Tlak detonacije u bušotini

Robotić, Mihael

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:169:094594

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

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







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

TLAK DETONACIJE U BUŠOTINI

Diplomski rad

Mihael Robotić
R 85

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni Fakultet

Diplomski rad

TLAK DETONACIJE U BUŠOTINI

MIHAEL ROBOTIĆ

Završni rad izrađen na: Sveučilištu u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U diplomskom radu obrađena je tema tlak detonacije u bušotini. Rad je podijeljen u četiri dijela. U prvom dijelu je opisan utjecaj mehanike tla na miniranje. U drugom dijelu su opisani tlak i brzina detonacije. U trećem dijelu su opisane metode i tehnike mjerenja i mjerni instrumenti. U četvrtom dijelu su opisani načini za određivanje parametara detonacije i metode za procjenu vrijednosti tlaka i brzine detonacije.

Ključne riječi: Tlak detonacije, brzina detonacije, temperatura detonacije, mjerenje parametara

Diplomski rad sadrži: 34 strana, 12 slika i 16 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF-a
Dr. sc. Zvonimir Ester, vanjski suradnik RGNF-a
Dr. sc. Želimir Veinović docent RGNF-a

Datum obrane: 24.9.2015.

University of
Faculty of Mining,
Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

DETONATION PRESSURE IN BLASTHOLE

MIHAEL ROBOTIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining and Geotechnical Engineering,
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

The theme in Master's thesis it's abouth detonation pressure in blasthole. Thesis is splited in four chapters. In the first chapter is described the effect of Rock mehanic in blasting. In the second chapter is described pressure and detonation velocity. In third chapter is decribed methods, measuring technics and gauges. In fourth chapter is described methods for determination of detonation parameters, methods for estimating pressure and value of detonation velocity.

Keywords: Detonation pressure, detonation velocity, detonation temperature, measuring parameters
Thesis contains: 34 pages, 12 Figures and 16 refrences
Original in: Croatian
Thesis deposit at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD. Mario Dobrilović, Associate Profesor

Reviewers: PhD. Mario Dobrilović, Associate Profesor
PhD. Zvonimir Ester, Subcontractor
PhD. Želimir Veinović, Assistant Profesor

Date of defense: September 24, 2015

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....II

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNE JEDINICE.....III

NEPOZNATE OZNAKE.....VII

1. UVOD..... 1

2. TLAK DETONACIJE U BUŠOTINI 2

2.1. MEHANIZMI DROBLJENJA STIJENE U MINIRANJU 2

3. TLAK I BRZINA DETONACIJE..... 6

3.1. TLAK DETONACIJE.....6

3.2. TLAK PLINOVA.....8

3.3. TLAK U MINSKOJ BUŠOTINI 9

3.4. IDEALNA DETONACIJA..... 10

3.5. NEIDEALNA DETONACIJA 11

4. MJERENJE I MJERNI INSTRUMENTI..... 13

4.1. MJERENJE TLAKA DETONACIJE „DENT“ TESTOM..... 14

4.2. MJERENJE TEMPERATURE DETONACIJE 15

4.3. PROTOTIP INSTRUMENTA ZA MJERENJE DETONACIJE 15

4.4. PRELIMINARNI REZULTATI EXPRESS TEHNOLOGIJOM 17

5. METODE ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA 19

5.1. TEST LETEĆIH PLOČA 20

5.2. AKVARIJ TEST..... 24

5.3. PROCJENA TLAKA DETONACIJE I BRZINE EKSPLOZIJE 26

5.4. RAČUNANJE TLAKA DETONACIJE CHNO EKSPLOZIVA..... 28

5.5. TEORETSKA PROCJENA TLAKA DETONACIJE ZA CHNO EKSPLOZIVE . 30

6. ZAKLJUČAK 32

7. LITERATURA..... 33

POPIS SLIKA

Slika 3-1. Prikaz idealne detonacije u p-V dijagramu (Cunningham, 2006) 11

Slika 3-2. Prikaz neidealne detonacije u p-t dijagramu (Cunningham, 2006) 12

Slika 4-1. Shema senzora za mjerenje tlaka detonacije (Cavanough, 2011).....16

Slika 4-2. Shema osjetila za mjerenje temperature setonacije (Cavanough, 2011) 16

Slika 4-3. Prikaz rezultata izmjerenog tlaka EXPRESS metodom (Mencacci i Chavez, 2005).....18

Slika 4-4. Prikaz rezultata izmjerenog tlaka detonacije za ANFO eksploziv (Mencacci i Chavez 2005).....18

Slika 5-1. Struktura detonacijskog vala (Sućeska, 1995).....19

Slika 5-2. Određivanje brzine metalne ploče slobodne površine elektrokontaktnim sondama (Sućeska, 1995).....20

Slika 5-3. Određivanje brzine slobodne površine optičkom metodom (Sućeska, 1995).....22

Slika 5-4. Brzina ploče slobodne površine kao funkcija debljine ploče (Sućeska, 1995)...24

Slika 5-5. Shema akvarij testa (Sućeska, 1995) 25

Slika 5-6. Akvarij test s blokom pleksiglasa kao transparentni materijal (Sućeska, 1995).....26

