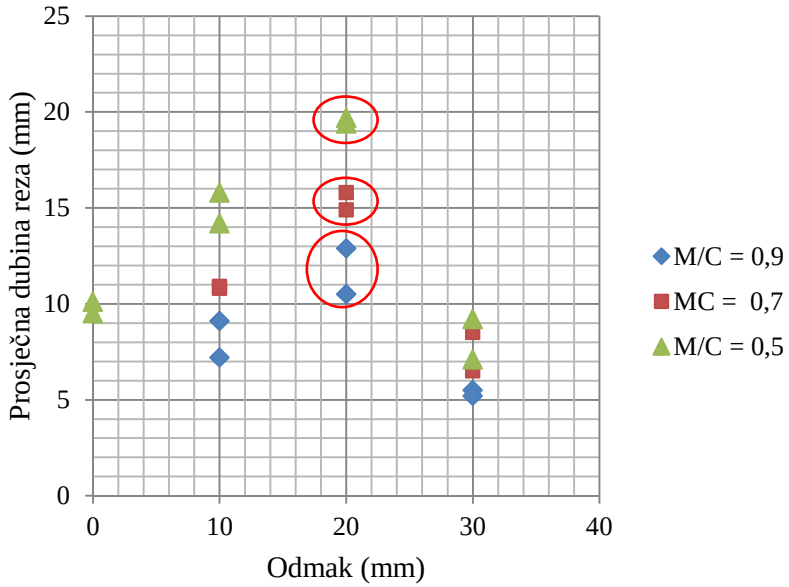
Slika 6-63. Najveća i prosječna dubina reza linijskih kumulativnih rezača sa Al-oblogom pri različitom odmaku i *M/C* odnosu



Slika 6-64. Utjecaj mase eksplozivnog punjenja na prosječnu dubinu, Al-obloga



Slika 6-65. Utjecaj *M/C* odnosa na prosječnu dubinu reza, Al-obloga



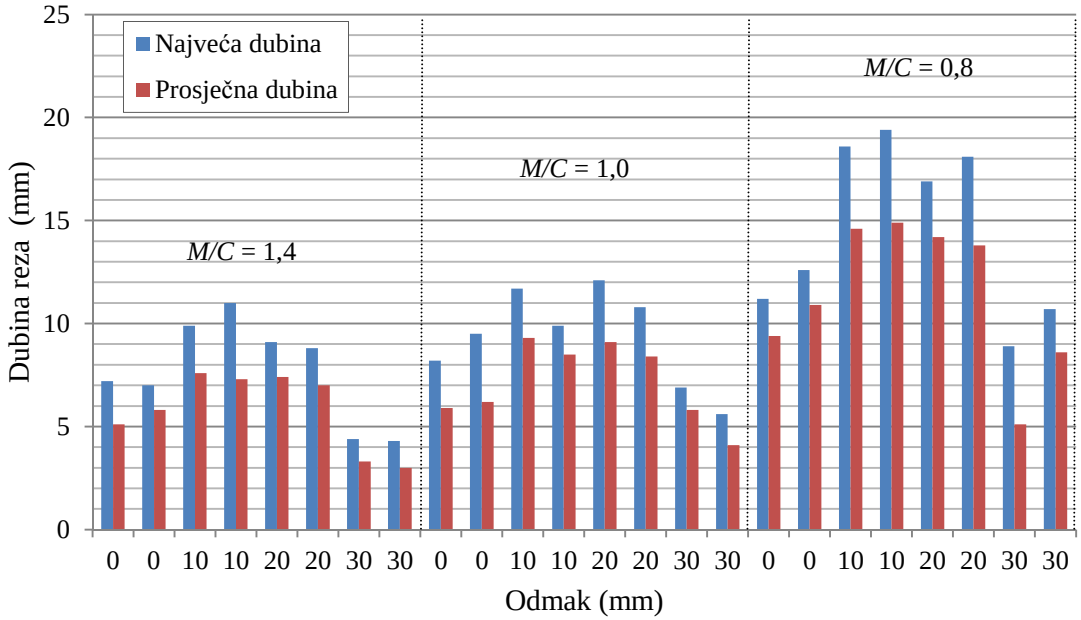
Slika 6-66. Utjecaj odmaka na prosječnu dubinu reza, Al obloga

U Tablici 6-17. dane su konstrukcijske karakteristike rezača s Cu-oblogom, odmak te najveća i prosječna dubina reza.

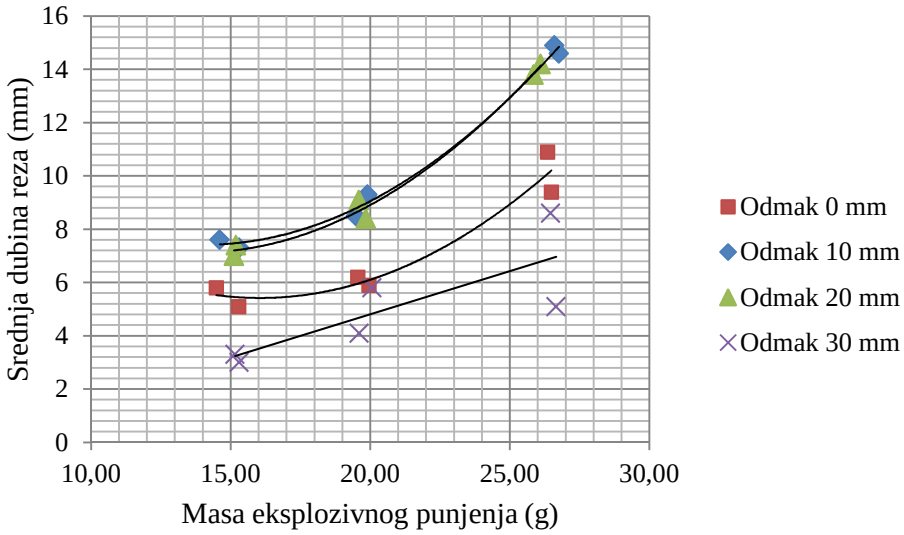
Tablica 6-17. Konstrukcijske karakteristike, odmak,najveća i prosječna dubina reza linijskih kumulativnih rezača s Cu-oblogom.

Redni broj	Debljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa uzorka (g)	Masa eksploziva (g)	*M/C*	Odmak (mm)	Najveća dubina reza (mm)	Prosječna dubina reza (mm)
1	0,5	20,75	36,04	15,29	1,4	0	7,2	5,1
2	0,5	20,95	35,44	14,49	1,4	0	7,0	5,8
3	0,5	20,70	35,31	14,61	1,4	10	9,9	7,6
4	0,5	20,72	36,02	15,30	1,4	10	11,0	7,3
5	0,5	20,95	36,14	15,19	1,4	20	9,1	7,4
6	0,5	20,83	35,95	15,12	1,4	20	8,8	7,0
7	0,5	20,91	36,07	15,16	1,4	30	4,4	3,3
8	0,5	20,72	36,03	15,31	1,4	30	4,3	3,0
9	0,5	19,99	39,95	19,96	1,0	0	8,2	5,9
10	0,5	20,43	39,99	19,56	1,0	0	9,5	6,2
11	0,5	20,19	40,09	19,90	1,0	10	11,7	9,3
12	0,5	20,36	39,85	19,49	1,0	10	9,9	8,5
13	0,5	20,40	39,99	19,59	1,0	20	12,1	9,1
14	0,5	20,08	39,93	19,85	1,0	20	10,8	8,4
15	0,5	20,44	40,50	20,06	1,0	30	6,9	5,8
16	0,5	20,37	39,97	19,60	1,0	30	5,6	4,1
17	0,5	20,29	46,78	26,49	0,8	0	11,2	9,4
18	0,5	20,10	46,46	26,36	0,8	0	12,6	10,9
19	0,5	20,29	47,05	26,76	0,8	10	18,6	14,6
20	0,5	20,00	46,60	26,60	0,8	10	19,4	14,9
21	0,5	20,35	46,46	26,11	0,8	20	16,9	14,2
22	0,5	20,36	46,21	25,85	0,8	20	18,1	13,8
23	0,5	20,03	46,69	26,66	0,8	30	8,9	5,1
24	0,5	20,05	46,51	26,46	0,8	30	10,7	8,6

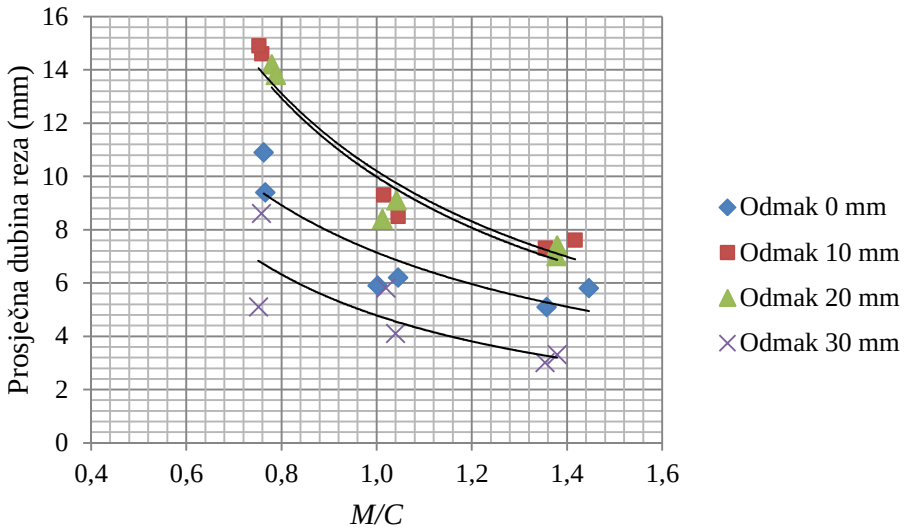
Na Slici 6-67. dan je odnos između najveće dubine i prosječene dubine reza za pojedino mjerenje. Na slikama od 6-68. do 6-70. dan je utjecaj mase eksplozivnog punjenja, *M/C* odnosa i odmaka na prosječnu dubinu reza linijskih kumulativnih rezača.



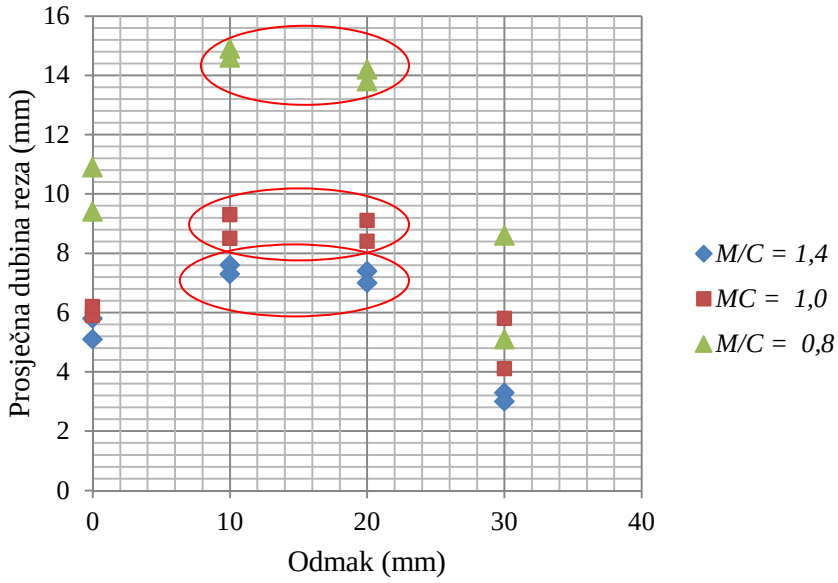
Slika 6-67. Najveća i prosječna dubina reza linijskih kumulativnih rezača sa Cu-oblogom pri različitom odmaku i *M/C* odnosu



Slika 6-68. Utjecaj mase eksplozivnog punjenja na prosječnu dubinu reza, Cu-obloga

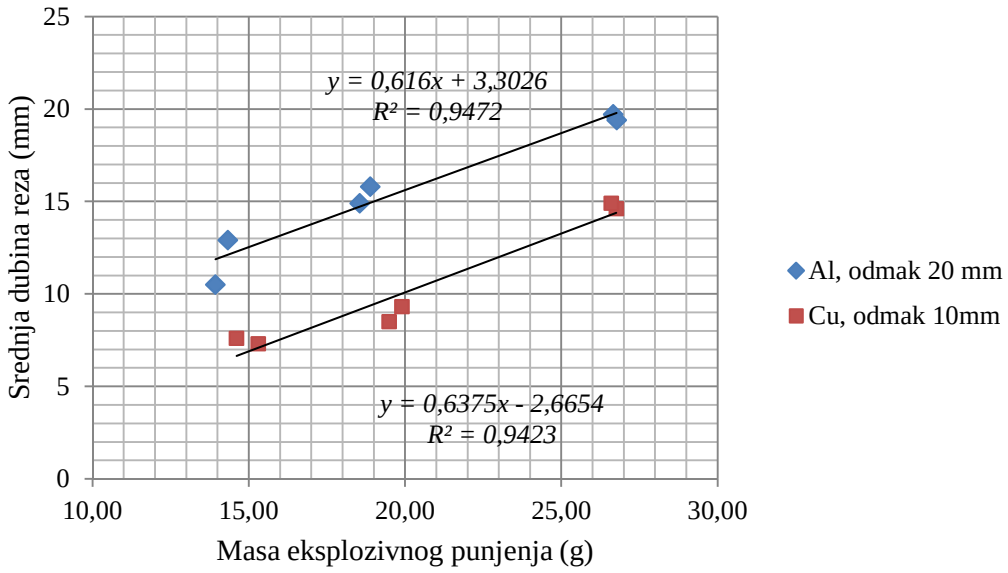


Slika 6-69. Utjecaj *M/C* odnosa na prosječnu dubinu reza, Cu-obloga

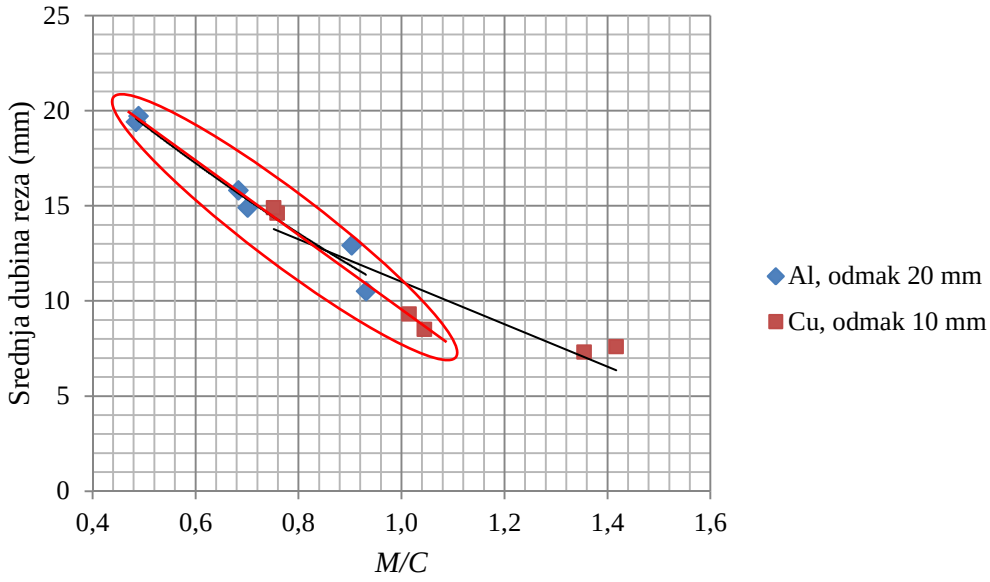


Slika 6-70. Utjecaj M/C odnosa na prosječnu dubinu reza, Cu-obloga

Na slikama 6-71. i 6-72. prikazan je usporedni prikaz ovisnosti dubine reza o materijalu obloge za rezače sa Cu- i Al- oblogom. Za referentne vrijednosti uzeti su odmaci kod kojih su rezači postigli najveću prosječnu dubinu reza. Utjecaj različitih materijala obloge na dubinu reza prikazani su s obzirom na masu eksplozivnog punjenja (Slika 6-71.) i *M/C* odnosa (Slika 6-72.).