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNE JEDINICE

Oznaka	Značenje	Jedinica
p_m	tlak na udranoj fronti	(kbar)
τ	vrijeme rasterećenja	(s)
t	vrijeme	(s)
S_t	vlačna čvrstoća stijene	(GPa)
v_{ti}	brzina	(m/s)
i_{th}	fragmenti na slobodnoj površini	(-)
ρ	gustoća stijene	(g/cm^3)
p_d	tlak detonacije	(Pa)
p_1	početni tlak	(Pa)
ρ	gustoća eksplozivne tvari	(kg/m^3)
v_d	brzina detonacije	(m/s)
u	brzina tvari iza fronte udarnog vala	(m/s)
γ_{CJ}	koeficijent adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnine	(-)
C_p	molni toplinski kapacitet pri stalnom tlaku	(J/mol K)
C_V	molni toplinski kapacitet pri stalnom volumenu	(J/mol K)
A, B i C	eksperimentalno određene konstante za pojedinu eksplozivnu tvar	(-)
Pe	tlak eksplozije	(Pa)
P_{cj}	tlak detonacije u CJ točki	(Pa)
P_r	tlak dobiven na površini stijene	(Pa)
Vb	volumen eksploziva	(cm^3)
Vh	volumen bušotine	(cm^3)

f	omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine	(-)
$Ø_e$	promjer eksplozivnog punjenja	(mm)
$Ø_b$	promjer minske bušotine	(mm)
L_e	duljina eksplozivnog punjenja	(mm)
L_b	duljina minske bušotine	(mm)
d	debljina ploče	(mm)
U_m	brzina udarnog vala	(m/s)
t_m	vremenski interval između 1 i 2 para sondi	(s)
v_{sp}	brzina metalne ploče slobodne površine	(m/s)
ts	vrjeme gibanja ploče slobodne površine	(s)
h	visina prstena	(mm)
W_m	brzina tereta	(m/s)
r	parametar reflektiranog vala	(-)
m	parametar metalne ploče	(-)
p,W	parametri ovisni o CJ točki	(-)
$c,s\ i\ z$	eksperimentalne konstante	(-)
R_m	površina eksplozivnog punjenja	(cm^2)
a_1-a_4	koeficijenti	(-)
U_m	brzina udarnog vala	(m/s)
W_m	brzina tereta	(m/s)
ρ	gustoća punjenja	(g/cm^3)
ρ_{max}	teoretska gustoća	(g/cm^3)
p_{emaxi}	teoretski tlak detonacije	(GPa)
α_{evi}	volumen frakcije za i vrstu	(cm^3)

ρ_{emaxi}	teoretska gustoća za *i* vrstu mješavine	(g/cm^3)
g_{ei}	masa frakcije za *i* vrstu mješavine	(g)
T_{ad}, T'_{ad}	približne temperature detonacije za ograničene i neograničene uvjete	(°C)
Q_{ad}	razlika topline	(-)
$\Sigma Cv, \Sigma Cp$	suma molarnog toplinskog kapaciteta pri konstantnom volumenu i tlaku	(J/mol K)
η	parametar	(mol/g)
P_{cj}, P'_{cj}	približni tlakovi detonacije za ograničene i neograničene uvjete	(kbar)
x_i	prilagođavajući parametar	(-)
SSP_i	specifični strukturni parametar	(-)

NEPOZNATE OZNAKE

Oznaka	Značenje
VoD	brzina detonacije
DDZ	detonacijska putujuća zona
PVDF	polivinelinfluorid
EXPRESS	EXplosive PRESSure
TNT	trinitrotoluen
RDX	heksogen
BKW	Becker – Kistakosky – Wilson
JCZ	Jacob – Cowperthwaite – Zwisler
KHT	Kihava – Hikita - Tanaka

1. UVOD

Eksplozivi prilikom eksplozije (redovite detonacije) oslobađaju kemijsku energiju u obliku topline. Detonacijom u minskoj bušotini značajan dio toplinske energije pretvara se u mehanički rad koji se obavlja na stijenskom okruženju. Njegovim djelovanjem dolazi do frakturiranja, drobljenja i pomicanja minirane stijene. Proces drobljenja u okruženju stijene se može opisati unutar djelovanja udarne faze i djelovanja plinske faze. Za učinak djelovanja udarne faze od ključnog je značaja tlak koji djeluje na stijenu. Kod eksploziva je potrebno poznavati svojstva eksploziva. Poznavanje i određivanje određenih parametara može imati velik utjecaj u miniranju. Ispitivanja u svrhu dobivanja parametara obavljaju se na idealnim i ne idealnim eksplozivima. Mjerenjem tlaka, temperature i brzine detonacije može se bolje razumjeti izvedba detonacije eksplozivnog punjenja. Eksperimentalnim ili procijenjenim podacima koji se dobivanju poznatim metodama i tehnikama dobivaju se potrebni podaci o eksplozivima za komercijalnu upotrebu. Metode i tehnike za mjerenje opisane u ovom radu poput optičke metode, podvodnog detonacijskog testa, testa letećih ploča možemo dobiti podatke o eksplozivima. Eksperimentalne metode za određivanje parametara detonacijskog vala su metode gdje se parametri određuju direktno i bilježenje parametara određivanjem stanja refleksije udarnog vala od barijere. Procjena tlaka detonacije može se računati sa eksperimentalnim rezultatima ali i bez njih. Pomoću dobivenih podataka lakše je odabrati potreban eksploziv i kvalitetnije obaviti miniranje.

2. TLAK DETONACIJE U BUŠOTINI

Čimbenici koji se odnose na najučinkovitiju primjenu miniranja su praćeni raspravom o načinima primjene kako bi se postigla optimalna učinkovitost eksploziva. Sve ove faktore potrebno je uzeti u obzir za isplativije miniranje. Faktori koji se smatraju najvažnijima u miniranju stijene (Clay et al., 1964):

1. Maksimalna dostupna energija – određena temperaturom eksplozije i mehaničkom efikasnošću, faktor je usko povezan s načinom primjene.
2. Tlak u bušotini – koji je maksimalni tlak u bušotini postignut u bušotini nakon prolaska detonacijskog vala i to prije nego se stijena u okolini bušotine pomaknula ili primjetno stisnula. Tlak bušotine određen je uvjetima eksplozije te adijabatskim tlakom eksplozije, gustoćom punjenja minske bušotine i stanju razlomljenosti stijene u okolini bušotine koja je ispunjena eksplozivom.
3. Važni fizički uvjet u primjeni eksploziva:

- specifična potrošnja eksploziva ili odnos mase eksploziva naspram volumena izminirane stijene,
- relativna impedencija ili odnos impedencije eksploziva prema impedanciji stijene,
- linija manjeg otpora te razmak između bušotina odnosno geometrijski parametri minskog polja
- fizička svojstva stijena kao što su heterogenost, rasjedanje te mikro i makro pukotine

2.1. MEHANIZMI DROBLJENJA STIJENE U MINIRANJU

Mehanika stijena trenutno značajno doprinosi razvoju znanosti k boljem razumijevanju i efektivnijoj primjeni eksploziva u miniranju. Razvoj metoda za mjerenje tlaka udarnih i detonirajućih valova je omogućila kvantitaivni rad u ovom području. Drobljenje uslijed naprezanja nastalih vlačnim valovima, prema nekim teorijama je jedini mehanizam drobljenja stijene. Jednako tako, tlačna naprezanja mogu djelovati kod manje tvrdih i gustih stijena. Tlačni valovi razvijaju refleksiju na slobodnoj površini, te prelaze u vlačne valove. Teorija udarnih valova u miniranju potencira, fenomen uspješne refleksije udarnih valova na slobodnoj površini. Neki znanstvenici smatraju taj proces jedinim načinom drobljenja tvrdih stijena miniranjem, a drugi zastupaju mehanizme usitnjavanja vlačnim silama koji su dokazani eksperimentalno. Udarni valovi nastali detonacijom jakih eksploziva razdvajaju se u P-valove koji su većih brzina, P valove i u valove manjih brzina

odnosno S-valove. Za njih se smatra da uzrokuju radijalni lom u okolini minske bušotine. Zona drobljenja u blizini bušotine, tvrdim stijenama nije izražena, što je dokazano pokusima s polovicama bušotina na slobodnoj površini. Pri tome, oslobođena energija je utrošena na fragmentaciju i pomicanje stijene na slobodnoj površini, a ne na usitnjavanje materijala u zoni drobljenja.

Teorija energije usitnjavanja stijene slična je modelu u kojemu se lomljenje stijene još naziva i „oslobađanje tereta“. Područje naprezanja prati efekt trenutnog prijenosa energije eksplozije s plinovitih produkata u ekspanziji u potencijalnu energiju jake kompresije što je produkt produkt visokog tlaka te izuzetno brzog prirasta tlaka detonacije s jedne strane i velike tromosti stijene, s druge. Smatra se da je unutar udarnog djelovanja na stijenu preneseno manje od 1 % energije eksploziva. Ukupna energija prenosi se do stijene početnim stlačivanjem te se smatra da može prenijeti znatno veći udio raspoložive energije eksploziva u ranijoj fazi eksplozije, sve dok trenutni inicijalni udarni val ne dostigne na slobodnu površinu. Relativno dugo trajanje naprezanja može biti izvor intenzivnijeg usitnjavanja stijene.

Vrijeme potrebno za porast rast naprezanja znatno je veće od vremena potrebnog za detonaciju naboja, a za rasterećenje je potrebno još dulje vrijeme.

U teoriji miniranja djelovanjem udarnog vala, definirane su tri zone sitnjenja:

1.) fragmentacijska zona počinje na slobodnoj površini i širi se prema unutra.

2.) cjelovita zona koja se nalazi između fragmentacijskih zona

3.) izdrobljena zona u okolini bušotine.

Prisutnost cjelovite zone ovisi o parametrima miniranja, obzirom na odnose geometrijskih parametara i parametar punjenja.