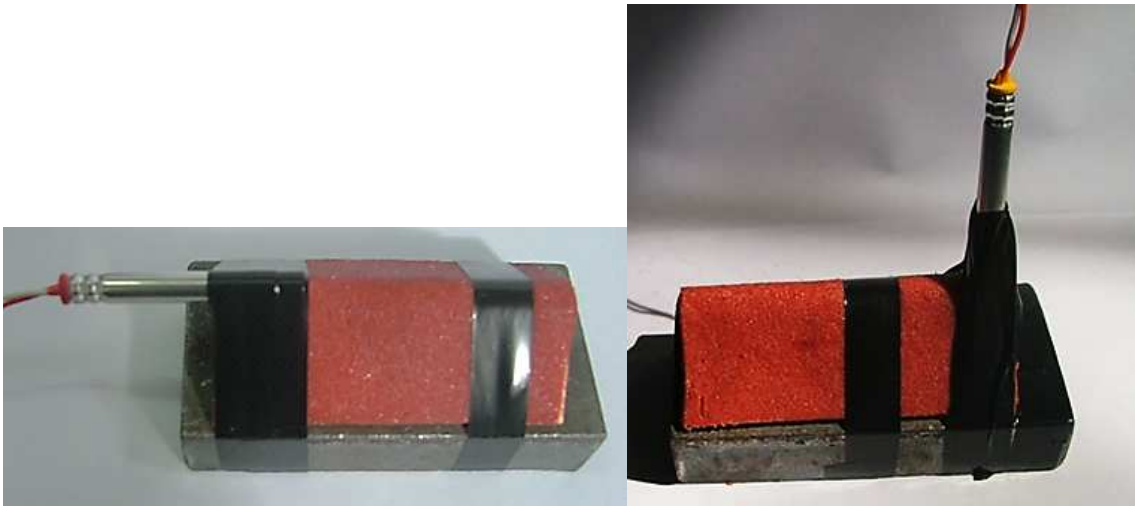
Slika 6-71. Utjecaj različitih materijala obloge na dubinu s obzirom na masu eksplozivnog punjenja



Slika 6-72. Utjecaj različitih materijala obloge na dubinu reza s obzirom na *M/C* odnos

6.4.3 Utjecaj načina iniciranja

S obzirom na položaj inicijalnog sredstva u odnosu na uzdužnu os linijskih kumulativnih rezača postoje dva načina iniciranja. Kod prvog načina iniciranja, os inicijalnog sredstva, odnosno detonatora, paralelna je uzdužnoj osi rezača, dok je kod drugog slučaja os inicijalnog sredstva okomita na uzdužnu os rezača. Karakteristično je kod linijskih kumulativnih rezača da je dubina reza na strani iniciranja manje dubine u odnosu na ostatak reza, što se objašnjava postizanjem stabilnog procesa rezanja kroz određeno vrijeme od trenutka iniciranja, odnosno na određenoj udaljenosti od točke iniciranja, postiže se ujednačena dubina reza do kraja djelovanja mlaza na metu. Vrijeme potrebno da rez postigne svoju maksimalnu dubinu određeno je duljinom segmenta reza sa manjom dubinom i mjeri se od točke iniciranja do mjesta postizanja ujednačene dubine reza. Engleski naziv za ovu pojavu je *run up* i nju su ispitivali Lim i Braid (Lim & Braid 2006). U praksi se ujednačenost dubine reza na ukupnoj duljini djelovanja rezača postiže upotrebom duljih rezača od rezanog dijela konstrukcije i postavljanjem mjesta iniciranja izvan rezanog elementa. Za potrebe ispitivanja konstruirano je osam linijskih kumulativnih rezača jednakih karakteristika. Polovica uzoraka otpucavana je s detonatorom paralelnim uzdužnoj osi, dok je kod otpucavanja druge polovice uzoraka detonator bio okomit na uzdužnu os linijskih kumulativnih rezača. Za ispitivanje prva dva uzorka korištene su čelične mete, a za ostale se koristila aluminijska meta. Nakon otpucavanja izmjerena je duljina reza nepotpune dubine. Na Slici 6-73. prikazan je postav ispitivanja prilikom određivanja utjecaja načina iniciranja na dubinu reza, a u Tablici 6-18. navedeni su konstrukcijski parametri rezača, način iniciranja i materijal mete.



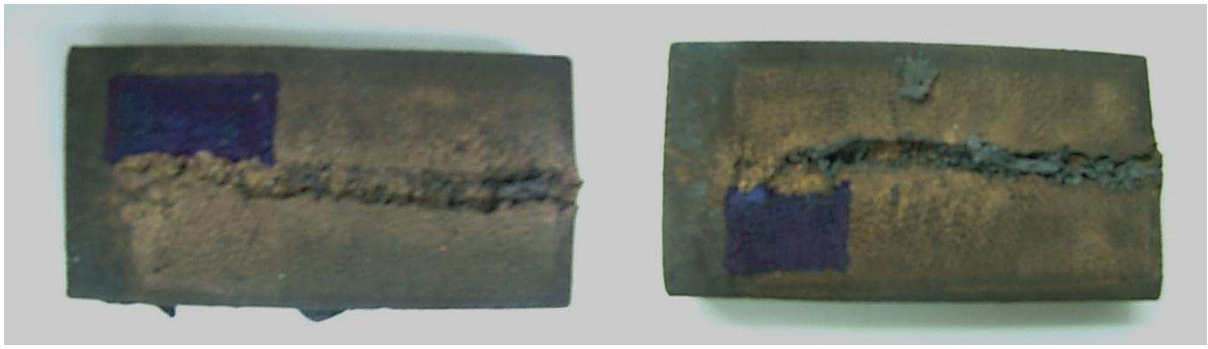
a)detonator paralelan s uzdužnom osi rezača b)detonator okomit na uzdužnu os rezača

Slika 6-73. Postav ispitivanja utjecaja načina iniciranja na dubinu reza

Tablica 6-18. Konstrukcijski parametri rezača, način iniciranja i materijal mete

Redni broj	Materijal obloge	Debljina obloge (mm)	Duljina obloge (mm)	Masa obloge (g)	Masa eksploziva (g)	*C/M*	Materijal mete	Način iniciranja
1	Cu	0,5	80	21,45	23,27	0,9	Čelik	Paralelno
2	Cu	0,5	80	21,62	24,01	0,9	Čelik	Okomito
3	Cu	0,5	80	21,19	23,25	0,9	Al	Paralelno
4	Cu	0,5	80	21,16	23,17	0,9	Al	Paralelno
5	Cu	0,5	80	21,29	23,66	0,9	Al	Paralelno
6	Cu	0,5	80	21,05	23,31	0,9	Al	Okomito
7	Cu	0,5	80	21,16	23,36	0,9	Al	Okomito
8	Cu	0,5	80	20,78	23,47	0,9	Al	Okomito

Duljina nepravilnog reza, i duljina reza pune dubine procijenjena su za uzorke pod rednim brojem 1 i 2 navedenih u Tablici 6-18. Dubina reza nije mjerena zbog male dubine reza u čeliku i zbog ostataka metala obloge u području reza. Procijenjena duljina nepravilnog reza iznosila je 31 mm u slučaju paralelnog iniciranja i 24 mm za slučaj okomitog iniciranja. Na Slici 6-74. prikazane su fotografije rezova u čeliku s obzirom na način iniciranja, a područje nepravilnog reza obilježeno je plavom bojom.

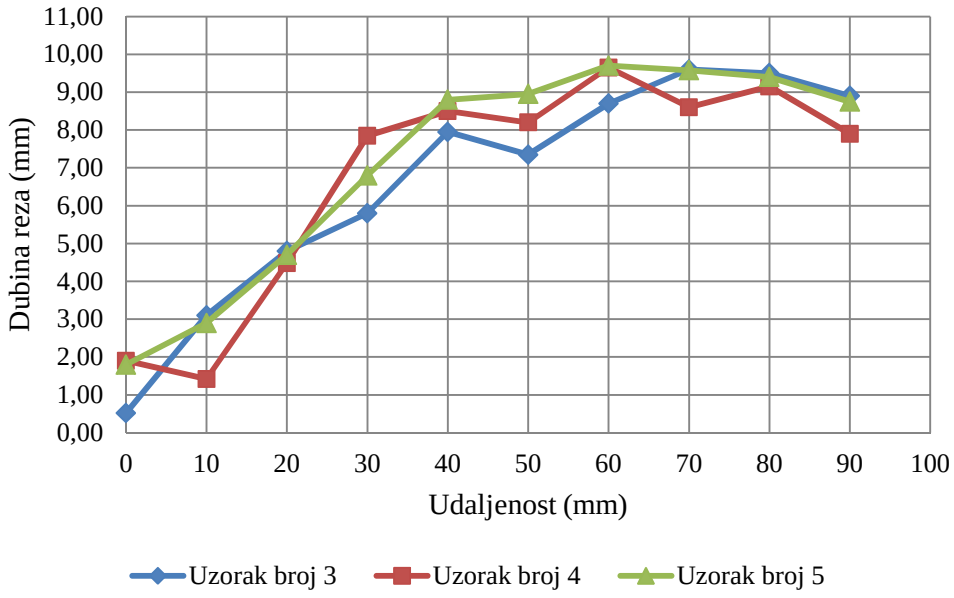


a)detonator paralelan s uzdužnom osi rezača b)detonator okomit na uzdužnu os rezača

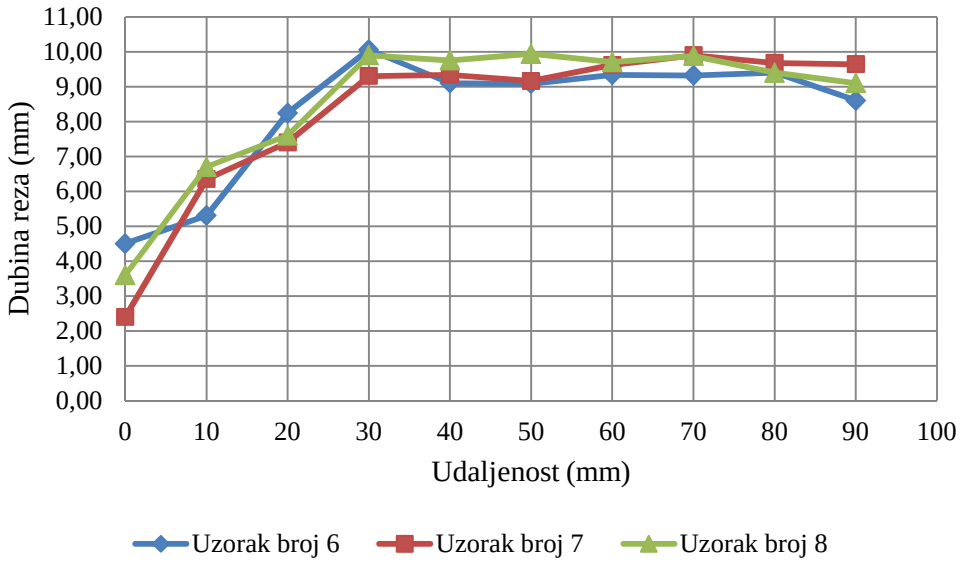
Slika 6-74. Postav ispitivanja utjecaja načina iniciranja na dubinu reza

Rezovi nastali u aluminijskoj meti su značajno dublji u odnosu na rezove u čeličnoj meti, te su za njih izrađeni grafički prikazi karakterističnih uzdužnih presjeka dubine reza. Na x-osi dijagrama nanesene su udaljenosti od točke iniciranja u mm, a vrijednosti na y-osi su izmjerene vrijednosti dubine reza za pojedinu udaljenost.

Dijagram uzdužnih presjeka reza za paralelno iniciranje prikazani su na Slici 6-75, a dijagram uzdužnih presjeka dubine reza za okomito iniciranje na Slici 6-76. U Tablici 6-19. navedene su izmjerene dubine reza za svaki rez.



Slika 6-75. Dijagram uzdužnih presjeka dubine reza, iniciranje paralelno s uzdužnom osi



Slika 6-76. Dijagram uzdužnih presjeka dubine reza, iniciranje okomito na uzdužnu os

Tablica 6-19. Izmjerene dubine reza pri različitom načinu iniciranja uzoraka

Uzorak broj 3										
Udaljenost (mm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dubina reza (mm)	0,52	3,10	4,80	5,80	7,95	7,35	8,70	9,60	9,50	8,90
Uzorak broj 4										
Udaljenost (mm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dubina reza (mm)	1,90	1,42	4,48	7,85	8,50	8,20	9,65	8,60	9,15	7,90
Uzorak broj 5										
Udaljenost (mm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dubina reza (mm)	1,80	2,90	4,70	6,80	8,80	8,95	9,70	9,58	9,40	8,75
Uzorak broj 6										
Udaljenost (mm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dubina reza	4,50	5,30	8,24	10,06	9,10	9,08	9,34	9,32	9,40	8,60
Uzorak broj 7										
Udaljenost (mm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dubina reza (mm)	2,40	6,35	7,40	9,30	9,34	9,16	9,62	9,90	9,68	9,64
Uzorak broj 8										
Udaljenost (mm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Dubina reza (mm)	3,60	6,70	7,60	9,90	9,75	9,94	9,70	9,88	9,40	9,10

6.4.4 Utjecaj metalnog praha u eksplozivnom punjenju

Aluminijski prah se često dodaje u komercijalne eksplozive poput ANFO i emulzijskih eksploziva. Osnovni čimbenici koji utječu na brzinu detonacije, u tom slučaju, su veličina i oblik čestica Al praha. Oksidacija aluminija je egzotermna reakcija koja se odvija prema jednadžbi:

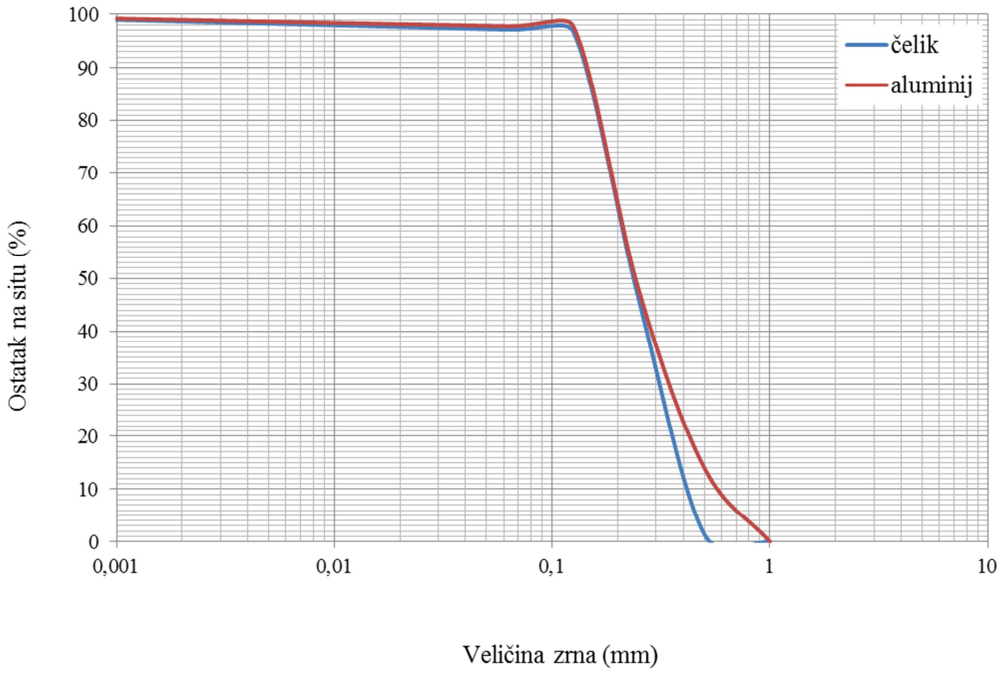
$$2Al + 1\,{}^{1}\!/_{2}\,O_2 \rightarrow Al_2O_3 \qquad (6\text{-}6)$$

Povećanjem koncentracije Al praha raste toplina eksplozije Q_v ali opada volumen plinova eksplozije V_p. Optimalna količina Al praha je ona pri kojoj je umnožak ove dvije veličine maksimalan (Akhavan 2004).

Dodavanje čeličnog praha imalo je svrhu povećanja gustoće eksplozivnoga punjenja i posredno, povećanja kinetičke energije mlaza.

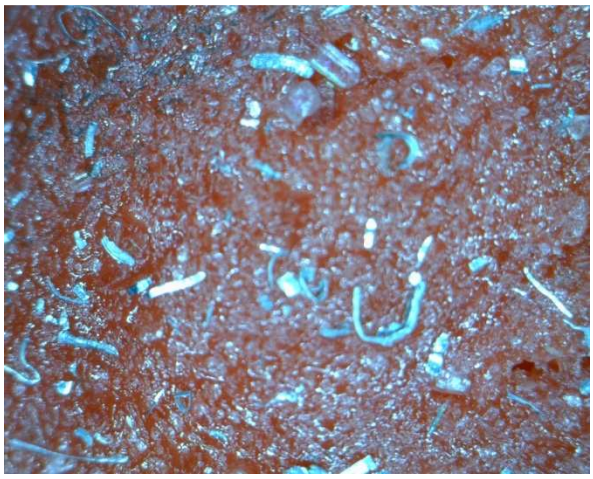
Ispitivanja su usmjerena određivanju utjecaja dodanog praha, aluminija i čelika, u različitim omjerima na dubinu reza linijskih kumulativnih rezača.