Smatra se da tlak u udarnom valu opada s udaljenosti od udarne fronte prateći jednadžbu (2-1):

$$p = p_m e^{-t/\tau} \tag{2-1}$$

Brzina izbačenih fragmenata sa slobodne površine uzrokovana refleksijom vlačnog vala naprezanja, kada je naprezanje veće od vlačne čvrstoće S_t stijene dana je u jednadžbi (2-2);

$$v_{ti} = 2p_i/(\rho V)_i \tag{2-2}$$

Ako udarni val dođe do slobodne površine s maksimalnim tlakom p_m, tada ima potencijal stvaranja N ravnina loma (2-3) dovoljnim naprezanjem savijanjem uzastopnim ljuskanjem (djelovanjem reflektiranog vala), a povratni val se kreće nazad prema stijenskoj masi.

$$N \leq p_m / St \tag{2-3}$$

Stanje najvećeg broja odgovara tome da nema gubitka uslijed trenja, viskoznosti i zagrijavanja stijene tijekom ljuskanja. Obzirom na eksponencijalno smanjenje naprezanja, odnosno tlaka vala, koji je preslikan u područje vlačnog naprezanja prilikom refleksije do iznosa tlaka u veličini jednakoj vlačnoj čvrstoći stijene. Brzina prvog fragmenta mora biti najveća jer p_i je za taj fragmet najveći. Na osnovu tog razmatranja, u teoriji drobljenja udarnim valovima, zaključuje se da odvajanje ljuskanjem idućih dijelova stijene nastupa diskontinuirano kada vrijednost tlaka doseže vrijednost vlačne čvrstoće. Prema tome valovi naprezanja bi morali biti višestruki, što nije dokazano eksperimentalno. Iz veličine tlaka na slobodnoj površini, promatrane početne brzine fragmenata v_t na slobodnoj površini i poznatom vlačnom čvrstoćom stijene ujedno se može zaključiti da je frakturiranje na slobodnoj površini od manjeg značaja u odnosu na frakturiranje savijanjem. Promatrana početna brzina fragmenta nalazi se u rasponu 3-7 m/s. Uz deseterostruke iznose tlaka u odnosu na vlačnu čvrstoću stijene, prema teoriji stijena bi bila fragmentirana u nekoliko dijelova što prilikom miniranja nije slučaj. U slučaju sporijeg rasterećenja naprezanja s duljim trajanjem djelovanja tlaka u bušotini mjerene brzine minirane stijene na slobodnoj površini imaju brzinu oko 30 m/s, znatno veći od brzine fragmenata s slobodne površine. Izračuni su napravljeni koristeći jednadžbu (2-4) po newtonovoj jednadžbi koristeći metodu postepene integracije:

$$\frac{Md^2r}{dt^2} = sila \tag{2-4}$$

Gornja granica se izračunava pod pretpostavkom idealnog ograničavanja, ne stišljivosti i savršenog usitnjavanja stijene za postizanje ujednačenog ubrzanja hipotetičkog polucilindričnog širenja savršeno zatvorene detonacije unutar stijenske mase. Nakon početne pojave udarnog vala oslobođeni val vraća se natrag u stijensku masu brzinom usporedivom s brzinom početnog udarnog vala (Clay et al., 1964).

Gdje su:

p_m - tlak na udarnoj fronti	(kbar)
τ - vrijeme rasterećenja	(s)
t - vrijeme prolaska vala kroz promatranu točku	(s)
S_t – vlačna čvrstoća stijene	(GPa)
v_{ti} - brzina	(m/s)
i_{th} - fragmenti na slobodnoj površini	(-)
ρ – gustoća stijene	(g/cm^3)
N – potencijal stvaranja loma	(-)

3. TLAK I BRZINA DETONACIJE

U eksplozivnom punjenju minske bušotine prilikom detonacije pri visokom tlaku dolazi do gotovo trenutnog oslobođenja energije i produkata reakcije te nastaju tlačni valovi u eksplozivu i okolnom stijenskom materijalu. Nastali valovi se nazivaju detonacijski ili udarni valovi. Detonacijski val je zapravo udarni val podržan eksplozivnom reakcijom koju inicira udarni val i širi je prolaskom kroz eksploziv (Škrlec, 2015).

Udarni tlak je jedan od najvažnijih čimbenika prilikom miniranja u svrhu očuvanja konture površine nastao detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini. Djelovanje udarnog tlaka može se podijeliti u 3 cjeline:

- tlak detonacije,
- tlak plinova,
- tlak u minskoj bušotini.

3.1. TLAK DETONACIJE

Tlak koji se nalazi odmah iza fronte udarnog vala i prethodi tlaku koji je nastao ekspanzijom plinovitih produkata detonacije. Tlak detonacije može se mjeriti osjetilima s vrlo brzim odzivom kao što su elektrootporna osjetila i piezo osjetila ili posrednim metodama mjerenjem udara metalnih ploča pokretanih detonacijskim valom, zatim mjerenjem brzine udarnih valova u pojedinim sredinama izazvanih detonacijskim valom, pokusima u vodi itd. (Škrlec, 2015).