Prahovima je izmjerena gustoća i određen granulometrijski sastav. Izmjerena gustoća aluminijskog praha iznosila je 2,501 g/cm^3, a gustoća čeličnog praha 6,329 g/cm^3. Krivulja granulometrijskog sastava prahova prikazana je Slikom 6-77.

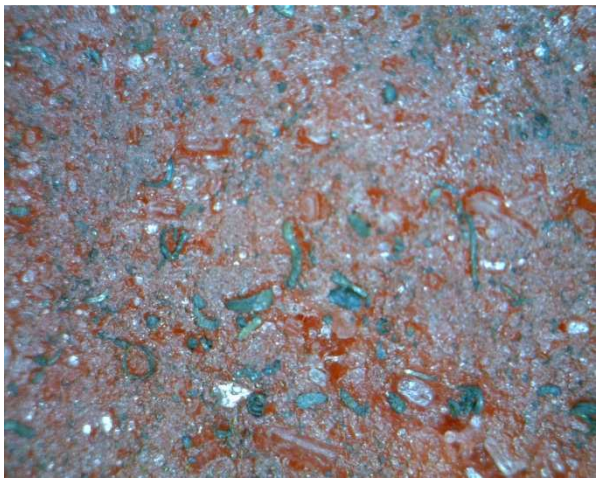


Slika 6-77. Granulometrijski sastav prahova

Na Slici 6-78. prikazan je eksploziv nakon dodavanja prahova snimljena mikroskopom sa uvećanjem 50 puta.



Struktura eksploziva s Al prahom

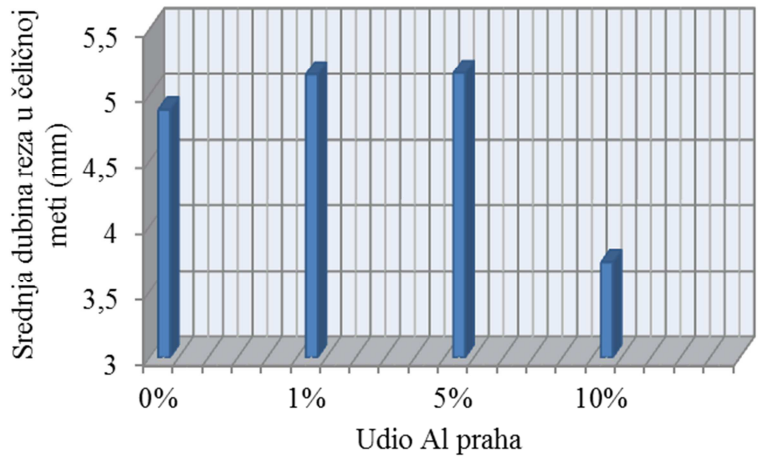


Struktura eksploziva s čeličnim prahom

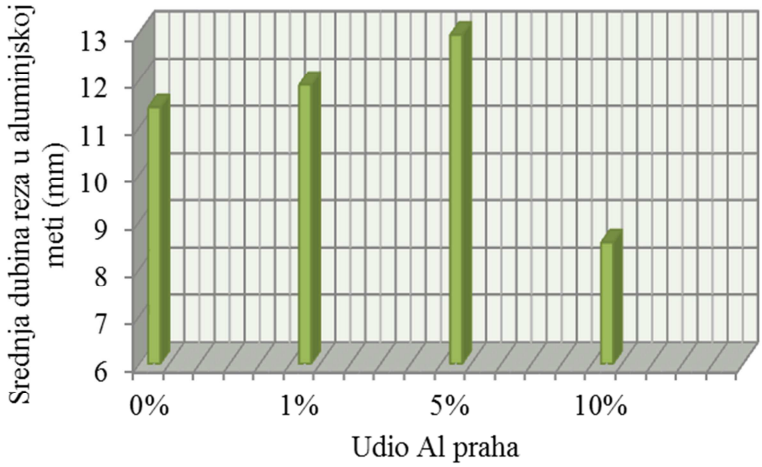
Slika 6-78. Eksploziv nakon dodavanja Al i čeličnog praha (uvećano 50 puta)

Eksplozivnom punjenju dodan je aluminijski ili čelični prah u masenom udjelu od 1 %, 5 % i 10 %. Masa eksplozivnog punjenja bila je konstantna i iznosila je 20 g. Za oblogu linijskih kumulativnih rezača korišten je aluminij debljine 1 mm. Za eksplozivno punjenje s aluminijskim prahom izrađeno je 40 uzoraka; 10 uzoraka sa eksplozivnim punjenjem bez praha, 10 uzoraka sa 1% Al praha, 10 uzoraka sa 5% Al praha i 10 uzoraka sa 10% Al praha. Polovica uzoraka je otpucana s čeličnim metama, a druga polovica s aluminijskim metama. Eksplozivno punjenje sa čeličnim prahom korišteno je za 5 uzoraka uz različitu postotnu koncentraciju praha (0%, 1% 5% i 10%), a uzorci su otpucani na aluminijskim metama. Nakon otpucavanja izmjerene su dubine reza za čelične i aluminijske mete. Dubina reza mjerena je na više mjesta uzduž reza te je na osnovi izmjerenih vrijednosti izračunata srednja dubina reza.

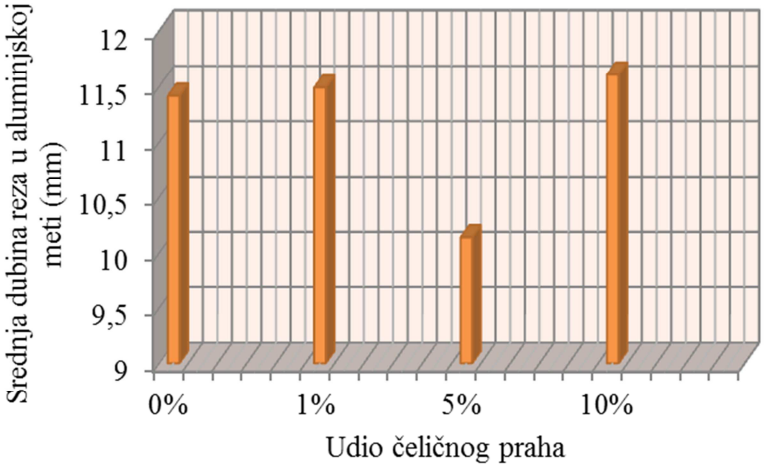
Prosječne dubine reza, s obzirom na materijal mete, za eksplozivno punjenje s različitim udjelima aluminijskog ili čeličnog praha prikazano je na slikama od 6-79. do 6-81. Pojedinačni rezultati mjerenja za sve uzorke dani su u prilogu broj 5.



Slika 6-79. Srednja dubina reza u čeličnoj meti s obzirom na udio Al- praha



Slika 6-80. Srednja dubina reza u aluminijskoj meti s obzirom na udio Al-praha



Slika 6-81. Srednja dubina reza u aluminijskoj meti s obzirom na udio čeličnog praha

Brojčani prikaz podataka dan je Tablicom 6-20.

Tablica 6-20. Srednje vrijednosti dubine reza u ovisnosti o vrsti praha, količini praha i materijalu mete.

Meta	Prah	Udio praha (%)	Srednja dubina reza (mm)
Al	-	0	11,14
Al	Al	1	11,9
Al	Al	5	12,96
Al	Al	10	8,56
Al	čelik	1	11,49
Al	čelik	5	10,14
Al	čelik	10	11,61
čelik	-	0	4,89
čelik	Al	1	5,15
čelik	Al	5	5,17
čelik	Al	10	3,73

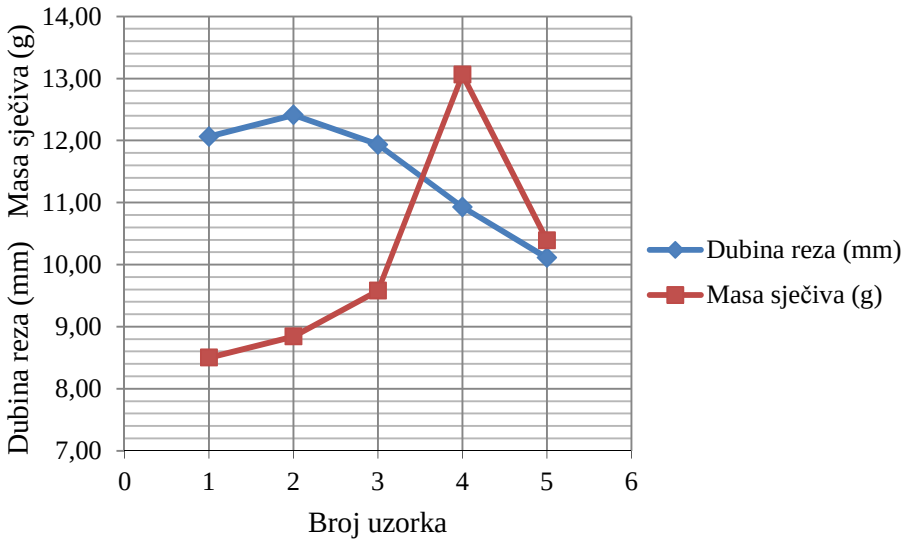
Prilikom upotrebe čeličnog praha dubina reza je znatno varirala i rez često nije bio pravilnog oblika.

Analizom ispitivanja oblika i stanja obloge nakon djelovanja udarnog vala eksplozivnog naboja evidentirana su tri različita oblika obloge nastalih nakon detonacije eksplozivnog punjenja: sječivo, mlaz i trakice. Zaključeno je da trakice ne učestvuju u procesu rezanja, međutim uloga sječiva u procesu rezanja nije objašnjena.

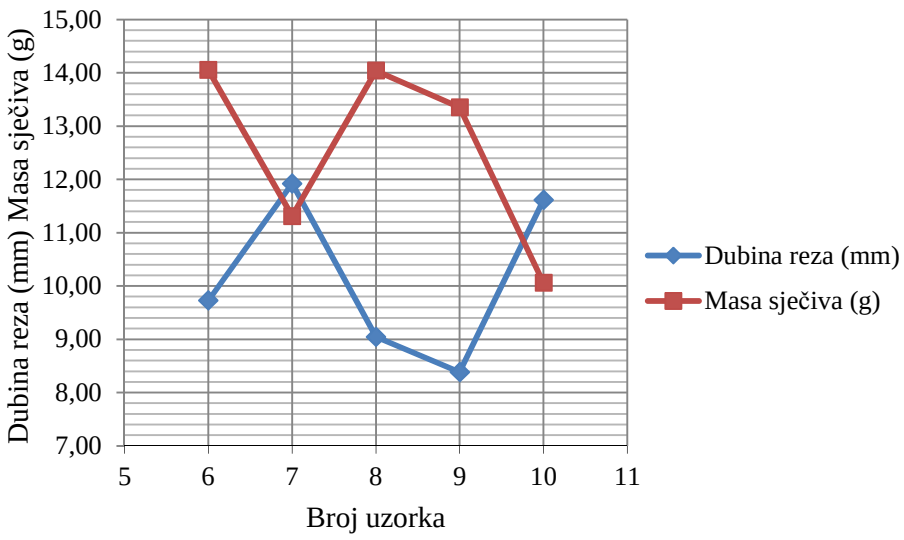
Nakon otpucavanja prikupljeni su i izvagani ostaci obloge u obliku sječiva s ciljem da se utvrdi odnos između mase sječiva i dubine reza. Ostaci obloge u obliku trakica nisu promatrani jer ne sudjeluju u procesu rezanja. Odnos prosječne dubine reza u aluminijskoj meti i izmjerene mase sječiva nakon otpucavanja pri različitom postotnom udjelu čeličnog praha za pojedino otpucavanje dan je Tablicom 6-21. Rezultati su grafički prikazani slikama od 6-82. do 6-84.

Tablica 6-21. Prosječna dubina reza i masa obloge nakon otpucavanja.

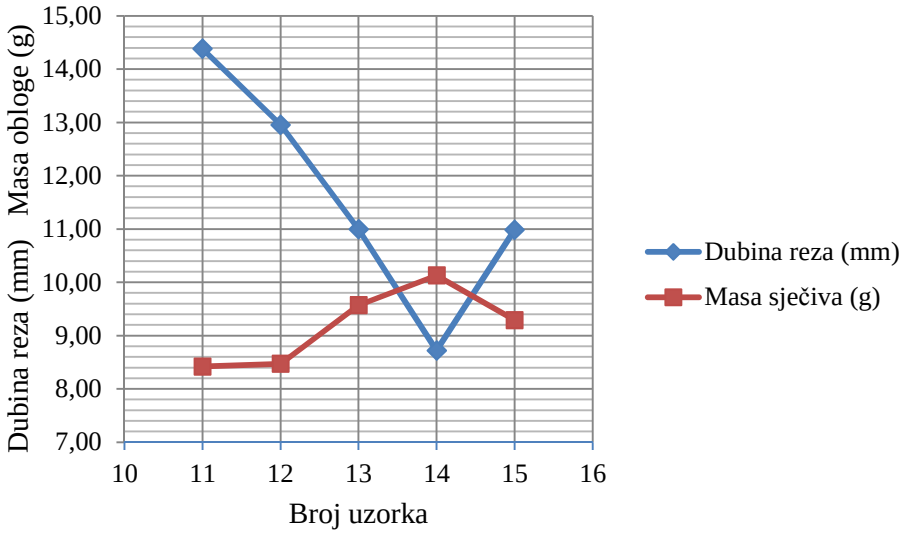
Broj uzorka.	Masa eksplozivne tvari (g)	Meta	Prah	Postotak praha (%)	Prosječna dubina reza (mm)	Masa sječiva (g)
1	20,07	Al	Č	1	12,06	8,5
2	20,09	Al	Č	1	12,41	8,84
3	20,09	Al	Č	1	11,93	9,58
4	20,04	Al	Č	1	10,93	13,06
5	20,07	Al	Č	1	10,11	10,39
6	20,08	Al	Č	5	9,73	14,05
7	20,09	Al	Č	5	11,92	11,31
8	20,07	Al	Č	5	9,04	14,04
9	20,08	Al	Č	5	8,38	13,35
10	20,09	Al	Č	5	11,61	10,06
11	20,08	Al	Č	10	14,38	8,42
12	20,09	Al	Č	10	12,95	8,47
13	20,1	Al	Č	10	11,00	9,57
14	20,05	Al	Č	10	8,72	10,13
15	20,07	Al	Č	10	10,98	9,29



Slika 6-82. Odnos mase sječiva i dubine reza za Al-metu, 1% čeličnog praha



Slika 6-83. Odnos mase sječiva i dubine reza za Al-metu, 5% čeličnog praha



Slika 6-84. Odnos mase sječiva i dubine reza za Al-metu, 10% čeličnog praha

6.5 Analiza rezultata druge skupine ispitivanja

6.5.1 Analiza utjecaja mase eksplozivnog punjenja, odmaka i materijala obloge

Grafički prikaz utjecaja mase eksplozivnoga punjenja na dubinu reza za Al-oblogu prikazan je Slikom 6-64. Prema grafikonu vidljivo je da dubina reza raste s porastom mase eksplozivnoga punjenja. Povećanje dubine reza, s obzirom na povećanje mase eksplozivnoga punjenja, linearno je. Pravac ima različit nagib zavisno od odmaka koji je korišten pri postavu ispitivanja. Najveći prirast dubine reza evidentiran je u slučaju odmaka od 20 mm. U slučajevima odmaka manjeg ili većeg od 20 mm utjecaj mase eksploziva na dubinu reza je manje izražen. S povećanjem mase eksplozivnog punjenja raste i razlika između najveće i prosječne dubine reza što je grafički prikazano Slikom 6-63.

Utjecaj mase eksplozivnog punjenja na dubinu reza za Cu-oblogu je prikazan Slikom 6-68. Za razliku od krivulja dubine reza linijski kumulativnih rezača s Al-oblogom koje imaju pravilan linearan oblik, utjecaj mase eksplozivnoga punjenje na dubinu reza linijskih kumulativnih rezača s Cu-oblogom prikazan je krivuljama različitih oblika. Kao i kod rezača s Al-oblogom vidljiv je različit utjecaj mase eksplozivnoga punjenja na dubinu reza pri različitim odmacima. Utjecaj mase eksplozivnoga punjenja najviše je izražen pri odmaku od 10 mm, a nešto je manje izražen pri odmaku od 20 mm. Kao i kod rezača sa Al-oblogom, s porastom mase eksplozivnoga punjenja evidentirana su veća odstupanja između najveće i prosječne dubine reza što je grafički prikazano Slikom 6-67.

Grafički prikaz utjecaja odmaka na dubinu reza linijskih kumulativnih rezača prikazan je na Slici 6-66. za rezače s Al-oblogom i na Slici 6-70. za rezače s Cu-oblogom. Optimalni odmak za rezače sa Al-oblogom iznosi 20 mm za sve ispitivane mase eksplozivnoga punjenja i sve *M/C* odnose. Dubina reza linijskih kumulativnih rezača postupno raste sa porastom odmaka na segmentu od 0 mm do 20 mm, a zatim naglo pada kod odmaka 30 mm. Dubinu reza na odmaku od 0 mm nije uvijek bilo moguće izmjeriti jer je materijal obloge prilijepljen u području reza. Uz porast dubine reza prisutno je i povećanje širine reza. Rez kod odmaka od 30 mm, osim što ima najmanju dubinu, izrazito je nepravilan. Optimalni odmak linijskoga kumulativnog rezača sa Cu-oblogom je 10 mm. Dubina reza raste s porastom odmaka od 0 mm do 10 mm, dok u području od 10 mm do 20 mm dubina reza se neznatno smanjuje, a izrazito se smanjuje pri odmaku od 30 mm. Kao i kod rezača sa Al-oblogom s porastom odmaka dolazi do povećanja širine reza i nepravilnosti reza. Oblici rezova linijskih kumulativnih rezača sa Al- i Cu-oblogom pri različitim odmacima vidljivi su na Slici 6-61. i Slici 6-62.

Utjecaj materijala obloge na dubinu reza s obzirom na masu eksplozivnoga punjenja prikazan je Slikom 6-71. Dubine reza dane su za odmak od 20 mm za rezače s Al-oblogom i odmak od 10 mm za rezače s Cu-oblogom. Kod tih odmaka zabilježene su najveće dubine reza. Pri istim masama eksplozivnoga punjenja prosječna dubina reza rezača s Al-oblogom je približno 5 mm veća u odnosu na prosječnu dubinu reza rezača s Cu-oblogom. Na osnovi zabilježenih prosječnih dubina reza za pojedini materijal obloge izrađene su korelacijske krivulje sa pripadajućim jednadžbama krivulje. Veza između mase eksplozivnoga punjenja i dubine reza za oba materijala ima linearani oblik. Utjecaj mase eksplozivnoga punjenja na prosječnu dubinu reza rezača s Al-oblogom izražena je jednadžbom (6-7), a utjecaj mase eksplozivnoga punjenja na prosječnu dubinu reza rezača s Cu-oblogom jednadžbom (6-8).

$$y = 0{,}616x + 3{,}3026 \quad (6\text{-}7)$$

$$y = 0{,}6375x - 2{,}6654 \quad (6\text{-}8)$$

gdje je :

y - prosječna dubina reza (mm) i

x - masa eksplozivnog punjenja (g).

Za svaku krivulju izračunati su koeficijenti determinacije (R^2) koji imaju približne vrijednosti iznosa, R^2=0,95 za rezače s Al-oblogom i R^2=0,94 za rezače s Cu-oblogom.

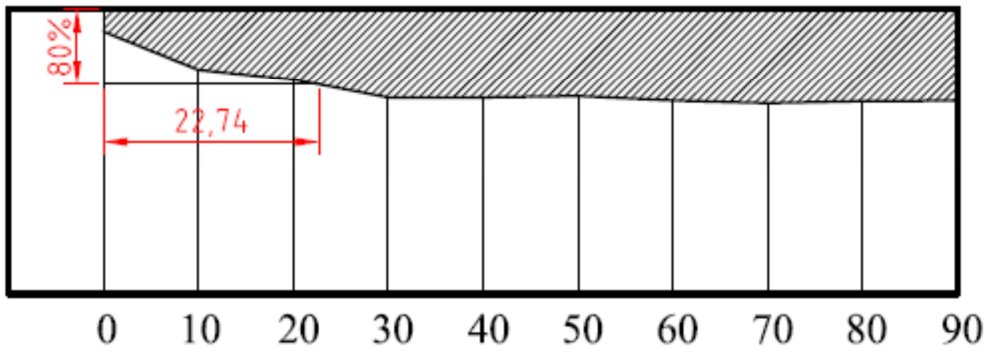
Veća dubina reza linijskih kumulativnih rezača s Al-oblogom u odnosu na linijske kumulativne rezače s Cu-oblogom pri istoj masi eksplozivnog punjenja uzrokovana je manjom masom, odnosno manjom gustoćom Al-obloge s obzirom na Cu-oblogu. S istom masom eksplozivnog punjenja linijski kumulativni rezači imaju manji (povoljniji) *M/C* odnos. Stoga je dubina reza za različite materijale obloge analizirana s obzirom na *M/C*-odnos. Utjecaj *M/C* odnosa na dubinu reza rezača sa Al- i Cu- oblogom prikazan je Slikom 6-72. Iz grafičkog prikaza rezultata vidljivo je da su dubine reza rezača sa Al- i Cu-oblogom jednake za *M/C* odnose u području od 0,4 do 1,1. Naime, sve točke koje predstavljaju izmjerene dubine reza s obzirom na *M/C* odnos za oba materijala obloge u tom području leže na istom pravcu. Za *M/C* odnos 1,4 izmjerene dubine se nalaze iznad korelacijskoga pravca. *M/C* odnos od 1,4 rijetko se koristi pri konstrukciji linijskih kumulativnih rezača u praktičnoj primjeni zbog male dubine reza.

6.5.2 Analiza utjecaja načina iniciranja

Iz rezultata mjerenja se može zaključiti da je aluminij, u odnosu na čelik, prikladniji materijal za određivanje dubine reza linijskih kumulativnih rezača. Prilikom određivanja utjecaja načina iniciranja, duljina nepravilnog reza procijenjena vizualnim pregledom reza. Metoda je subjektivna i ne daje točne rezultate. Iz tablica rezultata mjerenja dubine reza i dijagram uzdužnih presjeka reza s obzirom na način iniciranja može se zaključiti:

- maksimalna dubine reza nešto je veća kod okomitog iniciranja,
- rez ima pravilniji oblik kod okomitog iniciranja, manja su variranja u dubini reza,
- duljina nepravilnog reza je manja prilikom okomitog iniciranja,
- rez je u oba slučaja dulji od duljine linijskog kumulativnog rezača i
- duljina pravilnog reza je uvijek kraća od duljine linijskog kumulativnog rezača.

Prema rezultatima mjerenja može se zaključiti da rez nastao kod okomitog iniciranja ima manju duljinu nepravilnog reza u odnosu na paralelno iniciranje. Za preciznije određivanje duljine segmenta na kojem je rez nepravilan, potrebna je dodatna analiza. Za određivanje duljine nepravilnog reza definirana je dubina na kojoj se rez može smatrati pravilnim. Definirana dubina pravilnog reza iznosi 80% vrijednost najveće izmjerene dubine reza. Način proračuna dubine pravilnog reza je preuzet iz literature (Lim 2006), a temelji se na činjenici da dubina pravilnog, stabilnog reza komercijalnih linijskih kumulativnih rezača varira u iznosu od ± 10%. Nakon definiranja dubine pravilnog reza, uzdužni presjeci reza za pojedini uzorak preneseni su na dijagram u mjerilu 1:1. U točki iniciranja, točka početka reza, okomito je nanesena vrijednost od 80% maksimalne dubine reza. Sjecište pravca paralelnog s površinom mete na dubini od 0,8 najveće dubine reza i linije dubine reza predstavlja točku početka pravilnog reza. Duljina nepravilnog reza je zatim izmjerena i kotirana na crtežu. Princip određivanja dubine nepravilnog reza prikazan je na Slici 6-85., a grafički prikazi pojedinih rezova sa kotiranom duljinom nepravilnog reza dani su u prilogu broj 3.



Slika 6-85. Određivanje duljine nepravilnog reza.

U Tablici 6-21. dani su rezultati duljine nepravilnog reza s obzirom na način iniciranja.

Tablica 6-22. Duljine nepravilnog reza s obzirom na način iniciranja

Redni broj uzorka	Duljina nepravilnog reza (mm)	Način iniciranja
3	39	Paralelno
4	30	Paralelno
5	35	Paralelno
6	19	Okomito
7	23	Okomito
8	22	Okomito

Vrijednosti duljine nepravilnog reza variraju od 30 mm do 39 mm za paralelni način iniciranja i od 19 mm do 23 mm za okomiti način iniciranja. Srednja izmjerena duljina nepravilnog reza za paralelno iniciranje iznosi 35 mm, a za okomito iniciranje 21 mm. Izmjerene vrijednosti duljine nepravilnog reza kod paralelnog iniciranja su prosječno 62,5 % veće u odnosu na duljine nepravilnog reza kod okomitog načina iniciranja.

6.5.3 Analiza utjecaja metalnog praha u eksplozivnom punjenju

Analizom dubine reza u čeličnoj i aluminijskoj meti utvrđena je zavisnost dubine reza o udjelu dodanoga Al-praha. Dubina reza raste dodatkom Al-praha u iznosu od 1% i 5% u odnosu na eksplozivno punjenje bez Al-praha. Dubina reza s dodatkom 10% Al-praha, u oba slučaja, manja je u odnosu na eksplozivno punjenje bez Al-praha. Razlike u dubini reza su izraženije kod aluminijske mete zbog veće postignute dubine reza. Razlike u dubini reza čelične i aluminijske mete su proporcionalne razlikama u gustoći materijala mete, što je u skladu sa hidrodinamičkom teorijom prema kojoj dubina penetracije mlaza u metu ovisi o omjeru između gustoće materijala mlaza i materijala mete.

Dodavanjem čeličnog praha, srednje vrijednosti dubine pri različitim postocima čeličnoga praha su približno jednake, osim pri udjelu od 5%, pri kojem je zabilježena znatno niža vrijednost dubine reza. Iako su srednje vrijednosti približno jednake, primjetna su značajna razlike u izmjerenoj dubini pojedinoga reza.

Pri otpucavanju linijskih kumulativnih rezača s eksplozivnim punjenjem u koje je dodan čelični prah za svaki pojedinačni rez skupljeni su i izvagani ostaci obloge u obliku sječiva. Masa sječiva uspoređena je s dubinom pojedinoga reza. U svim slučajevima utvrđena je zavisnost između izmjerene mase sječiva i dubine reza. Masa sječiva je obrnuto proporcionalna dubini reza, odnosno veća dubina reza je zabilježena pri manjim masama ostataka obloge. S obzirom na aktivni dio obloge, masa obloge je raspodijeljena na masu sječiva i masu mlaza. Veće izmjerene mase sječiva ukazuju da je manji dio obloge učestvovao u formiranju mlaza što je rezultiralo manjom kinetičkom energijom mlaza i manjom dubinom reza u ciljanom materijalu. U situacijama kad je izmjerena manja masa sječiva, dubina reza je bila veće uslijed veće mase i veće kinetičke energije mlaza. Sječivo, prema rezultatima ispitivanja, predstavlja sekundarni mlaz i ne utječe bitno u procesu rezanja, a proces rezanja se zasniva na kinetičkoj energiji mlaza. Rezultati ispitivanja su u suprotnosti s postavkama teorije iznesene u radu Lima (Lim 2005), prema kojoj se princip djelovanja linijski kumulativnih rezača temelji na kinetičkoj energiji sječiva.

7 Zaključci

Nastajanje i djelovanje kumulativnog procesa konusnih kumulativnih naboja detaljno je istraženo i opisano teorijama, modelima i računalnim simulacijama koje su potvrđene eksperimentalnim opažanjima. Budući da su istraživanja linijskih kumulativnih rezača manje zastupljena u literaturi, pregledom literature dobiveni su brojni podaci o ispitivanju konusnih perforatora koji su poslužili kao podloga za ovaj rad.

Razlike djelovanja između konusnih i linijskih kumulativnih naboja, odnosno perforatora i rezača, iskazuju se u načinu usmjeravanja energije u točku kod perforatora, odnosno pravac kod linijskih kumulativnih rezača, što upućuje i na određenu različitosti formiranja i djelovanja kumulativnoga procesa.

Provedena su ispitivanja u svrhu opisivanja procesa formiranja i djelovanja linijskih kumulativnih rezača uz određivanje utjecaja pojedinih čimbenika na dubinu reza. Ispitivanja su podijeljena u dvije skupine, a ispitne metode su prilagođene i primijenjene uz uvažavanje fizikalnih uvjeta kumulativnog procesa, odnosno velike brzine mlaza i visokih iznosa tlakova detonacije. Prva skupina ispitivanja obuhvaća snimanje kumulativnog procesa brzom kamerom, određivanje promjene mase mete, promjenu oblika i stanja obloge nakon otpucavanja linijskih kumulativnih rezača te mjerenje brzine i tlaka mlaza linijskih kumulativnih rezača. Druga skupina ispitivanja bila je usmjerena na određivanje utjecaja pojedinih čimbenika rezača na dubinu reza. Ispitan je utjecaj mase eksplozivnog punjenja, materijala obloge, odmaka, metalnoga praha u eksplozivnom punjenju i načina iniciranja na dubinu reza.

Analizom rezultata unutar ispitivanja prve skupine zaključeno je sljedeće:

- Primjenom brze kamere snimljena je detonacija eksplozivnog punjenja, ali zbog količine svjetlosti emitirane detonacijom i ograničenja u brzini snimanja nije snimljen kumulativni proces linijskog kumulativnoga rezača. Kamera se može uspješno primijeniti za snimanje i analizu učinka linijskih kumulativnih rezača kod rušenja objekata miniranjem.
- Uslijed djelovanja linijskih kumulativnih rezača na čeličnu i aluminijsku metu dolazi do promjene, odnosno gubitka mase mete. Iznos apsolutnog gubitka masa čelične i aluminijske mete gotovo je jednak. Gubitak mase aluminijske mete, u postotnom iznosu, s obzirom na manju gustoću aluminija, a time i manju masu aluminijske mete, veći je u odnosu na gubitak mase čelične mete. Prilikom udara kumulativnoga mlaza dolazi do plastičnog tečenja i razmicanja materijala mete.

Dio tekućeg metala nastalog na taj način odbacuje se iz područja reza i odvaja se od cjeline mete, odnosno dolazi do razbacivanja metala u okolinu. Veći postotni gubitak mase aluminijske mete u odnosu na gubitak čelične mete, prema hidrodinamičkoj teoriji, može se objasniti manjom gustoćom aluminija u odnosu na čelik. Uz manju gustoću, aluminij ima i manju tlačnu čvrstoću i granicu tečenja u odnosu na čelik. Stoga će mlaz jednake kinetičke energije uzrokovati tečenje većeg volumena materijala aluminijske mete. Razlike u karakteristikama materijala mete imaju za posljedicu veću dubinu i širinu reza te veći postotni gubitak mase aluminijske mete.

- Analizom oblika i stanja obloge nakon otpucavanja mogu se razdvojiti tri različite cjeline u koje se transformira materijal obloge: sječivo, mlaz i trake. Sječivo je razmjerno najveće mase i čine ga spojene unutarnje nasuprotne strane obloge. Trake su pravilnog oblika pravokutnika, a nastaju odvajanjem od donjih stranica obloge. Trake nastaju uslijed djelovanje udarnoga vala eksplozivnog punjenja. Obloga se urušava u smjeru centralne osi, a brzina urušavanja materijala obloge nije konstantna, nego opada od vrha prema bazi obloge. Donji dio baze obloge je najsporiji te kut urušavanja obloge postaje najveći. Uslijed takvog položaja baze obloge i činjenice da udarni val djeluje okomito na površinu obloge, dolazi do lateralnog odbacivanja dijelova obloge u obliku pravilnih traka. U odnosu na masu sječiva, masa mlaza je znatno manja. Budući da se mlaz raspada i kod pojedinih rezova ostaje nalijepljen u području reza, masu mu nije moguće odrediti direktnim mjerenjima. Masu mlaza je moguće izračunati kao razliku između ukupne mase obloge i zbroja masa sječiva i traka.
- Ostaci obloge, izvedbe rezača kod kojih na dio obloge nije postavljen eksploziv, upućuju na zaključak da se materijal obloge linijskih kumulativnih rezača simultano deformira u pravcu dvije prostorne osi. Deformacija obloge posljedica je geometrijskog odnosa materijala obloge i eksplozivnog punjenja linijskog kumulativnog rezača. Materijal obloge, u uzdužnoj osi, giba se u skladu sa Taylorovim modelom. Ukoliko se promatra djelovanje mlaza na materijal mete, može se primijetiti da mlaz ne djeluje okomito na metu, već sa površinom mete zatvara određeni kut. Proces djelovanja linijskih kumulativnih rezača je znatno kompleksniji od procesa djelovanja konusnih perforatora, obzirom na njegovo prostorno odvijanje. Formiranje kumulativnoga mlaza konusnih perforatora se može pojednostavljeno prikazati dvodimenzionalnim modelima, dok je za

modeliranje procesa djelovanja linijskih kumulativnih rezača potrebno koristiti složenije trodimenzionalne modele.