Tlak detonacije može se izračunati prema jednadžbi (3-1):

$$P_{\mathrm{d}} = P_1 + \rho v_{\mathrm{d}} u \tag{3-1}$$

Jednadžba broj (3-1) može se zapisati u ovom obliku (3-2):

$$P_{\mathrm{d}} = \rho v_{\mathrm{d}} u \tag{3-2}$$

Brzina tvari iza fronte udarnog vala, u, može se napisati kao (3-3):

$$u = \frac{v_{\mathrm{d}}}{(1+\gamma_{\mathrm{CJ}})} \tag{3-3}$$

Iz toga slijedi (3-4):

$$P_d = \frac{\rho v_{\mathrm{d}}^2}{(1+\gamma_{\mathrm{CJ}})} \tag{3-4}$$

Koeficijent adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini, γ_{CJ}, je koeficijent koji pokazuje omjer molnog toplinskog kapaciteta pri stalnom tlaku i molnog toplinskog kapaciteta pri stalnom volumenu (3-5).

$$\gamma_{CJ} = \frac{C_p}{C_V} \tag{3-5}$$

Većina eksploziva u čvrstom stanju, gustoće od 1,00 g/cm^3 do 1,80 g/cm^3, γ_{CJ} iznosi približno 3.

Kalmet i Huwritz (1968) su predložili slijedeći obrazac za izračun koeficijenta adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini i to za eksplozive raspona gustoća od 0,20 g/cm^3 do 2,00 g/cm^3 (3-6):

$$\gamma_{CJ} = A + \frac{B}{\rho} + C\rho \tag{3-6}$$

Kalmet i Jacobs (1968) su predložili obrazac za izračun koeficijenta adijabatske ekspanzije sa slijedećim konstantama (3-7):

$$\gamma_{CJ} = \frac{0{,}655}{\rho} + 0{,}702 + 1{,}107\rho \tag{3-7}$$

Gdje su:

P_d – tlak detonacije (Pa)

P_1 – početni tlak (Pa)

ρ – gustoća eksplozivne tvari (kg/m^3)

v_d – brzina detonacije (m/s)

u – brzina tvari iza fronte udarnog vala (m/s)

γ_{CJ} – koeficijent adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini (-)

C_p – molni toplinski kapacitet pri stalnom tlaku (J/mol K)

C_V – molni toplinski kapacitet pri stalnom volumenu (J/mol K)

A, B i C – eksperimentalno određene konstante za pojedinu eksplozivnu tvar (-)

3.2. TLAK PLINOVA

Tlak plinova može se definirati kao tlak do kojeg dolazi zbog ekspanzije plinovitih produkata detonacije i to kada bi plinovi zauzimali volumen eksplozivnog punjenja prije detonacije. Prilikom detonacije eksploziva nastaju plinovi čija količina i sastav ovise o vrsti eksploziva. Volumen plinova koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva izražava se u dm^3, a mjeri se kod temperature od 0 °C i tlaka od 1 bar. Najveći tlak koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva u zatvorenom prostoru volumena 1 dm^3 naziva se specifični tlak i izražava se u barima. Na osnovi volumena plinova i temperature eksplozije može se izračunati specifični tlak. Tlak nastalih plinova ovisi o količini razvijenih plinova, temperaturi eksplozije i volumena u kojem je izvedena eksplozija. Kod brizantnih eksploziva tlak plinova može doseći i nekoliko tisuća bara (Škrlec, 2015).

Općenito gledajući, smatra se da tlak eksplozije, P_e, ima vrijednost polovice vrijednosti tlaka detonacije te se može prikazati slijedećom jednadžbom (3-8) (Persson et al.1994):

$$P_e = \frac{1}{2} P_d \tag{3-8}$$

Odnosno (3-9):

$$P_e = \frac{\rho v_d^2}{8} \tag{3-9}$$

Različiti autori su razvili više različitih obrazaca za procjenu tlaka eksplozije na osnovu vlastitih iskustava. Gherig (1982) je predložio slijedeću jednadžbu (3-10):

$$P_e = 0{,}1125 \rho v_d^2 \tag{3-10}$$

Gdje su:

Pe – tlak eksplozije (Pa)
Pd – tlak detonacije (Pa)
ρ - gustoća eksplozivne tvari (kg/m^3)
v_d – brzina detonacije (m/s)

3.3. TLAK U MINSKOJ BUŠOTINI

Tlak u minskoj bušotini može se opisati kao tlak plinova oslobođenih detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini koji prelazi na stjenku minske bušotine. Poznat kao „eksplozivni“ tlak, "konstantni volumen" tlak ili „stagnirajući“ tlak, definiran je kao izvršni tlak ostvaren nakon detonacije eksploziva.