- Osmišljena metoda za mjerenje brzine mlaza linijskih kumulativnih rezača primijenjena je na linijskim kumulativnim rezačima sa aluminijskom i bakrenom oblogom pri različitim *M/C* odnosima. Metoda se temelji na prijenosu svjetlosnog signala svjetlovodima i mjerenju vremena između signala elektroničkim satom.
  Usporednim prikazom mjerenih brzina mlaza za različite materijale obloge pri istim *M/C* odnosima, na segmentu od 0 mm do 20 mm u osi okomitoj na os rezača, uočena je razlika između brzine Cu- i Al-mlaza. Brzine Cu-mlaza su po iznosu bile manje od brzine Al-mlaza za sve *M/C* odnose.
- Rezultati izvedenih mjerenja brzina mlaza za oba materijala obloge pokazali su manje vrijednosti u odnosu na brzine mlaza proračunate pomoću PER teorije. Usporedbom rezultata mjerenja s rezultatima objavljenih recentnih istraživanja dokazano je da su mjerene brzine mlaza i kritične brzine penetracije mlaza linijskih kumulativnih rezača u materijal mete manje u odnosu na brzinu mlaza i kritičnu brzinu penetracije mlaza konusnih perforatora.
- Razvijena je metoda mjerenja iznosa tlaka mlaza koji se generira prilikom udara mlaza u metu. Primjenjeni su različiti postavi s obzirom na položaj osjetila, a rezultati mjerenja su pokazali da je iznos tlaka proporcionalan otporu materijala mete prodiranju mlaza. Oblik mjernog signala ovisi o mjernom postavu, a izmjereni iznos tlaka ovisi o materijalu mete i parametrima rezača. Oblik mjernog signala opisuje ponašanje materijala prilikom procesa penetracije mlaza linijskog kumulativnog rezača. Iz rezultata mjerenja tlaka moguće je, na osnovu jednadžbe koja u vezu dovodi gustoću materijala mete, tlak u točki sudara i brzinu penetracije mlaza u metu, izračunati brzinu penetracije mlaza u ciljani materijal. Primjenom jednadžbe moguće je dobiti vremenski prikaz brzine penetracije mlaza u metu.

Zaključci druge skupine ispitivanja su:

- S porastom mase eksplozivnog punjenje raste i dubina reza linijskih kumulativnih rezača. Prirast dubine reza sa povećanjem mase eksplozivnoga punjenja je linearan za oba materijala obloge. Budući da je najveća masa eksplozivnog punjenja, s obzirom na to da su ispitivanja izvedena u laboratorijskim uvjetima, ograničena na 30g, daljnja ispitivanja je potrebno izvesti na poligonu s većim masama eksplozivnoga punjenja.

- S obzirom na masu eksplozivnoga punjenja i materijal mete linijski kumulativni rezači sa aluminijskom oblogom postigli su veću dubinu reza u aluminijskoj meti. Promatra li se učinkovitost linijskih kumulativnih rezača s obzirom na *M/C* odnos, vidljivo je da rezači sa aluminijskom i bakrenom oblogom postižu jednake dubine reza u aluminijskoj meti.
- Optimalan odmak za rezače sa bakrenom oblogom iznosi približno 10 mm, a za rezače sa aluminijskom oblogom približno 20 mm. Za preciznije određivanje optimalnog odmaka potrebno je provesti dodatna ispitivanja u navedenom području.
- Analizom utjecaja načina iniciranja utvrđeno je da je povoljniji način iniciranja kada je uzdužna os detonatora okomita na uzdužnu os linijskog kumulativnog rezača. Kod ovog načina iniciranja zabilježena je pravilniji rez i manja duljina nepravilnog reza.
- Analizom utjecaja dodavanja praha eksplozivnom punjenju linijskih kumulativnih rezača primijećeno je da dubina reza raste prilikom dodavanja Al praha u iznosu od 1 % i 5 % , a pada kod iznosa praha od 10 % u odnosu na linijski kumulativni rezač sa eksplozivnim punjenjem bez Al praha. Dodavanjem čeličnog praha nisu zabilježena povećanja u dubini reza. Daljnja ispitivanja potrebno je izvoditi sa dodavanjem prahova metala koji imaju visoku gustoću i manje dimenzije čestica.
- Djelovanje linijskih kumulativnih rezača na materijal metu se ne zasniva na kinetičkoj energiji sječiva kako je izneseno u teoriji sječiva (Lim 2005). Sječivo predstavlja sekundarni mlaz i ne sudjeluje bitno u procesu rezanja. Navedeni zaključak se može potvrditi korelacijom dubine reza sa mjerenom masom sječiva, koja je pokazala manju dubinu reza pri većoj masi sječiva, što upućuje na zaključak da je dubina reza veća kada je veća masa mlaza, odnosno da do penetracije dolazi uslijed kinetičke energije mlaza.
- Daljnja mjerenja učinkovitosti linijskih kumulativnih rezača potrebno je izvoditi s uzorcima većih masa eksplozivnog punjenja i konstrukcijskih značajki. Pored meta od aluminija i čelika postavljanih na čvrstu podlogu, koristiti će se različiti oblici čeličnih profila postavljenih na oslonce. Dubine reza dobivene na ovaj način, realnije će odgovarati stvarnim uvjetima primjene linijskih kumulativnih rezača.

Literatura

KNJIGE:

1. Akhavan, J. (2004): The Chemistry of Explosives. The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
2. Altgilbers, L. L., Baird, J., Freeman, B. L., Lynch, C. S., Sergey I. & Shkuratov S.I. (2011): Explosive Pulsed Power. Imperial College Press, London.
3. Barbour, R. T. (1981): Pyrotechnics in Industry. McGraw-Hill, New York.
4. Cook, M. A. (1958): The Science of High Explosives. Reinhold Publishing Corporation, New York.
5. Ester, Z. (2005): Miniranje I - Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
6. Krsnik, J. (1989): Miniranje, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
7. Math, M. (1999): Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem. FSB, Zagreb.
8. Meyer, R. (1977): Explosives. Verlag Chemie GmbH, Weinheim.
9. Petrushkov, V.G. (2009): Explosion and its Applications In Metalworking. Nova Science Publisher, New York.
10. Povrzanović, A. (1996): Oblikovanje metala deformiranjem. FSB, Zagreb.
11. Rinehart, J.S. & Pearson, J. (1963): Explosive Working of Metals. Pergamon Press ltd, London.
12. Sućeska, M. (2001): Eksplozije i eksploziv - njihova mirnodopska primjena. Brodarski institut, Zagreb.
13. Walters, W.P. & Zukas, J.A. (1989): Fundamentals of Shaped Charges. Wiley-Interscience, New York.
14. Zukas, J. A. & Walters, W.P. (1998): Explosive Effects and Applications. Springer-Verlag, New York.
15. Zukas, J. A. (1990): High Velocity Impact Dynamics. John Wiley & Sons, Inc, New York.

ČLANCI:

16. Akbari-Mousavi, S. A. A., Barrett, L. M. & Al-Hassani S.T.S. (2008): Explosive Welding of Metal Plates. Journal of Materials Processing Technology, 2 0 2, 224-239.

17. Akbari-Mousavi, S. A. A. & Al-Hassani, S.T.S. (2005): Numerical and Experimental Studies of the Mechanism of the Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding. Journal of The Mechanics and Physics of Solids, 53, 2501-2528.

18. Akštein, Z. & Riha, R. (2004): Influence of Tamping on Performance of Linear Shaped Charges. Proceeding of the 7th Seminar New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, University of Pardubice, April 20-22, 53-61.

19. Ayisit. O. (2008): The Influence of Asymmetries In Shaped Charge Performance. International Journal of Impact Engineering, 35, 1399-1404.

20. Bauer, F. (2000): PVDF Shock Sensors: Applications to Polar Materials and High Explosives. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 47(6), 1448-1454.

21. Birkhoff, G., MacDougall, D. P., Emerson, M. Pugh, E. M, & Taylor, S. G. (1948): Explosives with Lined Cavities. Journal of Applied Physics, 19, 563-582.

22. Bohanek, V., Dobrilović, M. & Škrlec, V. (2010): Jet Pressure Measurement of Linear Shaped Charge. Proceedings of the 13th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice , University of Pardubice, 53-61.

23. Chase, J. B., Kuklo, R. M., Shaw, L. L., Carter, D. L. & Baum, D. W. (1999): High Resolution Diagnostics of a Linear Shaped Charge Jet. 18th International Symposium & Exhibition on Ballistics, San Antonio, TX.

24. Christman, D.R. & Gehring, J.W. (1966): Analysis of High-Velocity Projectile Penetration Mechanics. Journal of Applied Physics, 37, 1579-1966.

25. Cooper, P. W. (1996): Acceleration, Formation, and Flight of Fragments. Explosives Engineering. Wiley-VCH, 385–394.

26. Daniels, A. S. (2002): Selectable Initiation of Shaped Charges. Proceeding of 20th International Symposium on Ballistics, Orlando, 589-596.

27. Dobrilović, M., Ester, Z., Bohanek, V. & Škrlec, V. (2009): Linear Shaped Charge With Emulsion Explosive. Proceedings of the 12th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice , University of Pardubice, 487-493.

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

29. Duspara, M., Mijušković, G., Kopač, J., Pavić, M. & Stoić A. (2011): Popuštanje zaostalih naprezanja metodom vibracija. 6. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2011, Slavonski Brod, 251-258.

30. 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.

31. 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.

32. Hatt, M. (2003): Explosives Techniques Applied to Demolition. The Journal of Explosives Engineering, 29(3), 13-17.

33. Havliček, P. & Nesvadba, P. (2011): Application of Explosive Hardening on Railway Infrastructure Parts. Metal, Brno, Czech Republic.

34. Held, M. (2004): A Tutorial on the Penetration of Kinetic - Energy (KE) Rounds. Journal of Battlefield Tehnology 7(1), 1-5.

35. Held, M. (2001): Liners for Shaped Charges. Journal of Battlefield Technology, 4(3), 1-7.

36. Held, M., (1984.): "Critical Area for the Initiation of High Explosive Charges", in: Shock Waves in Condensed Matter. Elsevier Science Publishers, 555-557.

37. Hopfe, M. (2001): Blasting Steel Constructions with Cutting Charges in Germany. Sprenginfo, 2, 13-19, (Prevedeno na engleski).

38. Hutchinson, B. & Ridley, N (2006): On Dislocation Accumulation and Work Hardening in Hadfield Steel. Scripta Materialia 55, 299-302.

39. Ester, Z., Dobrilović, M., Janković, B. Tomičić, Z. & Odak, M. (2006): Jet Velocity and Effects Of Shaped Charge Perforator For Use In Oil And Gas Well. Proceedings of New Trends in Research of Energetic Materials, 581-586.

40. Kim, H. S., Madsen T, Pincay, J., Al-Shehab, N., & Baker, E. L. (2007): Application of Linear Shaped Charges for Warhead Venting. 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, 231-234.

41. Koch, A., Arnold, N. & Estermann, M. (2002): A Simple Relation between the Detonation Velocity of an Explosive and its Gurney Energy. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 26(6), 365-368.

42. Lim, S. (2012a): Steady State Equation of Motion of a Linear Shaped Charges. International Journal of Impact Engineering, 44, 10-16.

43. Lim, S. (2012b): Steady State Analytical Equation of Motion of Linear Shaped Charges Jet Based on the Modification of Birkhoff Theory. Applied Sciences 2, 35-45.

44. Lim, S. & Baird, J. (2006): Mechanics of the Run up on Linear Shaped Charges Cutting. International Society of Explosive eng, Volume 1, 1-11.

45. Lim, S., Lusk, B. & Worsey, P. N. (2005): Mechanisms of Linear Shaped Charge Cutting – a New Explanation. Thirty-First Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, Volume I, 169-178.

46. Miyoshi, H., Ohba, H., Kuroiwa E, Inoue T., Kitamura H. & Hiroe T. (2005): Evaluation of Penetration Performance for Linear Shaped Charges. Journal Of The Japan Society for Aeronautical And Space Sciences, 53, 231-236.

47. Nariman-zadeh, N., Darvizeh, A., Darvizeh, M. & Gharababaei, H. (2001): Modelling of Explosive Cutting Process of Plates Using GMDH-Type Neural Network and Singular Value Decomposition. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 128, 80-87.

48. Novotney, D. & Mallery, M. (2007): Historical Development of Linear Shaped charges. Copyright © 2007 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1-12.

49. Pugh, E., Eichelberger, R. & Rostoker, N. (1952): Theory of Jet Formation by Charges with Lined Conical Cavities. Journal of Applied Physics, 23(5) 532-536.

50. Randers-Pehrson, G. (1976): An Improved Equation for Calculating Fragment Projection Angle. Proc. 2nd Int. Symp. on Ballistics, Daytona Beacha, Florida.

51. Rondot, F. (2007): Tracking The "Poorness" of a Linear Shaped Charge. 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, 16-20 April, 169-176.

52. Shekhar, H (2012): Explosive Characteristics and Shaped Charge Applications of Nitromethane (NM): A Review. Central European Journal of Energetic Materials, 2012, 9(1), 87-97.

53. Simon, J. (1974): The Effect of Explosive Detonation Characteristic on Shaped Charge Performance. Proceedings of Army Science Conference, 98-112.

54. Sućeska, M. (1996): Izračunavanje parametara kumulativnog mlaza primjenom jednodimenzionalnog analitičkog modela. Strojarstvo, 38, 89-96.

55. Tong, Z., Li. Z., Cheng, B. & Zhang, R. (2008): Precision Control of Explosive Forming for Metallic Decorating Sphere, Journal of Materials Processing Technology, 203, 449–453.

56. Ugričić, M. (2003): Determination of the Critical Jet Velocity During the Penetration Into the Homogenous Steel Obstacle. Facta Universitatis, Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics, 15(3) 981-988.

57. Walters, W.P: (2008): A Brief History of Shaped Charges. A reprint of the keynote paper from the 24th International Symposium on Ballistics, New Orleans, LA, Vol. 1, 3–10.

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

59. Wiśniewski, A. (2011): The Use of Resistance Sensors to Measurement of Shape Charge Parameters. Central European Journal of Energetic Materials 8(2), 131-141.

60. Young, G. (2004): Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History, Stainless Steel World 2004 © 2004 KCI Publishing BV.

OSTALO:

61. Buc, S. M. (1991): Shaped Charges Liner Materials: Resources, Processes, Properties, Costa and Application. Tehnical Report, System Planning Corporation, Arlington, Virginia.

62. Carton, E. P., Stuivinga, M. & Verbeek H. J. (2005): Explosive Forming of Aerospace Components. REPORT, TNO Defence, Security and Safety, Rijswijk, Netherlands.

63. Ćatović, A. (2003): Bojeve glave sa kumulativnim efektom. Diplomski rad. Mašinski fakultet u Sarajevu, Sarajevo.

64. Čačić, L. (1998): Istraživanje i primjena kumulativnih eksplozivnih naboja pri miniranju u rudarstvu i graditeljstvu. Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

65. DiPersio R. & Simon J. (1964): The Penetration-Standoff Relation for Idealized Shaped Chare Jets. BRL Memorandum Report 1542.

66. Dobrilović, M. (2008): Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

67. Gazonas G. A., Segletes, S. B., Stegall, S. R & Paxton C. V. (1995): Hydrocode Simulation of the Formation and Penetration of a Linear Shaped Demolition Charge Into a RHA plate. US Army Research Laboratory Report, ARL-TR-788.

68. Gustavson, P., Tsker, D. & Forbes, J. (1994): PVDF Pressure Transducers for Shock Wave and Explosives Research. NAVSWC TR 91-506, Naval Surface Warfare Center, Silver Spring, Maryland.

69. Kennedy D. R. (1983): History of shaped charge effect, the first 100 years. Part I-IV, LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY.

70. Lim, S. (2006) : A Preliminary Investigation of the Blade Formation and Cutting Process of the Linear Shaped Charges. Dissertation, University of Missouri, Rolla.

71. Strohecker, D. E., Carlson R. J., Porembka S. W. & Boulger, F. W. (1964): Explosive Forming of Metals. DMIC 203, Defence Metal Information Centre , Columbus, Ohio.

72. Sućeska, M., Rajić Linarić, M., Matečić Mušanić, S., Bakija, S., Kollar, R. & Major, S. (2005): Razvoj kumulativnih eksplozivnih naboja i postupaka za eksplozivno rušenje objekata. tehnologijski projekt, Brodarski institut, Zagreb.

73. Vigil, M. G. (1996): Precision Linear Shaped Charges Analyses for Severance of Metals. Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT, SAND 96-2031.

74. Vigil, M. G. & Marchi, M. G. (1994): Anular Precision Linear Shaped Charges Flight Termination System for ODES Program. Sandia National Laboratories ,SANDIA REPORT SAND 94-1089.

75. Blasters Operation Manual Edition 1.6.

76. HRN EN 13631-14:2004, Eksplozivi za civilnu uporabu - Jaki eksplozivi - 14. dio: Određivanje brzine detonacije. (EN 13631-14:2003).

INTERNET STRANICE:

77. http://www.appliedexplosives.com/images/stories/smallbook.pd

78. http://www.dynasen.com/html/stressgaugeintro.html

79. http://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/Explosive Forming of Metal.htm

80. http://www.nasa.gov

81. http://www.youtube.com/watch?v=ZO_09QdblbY,

82. http://www.youtube.com/watch?v=beQi-vUBbr4,

83. http://www.3dmetalforming.com

Popis tablica

Tablica 3-1. Materijali kalupa i područje primjene (http://www.fsb.unizg.hr/deformiranje)18
Tablica 5-1. Gurneyjeve jednažbe za pojedine simetrične i asimetrične konfiguracije metala i eksploziva 46
Tablica 5-2. Gustoća, brzina detonacije i Gurneyjeva konstanta za pojedine eksplozive (Cooper 1996) 46
Tablica 5-3. Karakteristike analiziranih materijala (Buc 1991) 66
Tablica 5-4. Mogućnosti primjene različitih metala za oblogu kumulativnih naboja 67
Tablica 5-5. Eksplozivi koji se koriste za eksplozivno punjenje kumulativnih naboja 71
Tablica 6-1. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva 81
Tablica 6-2. Odstupanje u debljini Cu-lima prema deklaraciji proizvođača 83
Tablica 6-3. Kemijski sastavlegure1050 84
Tablica 6-4. Mehaničke karakteristike legure 1050H14 84
Tablica 6-5. Odnos brzine okidača i vremena ekspozicije (Blasters Operation Manual Edition 1.6) 87
Tablica 6-6. Rezultati ispitivanja za čeličnu metu 89
Tablica 6-7. Rezultati ispitivanja za aluminijsku metu 90
Tablica 6-8. Izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na razmaku od 20 mm 99
Tablica 6-9. Izmjerena brzina mlaza za Cu-oblogu na razmaku od 20 mm 101
Tablica 6-10. Izmjerena brzina mlaza za Al obloge konstantnom *M/C* odnosu i različitom razmaku svjetlovoda 103
Tablica 6-11. Izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na pojedinom segmentu, *M/C* = 0,40 . 104
Tablica 6-12. Izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na pojedinom segmentu, *M/C* = 0,90 . 104
Tablica 6-13. Izmjerena brzina mlaza za Al-oblogu na pojedinom segmentu, *M/C* =1,55 .. 105
Tablica 6-14. Kritična brzina penetracije mlaza konusnih perforatora u čeliku (Ugričić 2003) 119
Tablica 6-15. Vršne vrijednosti izmjerenog tlaka i oblik signala za pojedino mjerenje 123
Tablica 6-16. Konstrukcijske karakteristike, odmak, najveća i prosječna dubina reza linijskih kumulativnih rezača s Al-oblogom. 131
Tablica 6-17. Konstrukcijske karakteristike, odmak,najveća i prosječna dubina reza linijskih kumulativnih rezača s Cu-oblogom. 134
Tablica 6-18. Konstrukcijski parametri rezača, način iniciranja i materijal mete 139
Tablica 6-19. Izmjerene dubine reza pri različitom načinu iniciranja uzoraka 141

Tablica 6-20. Srednje vrijednosti dubine reza u ovisnosti o vrsti praha, količini praha i materijalu mete. 145
Tablica 6-21. Prosječna dubina reza i masa obloge nakon otpucavanja. 146
Tablica 6-22. Duljine nepravilnog reza s obzirom na način iniciranja 151

Popis slika

Slika 2-1. Eksplozija (Dobrilović 2008) 3
Slika 2-2. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović 2008) 5
Slika 2-3. Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Dobrilović 2008) 5
Slika 2-4. Detonacijski proces u p-v dijagramu (Dobrilović 2008) 6
Slika 2-5. Opća podjela eksplozivnih tvari (Dobrilović 2008) 7
Slika 3-1. Postupak zavarivanja metala eksplozivom (Akbari Mousavi & Al-Hassani 2008) 11
Slika 3-2. Konfiguracije koje se koriste za zavarivanje 12
Slika 3-3. Geometrijski odnos vektora brzina (Akbari Mousavi & Al-Hassani 2005) 13
Slika 3-4. Shema oblikovanja metala eksplozivom primjenom kontaktne metode 16
Slika 3-5. Shema oblikovanja metala eksplozivom primjenom nekontaktne metode 16
Slika 3-6. Rolls-Royce MT30 ispušni kolektor (http://www.3dmetalforming.com) 19
Slika 3-7. Primjena plastičnog eksploziva za rezanje metala 20
Slika 3-8. Fragmentacija šesterokutne prizme s provrtom napunjenim eksplozivom 21
Slika 3-9. Zaostala deformacija i dijagram raspodjele zaostalih naprezanja 22
Slika 3-10. Postavljenje detonirajućeg štapina u obliku sinusoide (Garcia-Jacomino et al. 2010) 23
Slika 3-11. Paralelno postavljanje detonirajućeg štapina (Garcia-Jacomino et al. 2010) 23
Slika 3-12. Kompaktiranje prahova metodom udarnoga klipa (Zohoor & Mehdipoor 2009) 25
Slika 3-13. Kompaktiranje prahova primjenom cilindra (Farinha et al. 2009) 25
Slika 3-14. Postavljanje eksploziva na obradak (Havliček & Nesvadba 2011) 27
Slika 3-15. Pozicije mjerenja tvrdoće materijala (Havliček & Nesvadba 2011) 27
Slika 3-16. Rezultati mjerenja tvrdoće materijala (Havliček & Nesvadba 2011) 27
Slika 4-1. Poprečni presjek eksplozivnog kumulativnog naboja 28
Slika 4-2. Princip djelovanja eksplozivnih kumulativnih naboja 29
Slika 4-3. Konusni kumulativni naboj i perforacija nakon detonacije (www.appliedexplosives.com/images/stories/smallbook.pdf) 29
Slika 4-4. Linijski (linearni) kumulativni naboj i rez nakon detonacije (Čačić 1998) 30
Slika 4-5. Munroeva konstrukcija kumulativnog naboja 32
Slika 4-6. Poprečni presjeci šupljina nastalih nakon detonacije (Barbour 1981) 34
Slika 4-7. Princip djelovanja linijskog kumulativnoga rezača (Barbour 1981) 35

Slika 4-8. Savitljivi linijski kumulativni rezač postavljen na cijev i prerezana cijev 36
Slika 4-9. Postavljanje linijskih kumulativnih rezača prilikom rušenja mosta 38
Slika 4-10. Objekt prije rušenja, nakon rušenja i presječeni dio konstrukcije (Sućeska et al. 2005). 38
Slika 4-11. Linijski kumulativni rezači za rezanje bušotinske cijevi. 39
Slika 4-12. Kružni vanjski rezač i presječena cijev 40
Slika 4-13. Nosivi stup platforme presječen linijskim kumulativnim rezačem 40
Slika 4-14. Upotreba linijskog rezača za razdvajanje raketnog motora od tijela letjelice (www.nasa.gov) 41
Slika 4-15. Upotreba LKR-a za neutralizaciju bojeve glave 42
Slika 4-16. Linijski kumulativni rezač namijenjen za probijanje otvora u zidu. 42
Slika 5-1. Sendvič-sustav eksploziva i metala i pretpostavljena raspodjela brzina. 44
Slika 5-2. Taylorova aproksimacija kuta gibanja 48
Slika 5-3. Urušavanje obloge kumlativnih naboja prema Birkhoffovom modelu 49
Slika 5-4. Formiranje primarnoga i sekundarnoga mlaza metalne obloge promatranog iz točke A sustava koji se giba (Birkhoff et al 1948). 51
Slika 5-5. Gibanje obloge i geometrijski odnosi prilikom gibanja obloge (Lim 2012a) 53
Slika 5-6. Urušavanje obloge kumlativnih naboja prema PER teoriji (Pugh et al. 1952) 54
Slika 5-7. Vektori brzina elementa urušavanja elementa obloge (Pugh et al 1952) 55
Slika 5-8. Geometrijski odnosi vektora brzina u pokretnoj točki J 56
Slika 5-9. Pretpostavljeni oblici porasta brzine obloge (Walters & Zukas 1989) 59
Slika 5-10. Penetracija mlaza konstantne brzine i duljine 60
Slika 5-11. Penetracija mlaza konstantne brzine i duljine u pokretnom koordinatnom sustavu 60
Slika 5-12. Masa sječiva, halo bodyja i mlaza nakon otpucavanja (Lim 2005) 64
Slika 5-13. Čimbenici koji utječu na učinak linijskih kumulativnih rezača 65
Slika 5-14. Utjecaj kuta kumulativnoga prostora na karakteristike reza (Novotney & Mallery 2007) 69
Slika 5-15. Utjecaj različite debljine obloge (Novotney & Mallery 2007) 70
Slika 5-16. Iniciranje pomoću detonatora 72
Slika 5-17. Iniciranje pomoću detonatora i pojačnika 72
Slika 5-18. Utjecaj gustoće materijala na dubinu reza (Vigil & Marchi 1994) 73
Slika 5-19. Odnos dubine reza i odmaka kumulativnog rezača od mete (Vigil 1996) 74
Slika 6-1. Plan ispitivanja 75

Slika 6-2. Linijski kumulativni rezači ... 77
Slika 6-3. Poprečni presjek linijskog kumulativnoga rezača ... 77
Slika 6-4. Struktura eksploziva povećana 90 i 150 puta ... 78
Slika 6-5. Kristal pentrita povećan 500 puta ... 78
Slika 6-6. Uređaj za valjanje eksploziva ... 79
Slika 6-7. Trakice eksploziva ... 79
Slika 6-8. Postav mjerenja brzine detonacije eksploziva ... 80
Slika 6-9. Grafički prikaz rezultata mjerenja brzine detonacije eksploziva. ... 81
Slika 6-10. Cu- i Al-obloge različitih debljina ... 83
Slika 6-11. Uzorak prije otpucavanja ... 86
Slika 6-12. Brza kamera "Mrel Blasters Troubleshooter" (Blasters MAS Operation Manual) ... 87
Slika 6-13. Fotografije izdvojene iz snimke kamere ... 88
Slika 6-14. Rezovi u čeličnoj i aluminijskoj meti ... 89
Slika 6-15. Izmjerena masa čelične mete prije i poslije otpucavanja ... 90
Slika 6-16. Izmjerena masa aluminijske mete prije i poslije otpucavanja ... 91
Slika 6-17. Gubitak mase čelične i aluminijske mete u postocima ... 91
Slika 6-18. Ispitivanje oblika i stanja obloge – mjerni postav I ... 92
Slika 6-19. Ispitivanje oblika i stanja obloge –postav II u pijesku ... 93
Slika 6-20. Ispitivanje oblika i stanja obloge –postav II u vodi ... 93
Slika 6-21. Ostaci obloge na koju nije postavljen eksploziv – mjerni postav I ... 93
Slika 6-22. Ostaci Al obloge otpucavane u pijesku – mjerni postav II ... 94
Slika 6-23. Sistematizacija metoda mjeranja brzina mlaza ... 95
Slika 6-24. Snimke mlaza 52 µs i 76 µs nakon detonacije (Kim et al. 2007). ... 96
Slika 6-25. Mjerni postav mjerenja brzine mlaza linijskog kumulativnog rezača ... 97
Slika 6-26. Mjerni postav sa promjenljivom udaljenosti između svjetlovoda ... 98
Slika 6-27. Mjerni postav sa konstantnom udaljenosti između svjetlovoda ... 98
Slika 6-28. Grafički prikaz raspodjele brzine mlaza za Al-oblogu na razmaku od 20mm ... 100
Slika 6-29. Grafički prikaz raspodjele brzine mlaza za Cu-oblogu na razmaku od 20 mm . 102
Slika 6-30. Usporedni prikaz brzine mlaza za Al- i Cu-oblogu na razmaku od 20 mm ... 102
Slika 6-31. Izmjerene brzine mlaza za Al-oblogu pri istom *M/C* odnosu i različitom razmaku svjetlovoda ... 103
Slika 6-32. Grafički prikaz izmjerenih brzina mlaza za različite odnose *M/C* po pojedinom segmentu ... 105

Slika 6-33. Usporedba različitih osjetila tlaka s obzirom na iznos tlaka (http://www.dynasen.com/html/stressgaugeintro.html) 107
Slika 6-34. Shematski prikaz mjernog sustava 107
Slika 6-35. Osciloskop LeCroy Waverunner 64 Xi 108
Slika 6-36. Konstrukcija PVDF osjetila tlaka 109
Slika 6-37. Mjerni dijagram za očitavanje tlaka 109
Slika 6-38. Mjerenje tlaka mlaza - mjerni postav I (osjetilo između Al-pločica) 110
Slika 6-39. Mjerenje tlaka mlaza - mjerni postav II (osjetilo između stakla i Al-pločice) ... 111
Slika 6-40. Mjerenje tlaka mlaza - mjerni postav III (osjetilo na Al-pločici) 111
Slika 6-41. Mjerni signal na zaslonu osciloskopa - mjerni postav I 111
Slika 6-42. Mjerni signal na zaslonu osciloskopa - mjerni postav II 112
Slika 6-43. Mjerni signal na zaslonu osciloskopa - mjerni postav III 112
Slika 6-44. Kut otklona obloge od horizontalne ravnine 114
Slika 6-45. Djelovanje mlaza linijskih kumulativnih rezača na metu – snimka I 114
Slika 6-46. Djelovanje mlaza linijskih kumulativnih rezača na metu – snimka II 115
Slika 6-47. Usporedba rezultata mjerenja brzine Al-obloge na segmentima od 0 mm do 20 mm i od 10 mm do 20 mm za različite *M/C* odnose. 117
Slika 6-48. Odnos između izmjerenih brzina mlaza i brzine primarnoga mlaza proračunate prema PER teoriji 118
Slika 6-49. Odnos između brzine mlaza u zraku i brzine penetracije mlaza u čeliku 120
Slika 6-50. Brzina penetracije mlaza u čeliku, linijski kumulativni rezača s Pb-oblogom (Miyoshi et al. 2005) 121
Slika 6-51. Brzina penetracije mlaza u čeliku, linijski kumulativni rezača s Al-oblogom (Miyoshi et al. 2005) 121
Slika 6-52. Dijagram tlaka u ovisnosti o vremenu - mjerni postav I 122
Slika 6-53. Dijagram tlaka u ovisnosti o vremenu - mjerni postav II 122
Slika 6-54. Područje porasta i pada mjerenog tlaka 123
Slika 6-55. Brzina penetracije mlaza u Al-metu 124
Slika 6-56. Stadiji penetracije projektila visoke brzine 125
Slika 6-57. Način očitanja dubine reza pomoću mikroure 127
Slika 6-58. Poprečni presjek reza u metalu 127
Slika 6-59. Grafički prikaz karakterističnoga uzdužnog presjeka reza 127
Slika 6-60. Postav ispitivanja prilikom određivanja utjecaja mase eksplozivnog punjenja, odmaka i materijala obloge 129

Slika 6-61. Rezovi linijskih kumulativnih rezača s Al-oblogom pri različitim odmacima, masa eksplozivnog punjenja 27 g 129
Slika 6-62. Rezovi linijskih kumulativnih rezača s Cu-oblogom pri različitim odmacima, masa eksplozivnog punjenja 26 g 130
Slika 6-63. Najveća i prosječna dubina reza linijskih kumulativnih rezača sa Al-oblogom pri različitom odmaku i *M/C* odnosu 132
Slika 6-64. Utjecaj mase eksplozivnog punjenja na prosječnu dubinu, Al-obloga 132
Slika 6-65. Utjecaj *M/C* odnosa na prosječnu dubinu reza, Al-obloga 133
Slika 6-66. Utjecaj odmaka na prosječnu dubinu reza, Al obloga 133
Slika 6-67. Najveća i prosječna dubina reza linijskih kumulativnih rezača sa Cu-oblogom pri različitom odmaku i *M/C* odnosu 135
Slika 6-68. Utjecaj mase eksplozivnog punjenja na prosječnu dubinu reza, Cu-obloga 135
Slika 6-69. Utjecaj *M/C* odnosa na prosječnu dubinu reza, Cu-obloga 136
Slika 6-70. Utjecaj M/C odnosa na prosječnu dubinu reza, Cu-obloga 136
Slika 6-71. Utjecaj različitih materijala obloge na dubinu s obzirom na masu eksplozivnog punjenja 137
Slika 6-72. Utjecaj različitih materijala obloge na dubinu reza s obzirom na *M/C* odnos.... 137
Slika 6-73. Postav ispitivanja utjecaja načina iniciranja na dubinu reza 138
Slika 6-74. Postav ispitivanja utjecaja načina iniciranja na dubinu reza 139
Slika 6-75. Dijagram uzdužnih presjeka dubine reza, iniciranje paralelno s uzdužnom osi 140
Slika 6-76. Dijagram uzdužnih presjeka dubine reza, iniciranje okomito na uzdužnu os 140
Slika 6-77. Granulometrijski sastav prahova 142
Slika 6-78. Eksploziv nakon dodavanja Al i čeličnog praha (uvećano 50 puta) 143
Slika 6-79. Srednja dubina reza u čeličnoj meti s obzirom na udio Al- praha..... 144
Slika 6-80. Srednja dubina reza u aluminijskoj meti s obzirom na udio Al-praha 144
Slika 6-81. Srednja dubina reza u aluminijskoj meti s obzirom na udio čeličnog praha 144
Slika 6-82. Odnos mase sječiva i dubine reza za Al-metu, 1% čeličnog praha 146
Slika 6-83. Odnos mase sječiva i dubine reza za Al-metu, 5% čeličnog praha 147
Slika 6-84. Odnos mase sječiva i dubine reza za Al-metu, 10% čeličnog praha 147
Slika 6-85. Određivanje duljine nepravilnog reza. 150