Za potpuno napunjene minske bušotine pokazalo se da je tlak koji djeluje na stjenku bušotine jednak tlaku eksplozije odnosno iznosi polovicu tlaka detonacije (Cunningham, 2006):

Jednadžba tlaka u bušotini se zapisuje (3-11):

$$P_d = \frac{\rho \cdot v_d^{\,2}}{4} \tag{3-11}$$

Često je povezana s jednadžbom (3-12),

$$P_{CJ} = \frac{\rho \cdot v_d^{\,2}}{4} \tag{3-12}$$

Derivacijom jednadžbe (3-12) dobiva se (3-13)

$$P_{CJ} = \frac{\rho \cdot v_d^{\,2}}{(\rho + 1)} \tag{3-13}$$

Jednadžba intenziteta pucanja stijene (3-14)

$$P_r = P_b (V_b / V_h) \tag{3-14}$$

Ukoliko minske bušotine nisu potpuno napunjene odnosno ukoliko se koristi eksplozivno punjenje znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine tada se tlak u minskoj bušotini razlikuje od tlaka eksplozije. Za procjenu tlaka u minskoj bušotini, Outcherlony (1997) je predložio slijedeći obrazac :

$$P_{\mathrm{b}} = P_{\mathrm{e}} f^{2\gamma} \tag{3-15}$$

Omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine, f, se računa prema (Outcherlony, 1997):

$$f = \frac{D_{\mathrm{e}}}{D_{\mathrm{b}}} \tag{3-16}$$

Nie (1999) je predložio slijedeći obrazac (Silva, 2007):

$$P_{\mathrm{b}} = P_{\mathrm{e}} \left(\frac{D_{\mathrm{e}}}{D_{\mathrm{b}}} \sqrt{\frac{L_{\mathrm{e}}}{L_{\mathrm{b}}}} \right)^{2\gamma} \tag{3-17}$$

Iz jednadžbe (3-15) je vidljivo da tlak koji djeluje na stjenku bušotine, kod potpuno napunjenih minskih bušotina, te izazvana naprezanja u stijeni prvenstveno ovise o brzini detonacije eksploziva i o njegovoj gustoći.

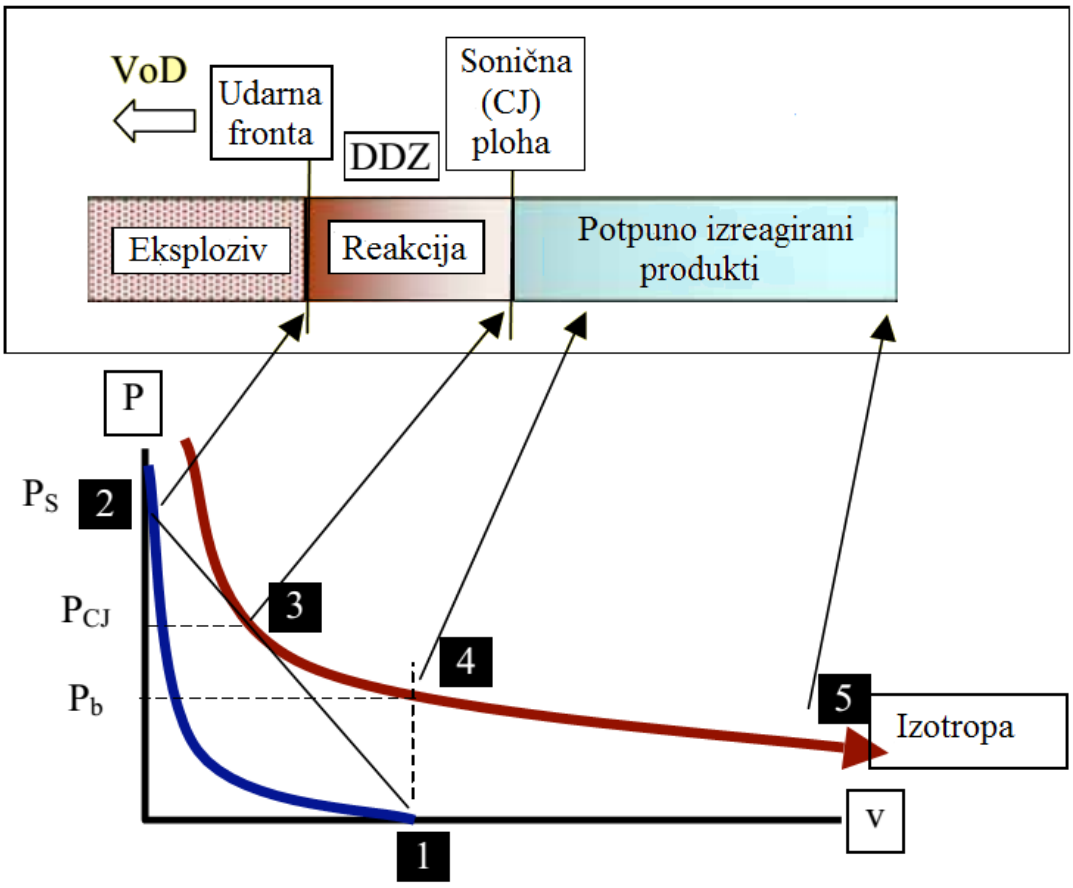
Gdje su:

P_d – tlak detonacije	(Pa)
P_{cj} – sonićni tlak	(Pa)
v_{d} – brzina detonacije	(m/s)
ρ – gustoća eksplozivne tvari	(kg/m^3)
P_r – tlak dobiven na površini stijene	(Pa)
Vb – volumen eksploziva	(cm^3)
Vh – volumen bušotine	(cm^3)
f – omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine	(-)
$\varnothing_{\mathrm{e}}$ – promjer eksplozivnog punjenja	(mm)
$\varnothing_{\mathrm{b}}$ – promjer minske bušotine	(mm)
L_{e} – duljina eksplozivnog punjenja	(mm)
L_{b} – duljina minske bušotine	(mm)

3.4. IDEALNA DETONACIJA

Jednadžba (3-11) dobivena je primjenom osnovnih fizikalnih zakona očuvanja mase, količine gibanja i energije, koji se primjenjuje na idealnu detonaciju. Pri idealnoj detonaciji sav eksploziv izreagira u detonacijskoj putujućoj zoni (DDZ) između udarne fronte i ravnine brzine zvuka.

Idealna detonacija je jednodimenzionalno ravnotežno stanje pri kojem je sav eksploziv izreagirao između udarne fronte i CJ ravnine, te ne ovisi o vremenu, dimenzijama naboja ili vanjskim čimbenicima (Slika 3-1.). Idealno punjenje je potpuno kruto i nevodljivo, te pri detonaciji neće mijenjati svoju temperaturu i volumen te neće apsorbirati energiju (Cunningham, 2006).



Slika 3-1. Prikaz idealne detonacije u p-V dijagramu (Cunningham, 2006).

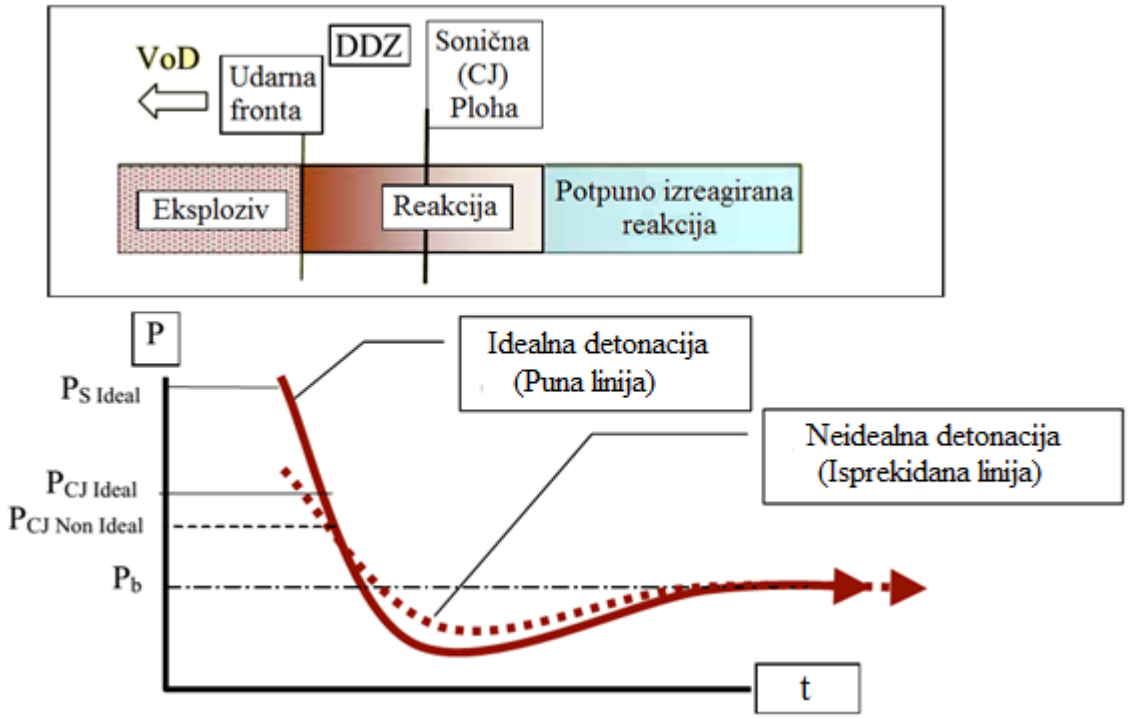
Na slici 3-1. može se vidjeti 5 faza:

1. Stanje eksploziva prilikom iniciranja detonacije,
2. Udarni tlak detonacije,
3. Završetak reakcije i sva kemijska energija je pretvorena,
4. Pb, tlak u bušotini gdje je gustoća produkata eksploziva jednaka originalnoj gustoći,
5. Tlak potpune ekspanzije.

3.5. NEIDEALNA DETONACIJA

Kod eksploziva koji ne detoniraju idealno brzina detonacije manja od idealne vrijednosti. Eksploziv je neidealan jer reakcije nisu u potpunosti završene u točki brzine zvuka (CJ).. Ovisno o tome da li je reakcija završena u CJ točki definira se mogućnost primjene jednadžbe za P_b i P_{cj}. Pogrešno je očekivati da su jednadžbe (3-11) i (3-12) valjane za neidealne brzine detonacije (VOD). Stoga se može sa sigurnošću reći da će u neidealnoj detonaciji P_{cj} biti manji, ali ako eksploziv reagira nakon detonirajuće putujuće

zone (DDZ) tlak će biti ujednačeniji, odnosno manje vršne vrijednosti (Slika 3-2). Idealni slučaj će imati viši CJ tlak ali i jače razrjeđenje (Cunningham, 2006.).