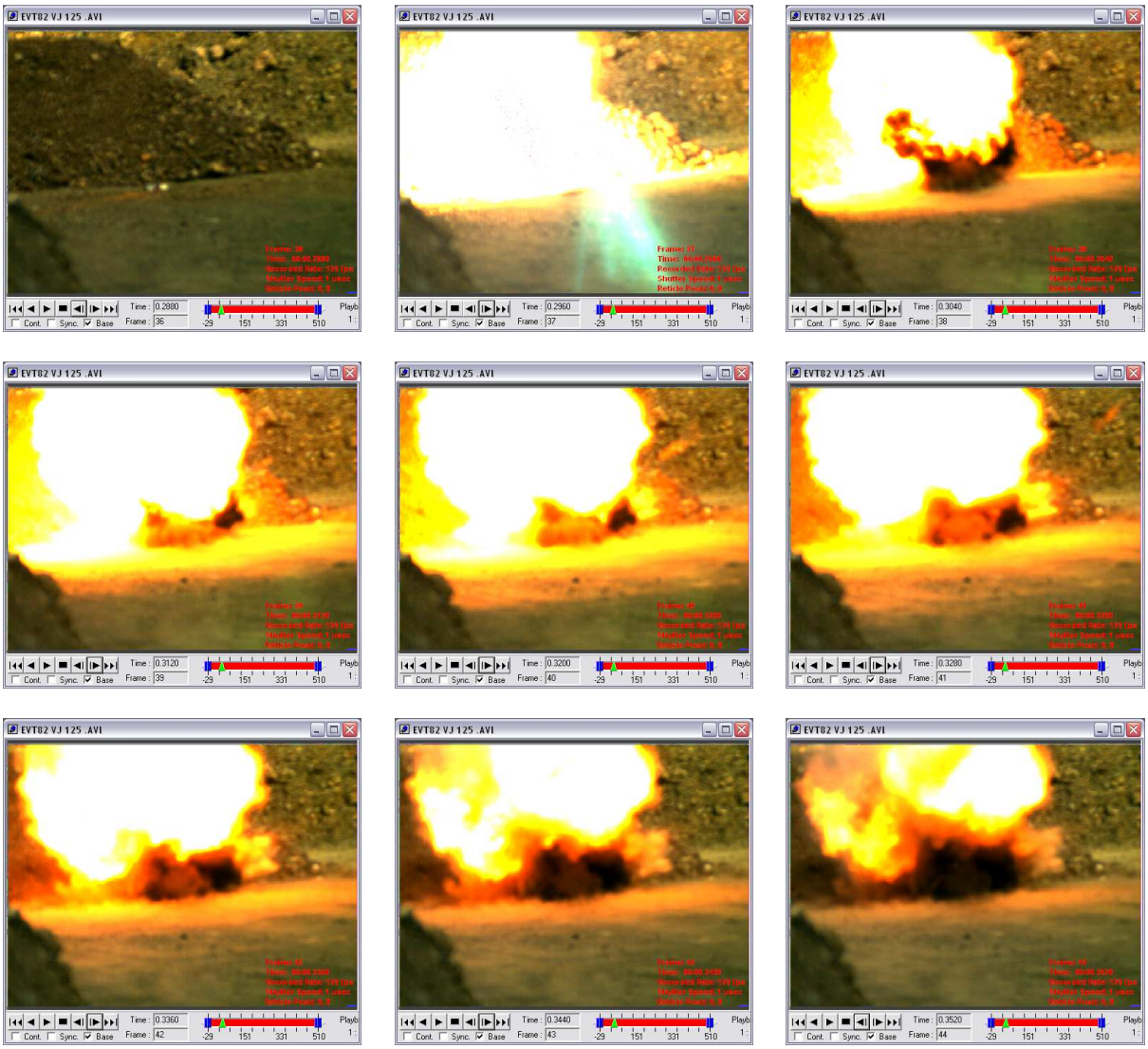
Popis priloga

Prilog 1 Poprečni presjek uređaja za valjanje eksploziva 173
Prilog 2 Snimka brze kamere – postav 125 fps 175
Prilog 3 Snimka brze kamere – postav 1000 fps 177
Prilog 4 Grafički prikaz pojedinih rezova sa kotiranom duljinom nepravilnog reza 181
Prilog 5 Izmjerene dubine reza linijskih kumulativnih rezača, eksplozivno punjenje sa dodatkom različitih udjela čeličnog i aluminijskog praha 183

Prilozi

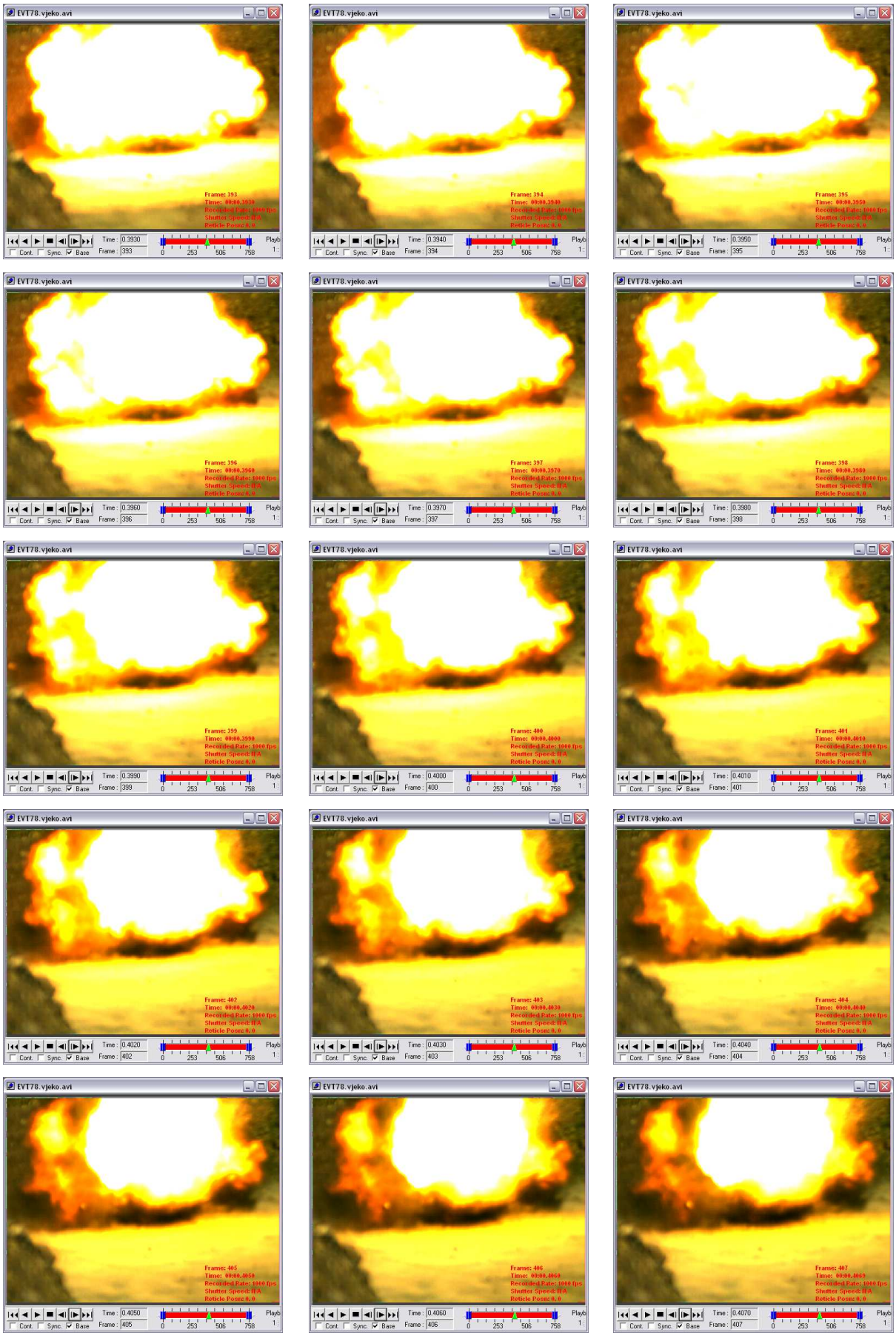
Prilog 1 Poprečni presjek uređaja za valjanje eksploziva

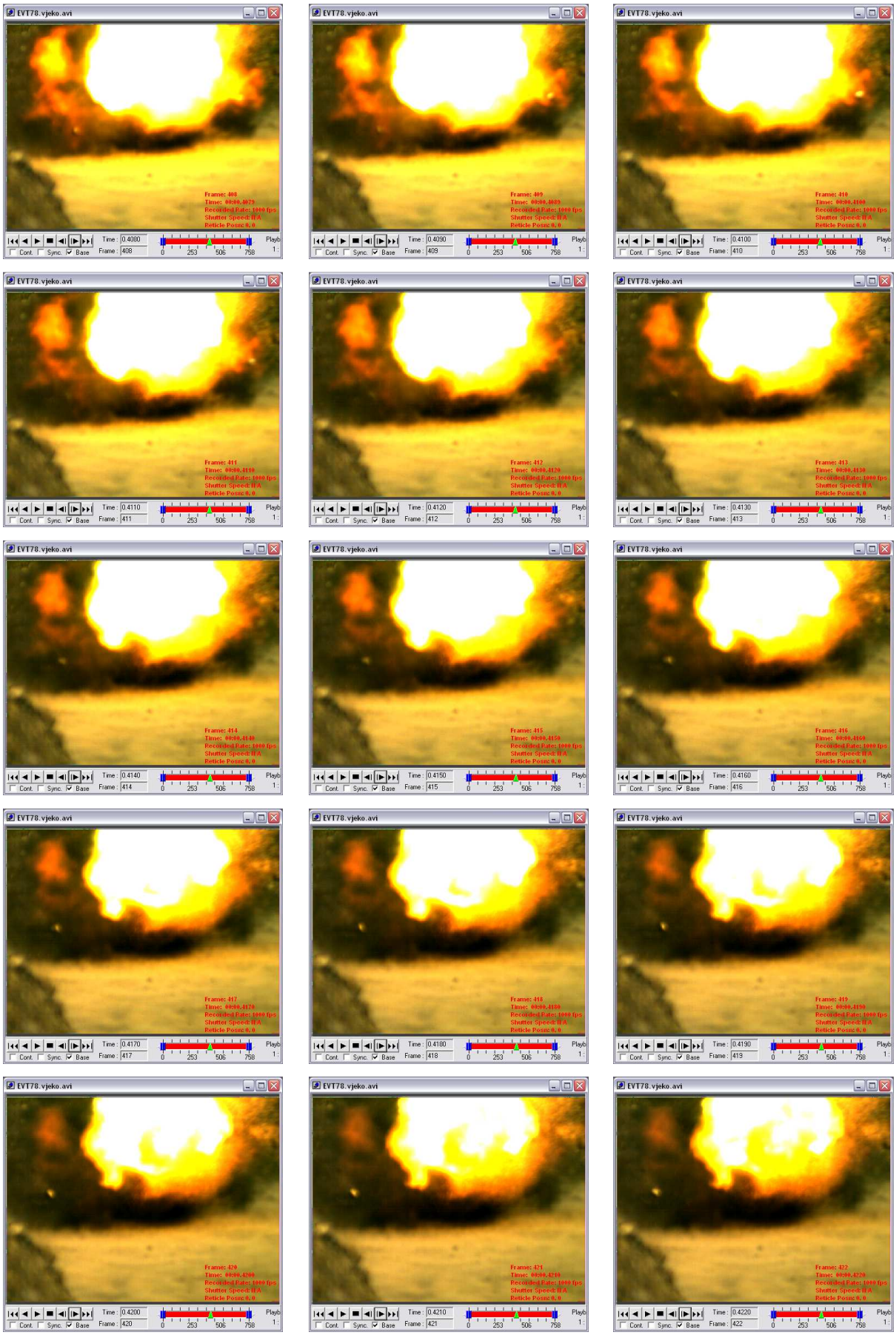
Prilog 2 Snimka brze kamere – postav 125 fps


EVT82 VJ 125 .AVI

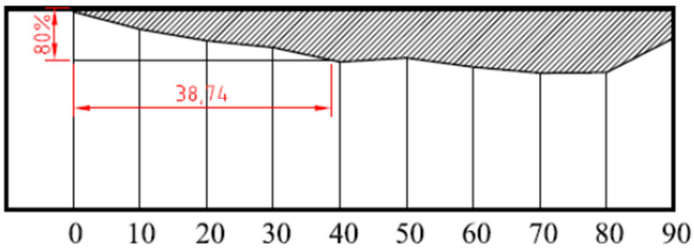
Prilog 3 Snimka brze kamere – postav 1000 fps

EVT78.vjeko.avi

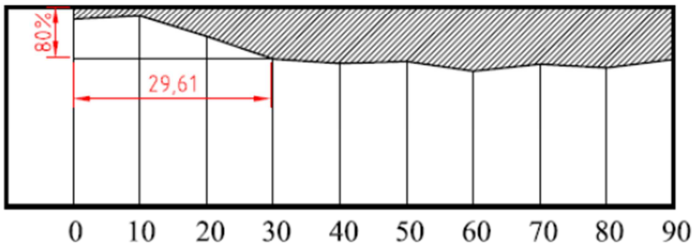

EVT78.vjeko.avi
Frame: 393
Time: 00:00.3930
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 394
Time: 00:00.3940
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 395
Time: 00:00.3950
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 396
Time: 00:00.3960
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 397
Time: 00:00.3970
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 398
Time: 00:00.3980
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 399
Time: 00:00.3990
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 400
Time: 00:00.4000
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 401
Time: 00:00.4010
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 402
Time: 00:00.4020
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 403
Time: 00:00.4030
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 404
Time: 00:00.4040
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 405
Time: 00:00.4050
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 406
Time: 00:00.4060
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0
EVT78.vjeko.avi
Frame: 407
Time: 00:00.4070
Recorded Rate: 1000 fps
Shutter Speed: n/a
Reticle Posns: 0, 0


EVT78.vjeko.avi

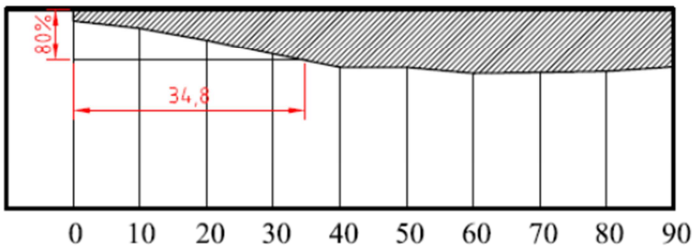
Prilog 4 Grafički prikaz pojedinih rezova sa kotiranom duljinom nepravilnog reza



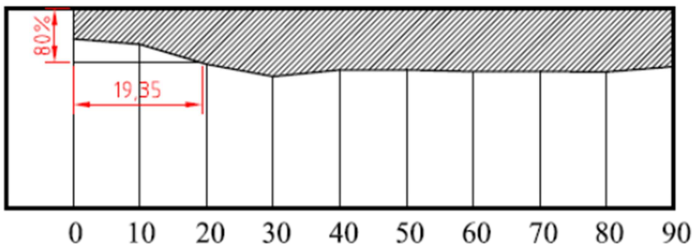
Uzorak broj 3



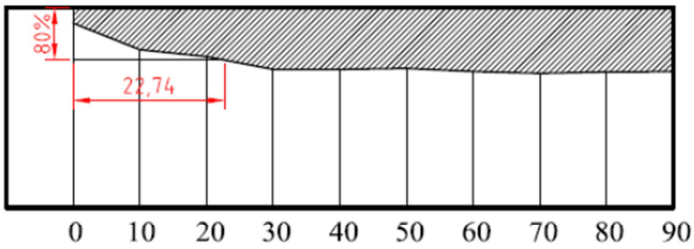
Uzorak broj 4



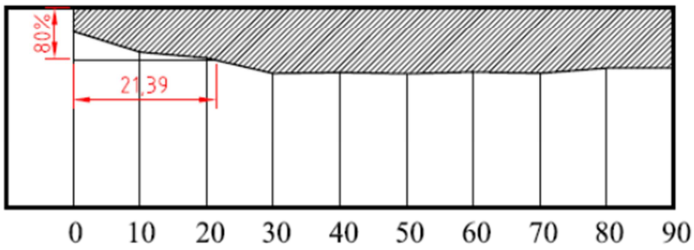
Uzorak broj 5



Uzorak broj 6



Uzorak broj 7



Uzorak broj 8

Prilog 5 Izmjerene dubine reza linijskih kumulativnih rezača, eksplozivno punjenje sa dodatkom različitih udjela čeličnog i aluminijskog praha

a) Dubine reza rezača sa aluminijskim prahom

Broj uzorka	Meta	Masa eksplozivne tvari (g)	Prah	Postotak praha (%)	Najveća dubina reza (mm)	Prosječna dubina reza (mm)	Srednja vrijednost (mm)
1	Al	20,28	-	0	13,42	10,7	11,41
2	Al	19,22	-	0	11,88	10,02	
3	Al	20,41	-	0	14,7	11,51	
4	Al	20,72	-	0	17,41	13,15	
5	Al	20,18	-	0	13,1	11,7	
6	Č	20,42	-	0	6,94	5,06	4,89
7	Č	19,69	-	0	5,66	4,56	
8	Č	19,68	-	0	5,53	4,84	
9	Č	19,96	-	0	5,35	4,79	
10	Č	19,88	-	0	6,23	5,18	
11	Al	20,06	Al	1	15,28	12,56	11,89
12	Al	20,04	Al	1	11,25	8,86	
13	Al	20,07	Al	1	13,17	11,27	
14	Al	20,08	Al	1	15,55	13,79	
15	Al	20,07	Al	1	15,22	12,99	
16	Č	20,06	Al	1	5,8	5,11	5,15
17	Č	20,06	Al	1	5,78	5,05	
18	Č	20,08	Al	1	5,58	4,72	
19	Č	20,09	Al	1	5,6	4,88	
20	Č	20,06	Al	1	6,87	6,02	
21	Al	20,07	Al	5	16,57	13,49	12,96
22	Al	20,08	Al	5	12,59	10,75	
23	Al	20,08	Al	5	13,7	12,34	
24	Al	20,07	Al	5	16,46	14,31	
25	Al	20,08	Al	5	15,76	13,89	
26	Č	20,05	Al	5	5,34	4,61	5,17
27	Č	20,06	Al	5	7,63	5,29	
28	Č	20,08	Al	5	6,31	5,37	
29	Č	20,09	Al	5	5,99	5,01	
30	Č	20,09	Al	5	6,31	5,55	
31	Al	20,09	Al	10	12,66	9,04	8,56
32	Al	20,09	Al	10	10,82	9,1	
33	Al	20,08	Al	10	9,34	8,85	
34	Al	20,09	Al	10	8,1	7,42	
35	Al	20,07	Al	10	9,67	8,36	
36	Č	20,08	Al	10	3,76	2,79	3,73
37	Č	20,07	Al	10	3,63	3,02	
38	Č	20,09	Al	10	4,63	3,95	
39	Č	20,09	Al	10	5,66	4,4	
40	Č	20,08	Al	10	5,11	4,46	

b) Dubine reza rezača sa čeličnim prahom

Broj uzorka	Meta	Masa eksplozivne tvari (g)	Prah	Postotak praha (%)	Najveća dubina reza (mm)	Prosječna dubina reza (mm)	Srednja vrijednost (mm)
1	Al	20,28	-	0	13,42	10,7	11,41
2	Al	19,22	-	0	11,88	10,02	
3	Al	20,41	-	0	14,7	11,51	
4	Al	20,72	-	0	17,41	13,15	
5	Al	20,18	-	0	13,1	11,7	
11	Al	20,07	Č	1	13,99	12,06	11,49
12	Al	20,09	Č	1	14,23	12,41	
13	Al	20,09	Č	1	13,81	11,93	
14	Al	20,04	Č	1	12,33	10,93	
15	Al	20,07	Č	1	13,61	10,11	
16	Al	20,08	Č	5	10,51	9,73	10,14
17	Al	20,09	Č	5	13,13	11,92	
18	Al	20,07	Č	5	9,69	9,04	
19	Al	20,08	Č	5	9,21	8,38	
20	Al	20,09	Č	5	13,5	11,61	
21	Al	20,08	Č	10	16,09	14,38	11,61
22	Al	20,09	Č	10	14,58	12,95	
23	Al	20,1	Č	10	11,77	11	
24	Al	20,05	Č	10	9,45	8,72	
25	Al	20,07	Č	10	12,22	10,98	

Popis korištenih oznaka i odgovarajućih jedinica

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica
$\sqrt{2Eg}$	Gurneyeva konstanta	(m/s),
A	aktivna površina piezopretvornika	(cm^2),
C	masa eksploziva	(kg),
c	brzina širenja zvuka	(m/s),
C_c	kapacitet nabojnog pojačala	(μC),
d_e	debljina sloja eksploziva	(m),
d_o	debljina obloge	(m),
E_g	Gurneyeva energija	(J/Kg),
G	modul smicanja	(Pa),
HV	tvrdoća po Vickersu,	
l	duljina	(m),
l_{ml}	duljina mlaza	(m),
l_p	duljina penetracije	(m),
l_z	udaljenost između ploča	(m),
M	masa metala	(kg),
p	tlak	(bar, Pa),
p_0	tlak okoline	(bar, Pa),
p_{cj}	tlak u CJ točki	(bar, Pa),
p_s	tlak pri kojem se odvija sagorijevanje	(bar, N/m^2),
Q	generirani naboj na piezopretvorniku	(μC),
R	udaljenost	(m),
r_s	brzina sagorijevanja	(m/s),
S	udaljenost od izvorne točke mlaza do mete	(m),
T	temperatura	(°C),
t	vrijeme	(s),
T_0	temperatura neporemećene eksplozivne tvari	(°C),
t_0	vrijeme nailsaka vrha mlaza na metu	(s),
t_p	vrijeme raspada mlaza	(s),
T_g	temperatura plamena	(°C),

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica
U_m	mjereni vršni napon	(V),
u	brzina produkata	(m/s),
v	brzina	(m/s),
v_0	brzina vrha mlaza prilikom nailaska na metu	(m/s),
v_c	volumen, specifični volumen u CJ točki	(m^3),
v_d	brzina detonacije eksploziva	(m/s),
v_{pd}	brzina plinova detonacije	(m/s),
v_m	maksimalna brzina metala	(m/s),
v_{ml}	brzina mlaza	(m/s),
v_p	brzina primarnoga mlaza	(m/s)
v_{pen}	brzina penetracije	(m/s)
v_s	brzina sekundarnoga mlaza	(m/s)
v_{ts}	brzina gibanja točke sudara	(m/s),
v_u	komponenta brzine detonacije paralelna sa površinom obloge	(m/s),
v_{ud}	komponenta brzine detonacije paralelna sa osi simetrije	(m/s),
v_{um}	brzina udara metala pri zavarivanju	(m/s),

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica
α	početni kut konusa	(^{o}),
β	kut urušavanja metalne obloge konusa	(^{o}),
δ	Taylorov kut	(^{o}),
β	kut sudara (dinamički kut)	(^{o}),
ρ	gustoća	(kg/m^3),
ρ_o	gustoća obloge	(kg/m^3),
ρ_e	gustoća eksploziva	(kg/m^3),
ρ_m	gustoća mete (metala)	(m/s),
ρ_{ml}	gustoća mlaza	(kg/cm^3) i
τ	vremenska konstanta.	

Popis kratica

ANFO – smjesa amonijevog nitrata i mineralnog ulja,

CJ – Chapman & Jouguet,

CSC – Conical shaped charge (konusni kumulativni naboji),

HCR – Hrvatski centar za razminiranje,

HMX – oktogen,

LKR – linijski kumulativni rezač,

LSC – Linear shaped charge (linijski kumulativni naboj),

NASA – National Aeronautics and Space Administration,

NM – Nitrometan,

MORH – Ministarstvo obrane Republike Hrvatske,

MUP – Ministarstvo unutarnjh poslova,

PER – Pugh, Eichelberger & Rostoker,

PETN – pentrit,

PVDF – Polyvinylidene fluoride (polyvinylidene difluoride),

PVF – Polyvinyl fluoride,

RDX – heksogen,

R.K. 8 – rudarska kapica br. 8,

SRBI – solid rocket booster,

TNT – trinitrotoulen i

ZND – Zeldovich, Von Neuman & Döring.

Životopis

Vječislav Bohanek je rođen 14. prosinca 1978. godine u Banja Luci. Od 1997.-2005. studirao na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu te stekao zvanje: Diplomirani inženjer rudarstva. Poslijediplomski studij upisao je 2006. godine na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

Od 01. travnja 2006. zaposlen je kao znanstveni novak na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u sklopu znanstvenog projekta „Emulzijski eksplozivi, inicijalna sredstva i djelovanje miniranja na okoliš“ pod vodstvom prof.dr.sc. Zvonimira Estera. Od 01. studenog 2010. do danas zaposlen je kao asistent na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Izvodi vježbe iz predmeta: Bušenje, Miniranje, Površinska eksploatacija i Podzemne prostorije. Pomagao je prilikom izrade brojnih diplomskih i završni radova.

Od 2009. do 2010. godine obnašao je funkciju Voditelja ispitivanja, a 2010. godine imenovan je za Predstavnika uprave za kvalitetu Laboratorija za ispitivanje eksplozivnih tvari akreditiranog prema HRN EN ISO 17025. Predstavnik je i uprave za kvalitetu Laboratorija za umjeravanje instrumenata za praćenje utjecaja miniranja na okoliš. Laboratorij je ovlašten za umjeravanje i popravak seizmografa poduzeća Instantel.

Pohađao je seminare i stručna usavršavanja u Hrvatskoj i inozemstvu:

- školovanje za umjeravanje seizmografa poduzeća Instantel, 2011 Ottawa, Canada,
- seminar Upravljanje ispitnom opremom, 2011, Crolab, Zagreb,
- tečaj za rukovanje ispitnom opremom Bruel &Kjaer, 2011, Prag, Češka,
- seminar Novi sustav tehničkog zakonodavstva, 2010, Crolab, Zagreb,
- seminar Kompetentnost laboratorija, 2010, Crolab, Varaždin,
- seminar Stavljanje pirotehničkih artikala i eksploziva za civilnu uporabu na tržište, 2010, Hrvatski zavod za norme i RGN fakultet, Zagreb,
- seminar Mjerna nesigurnost za praktičare, 2009, Hrvatsko mjeriteljsko društvo, Zagreb,
- seminar Unutrašnje neovisne ocjene za laboratorije, 2009, Hrvatsko mjeriteljsko društvo, Zagreb i
- seminar Ustrojstvo laboratorija prema HRN EN ISO/IEC 17025, 2007, Hrvatska akreditacijska agencija.

Autor je i koautor znanstvenih i stručnih radova iz područja miniranja, zaštite okoline od štetnih djelovanja miniranja, ispitivanja eksplozivnih tvari te srodnih područja. Suradnik je

na projektima, elaboratima i mjerenjima iz područja miniranja, zaštite okoline od štetnih djelovanja miniranja, ispitivanja eksplozivnih tvari te srodnih područja.

Član je:

- Udruge Hrvatskih rudarskih inženjera i
- European Federation of Explosives Engineers.

Također, član je te sudjeluje u radu tehničkih odbora pri Hrvatskom zavodu za norme:

- HZN/TO 511 Eksplozivi za civilnu uporabu i
- HZN/TO 108, Mehaničke vibracije i udari

Aktivno se služi engleskim jezikom i posjeduje osnovno znanje iz njemačkog jezika.

Popis objavljenih radova

Znanstveni radovi u drugim časopisima

1. Bohanek, V., Dobrilović, M. & Škrlec, V. (2012): Brzina mlaza linijskih kumulativnih rezača, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 25, 73-80, (članak, znanstveni).

2. Škrlec, V., Bohanek, V. & Deković, Z. (2012): Brzina detonacije emulzijskih eksploziva smanjene gustoće, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 25, 115-122, (članak, znanstveni).

Ostali radovi u drugim časopisima

1. Dobrilović, M., Kuhinek, D. & Bohanek, V. (2012): Laboratorij za umjeravanje opreme za praćenje utjecaja miniranja na okoliš - Umjerni laboratorij i servis seizmografa Instantel, Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Mineral. 1/2012, 22-24, (članak, stručni).

2. Bohanek, V. Dobrilović, M. & Škrlec, V. (2009): Izkop predora z miniranjemv v posebnim pogojih, primer tunela Brzet, Mineral strokovna udruga za rudarstvo i gradbeništvo, 1/2009; 28-31 (članak, ostalo).

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

1. Dobrilović, M., Bohanek, V. & Škrlec, V. (2012): Special Conditions in Tunnel Excavation by Blasting Near The Existing Structures, Under City Proceedings of the Colloquium on Using Underground Space in Urban Areas in South-East Europe, Kolić, Davorin (ur.), Zagreb: HUBITG, 672-684, (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

2. Dobrilović, M., Bohanek, V. & Škrlec, V. (2012): Calibration Method for Velocity of Detonation Measuring Device , Proceedings of the 15th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pachmáň, Jiří, Šelešovský, Jakub, Matyáš, Robert (ur.), Pardubice, University of Pardubice, 495-501 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

3. Bohanek, V., Dobrilović, M. & Škrlec, V. (2010): Jet Pressure Measurement of Linear Shaped Charge, Proceedings of the 13th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pachmáň, Jiří, Šelešovský, Jakub, Matyáš, Robert (ur.), Pardubice, University of Pardubice, (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

4. Dobrilović, M., Bohanek, V. & Škrlec, V. (2010): Program of Measurements During Excavation by Blasting Of „Katarina“ Tunnel, 11th International Conference Underground Consruction. 580-586, (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

5. Dobrilović, M., Bohanek, V., Škrlec, V., Stanković, S. & Dobrilović, I. (2010): Instructions for Calibration Method for Measuring Device of Detonation Velocity, Proceedings of 11th International Carpatian Control Conference, K. Varga (ur.), Miskolc, University of Miskolc, 285-288, (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

6. Dobrilović, M., Ester, Z., Bohanek, V. & Deković, Z. (2009): Special Blasting Conditions and Measurement Program During the Excavation of the Brzet Tunnel, Budapest Conference Procedings 2009, P. Masser et al (ur.), Budimpešta, European Federation of Explosives Engineers, UK., 3-9, (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

7. Dobrilović, M., Ester, Z., Bohanek, V. & Škrlec, V. (2009): Linear Shaped Charge with Emulsion Explosive, Proceedings of the 12th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Jiri Pachman, Jakub Selesovsky, Robert Matyas (ur.), Pardubice, Press Center of University of Pardubice, 487-493, (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

8. Dobrilović, M., Ester, Z., Bohanek, V. & Škrlec, V. (2009): Safe Blasting Parameters and Seismic Influences during Construction Pit Excavation, Proceedings of the Thirty-Fifth Conference on Explosives and Blasting Tehnique, Clvelend, International Society of Explosives Engineers, 119-130, (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

9. Dobrilović, M., Škrlec, V., Bohanek, V., Stanić, N. & Ester. Z.(2008): Disposability of the Energy Produced in Shock Tube, Proceedings of the 11th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Jan Ottis, Jiří Pachmáň (ur.), Pardubice , University of Pardubice, 493-499, (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

10. Ester, Z., Dobrilović, M., Bohanek, V. & Kuhinek, D. (2007): New Method of Initiation of the Detonator Fuse Head, Energy Disposability, Proceedings of the 10th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Jan Ottis, Miloslav Krupka (ur.), Pardubice, University of Pardubice, 594-599, (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom

1. Dobrilović, M. Bohanek, V. & Ester Z. (2006): Smanjenje utjecaja podmorskih miniranja na zaštićene kulturne spomenike u Zadru, Istraživanje, eksploatacija i prerada čvrstih mineralnih sirovina, Žunec N. (ur.), Zagreb, 260-265, (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

Sažeci u zbornicima skupova

1. Bohanek, V., Dobrilović M. & Havranek T. (2010): Primjena direktiva novog pristupa za gospodarske eksplozive i pirotehnička sredstva te njihov utjecaj na ulogu ispitnih laboratorija, Kompetentnost laboratorija 2010 knjiga sažetaka, (poster, domaća recenzija, sažetak).

Neobjavljena sudjelovanja na skupovima

1. Bohanek, V. (2008): Iskop tunela miniranjem u specijalnim uvjetima - primjer tunel „ Brzet“, Zbornik radova MinCON 2008, (predavanje, domaća recenzija, ppt prezentacija).