Slika 3-2. Dijagram neidealne detonacije u p-t dijagramu (Cunningham, 2006).

4. MJERENJE I MJERNI INSTRUMENTI

Postoje različite vrste instrumenata za mjerenje i sustava za prikupljanje podataka u svrhu mjerenja tlaka detonacije. Među njima su manganski instrumenti za mjerenje, karbonski otpornici i PVDF osjetila za mjerenje tlaka detonacije. Karbonski otpornici su u prošlosti bili skupi, te isto tako i direktna metoda. Prema Ginsbergu i Asayu (1991) direktne metode su imale visoku točnost mjerenja tlaka detonacije. Wieman (1988) koristi karbonske otpornike za mjerenje tlaka unutar bušotine, Katsabanis i Yeung (1993) i Katsabanis et al. (1994) koristi karbonske otpornike za otkrivanje prekida detonacije i eksploziva (Mencacci i Chavez, 2005).

Manganin se sastoji od mangan-cink-nikal legure s malom promjenom električnog otpora uslijed naprezanja i s visokom tlačnom osjetljivošću. Osjetila se sastoje od rešetki tankih folija na električno izoliranoj podlozi. Razvoj mjerne opreme napajanje za ovaj instrument omogućilo je korištenje napajanja samo na kratko vrijeme tijekom detonacije kako bi se smanjilo zagrijavanje osjetila. Mjerni postav je konfiguriran prema Wheatsonovom mostu. Otpor sklopa se mijenja djelovanjem udarne fronte. Nakon udara most izlazi iz ravnoteže i kao rezultat se dobije promjena napona koja je proporcionalana tlaku koji je djelovao na osjetilo(Cavanough, 2011). Osjetilo za mjerenje tlaka detonacije obloženo je odgovarajućim plastičnim materijalom koji je zaštita od oštećenja. Prilikom jakog udarnog vala tlak djeluje na osjetilo, te time dolazi do povećanja vodljivosti u odnosu na veličinu tlaka. Bez obzira na opterećenje osjetilo ima stalan izvor napona (Mencacci i Chavez, 2005). U ovoj metodi se na tanke ploče pleksiglasa postavljaju dvije elektrode. Prilikom udara udarne fronte u prvu elektrodu dolazi do generiranja signala koji registrira. Pomoću vremena prijenosa udarnog vala kroz pleksiglas, debljine pleksiglasa i hugoniotove krivulje može se odrediti tlak u udarnom valu. Dokazano je da ovaj tip instrumenata osjetljiv na vrlo visoke udarne energije te se ne može koristiti s eksplozivima manje udarne energije.

Karbonski otpornik koristi se za mjerenje udarne energije komercijalnih eksploziva. Princip rada je sličan manganskom tipu instrumenata za mjerenje. Udarni val udarno tlačno djeluje na otpornik, tijelo otpornika čini razmak između čestica ugljika, čime se smanjuje otpor instrumenta. Instrumenti za mjerenje podnose tlak od 500 MPa, a mogu se koristiti i do tlaka od 800 MPa. Vrijednosti su dobivene statičkim testovima obavljenim na instrumentima. Pojava senzora na temelju karbonskih otpornika uvelike je smanjila

troškove mjerenja udara eksploziva i tlaka. Sistem koji se temelji na tehnologiji karbonskih osjetila za mjerenje tlaka naziva se EXPRESS (EXplosive PRESSure) i predstavljeni su od strane Mencaccia i Chaveza (Cavanough i Onederra, 2011).

Express sistem je opremljen s dva kanala. Sustav sprječava oštećenja od nepovoljnih radnih uvjeta kao što su temperatura, udar, vibracija i vremenski uvjeti. Tlak se može izmjeriti u rasponu od 5 do 140 kbar (Mencacci i Chavez, 2005).

Polivinelinfluorid (PVDF) osjetila za mjerenje dokumentiran od strane Silve i Katsabanisa (2003). Sastoji se od polimernog filma debljine do 25 μm, polariziran primjenom visokog napona. Proizvedeni su kontroliranim procesima, time inducirana polarizacija dobro reagira na naprezanje. Imaju brz odgovor, samopogonjeni su i imaju raspon naprezanja preko 400 kbar (Cavanough i Onederra, 2011).

4.1. MJERENJE TLAKA DETONACIJE „DENT“ TESTOM

Jedan od starijih načina mjerenja tlaka detonacije je tkzv. „dent“ testom. Ispitivanje se provodi punjenjem mase 20 g eksploziva. Eksploziv se inicira detonatorom i s 5 g pojačnika eksplozivom C-4. Ovom tehnikom se određuje približno područje tlaka detonacije pojedinih eksploziva. Referentni eksplozivi različitih gustoća se koriste u seriji kalibracijskih testova pri čemu je dubina otiska funkcije tlaka. Iz brzine detonacije eskploziva poznatih gustoća proračunava se tlak detonacije jednadžbom (4-1) (Abegg et al., 1960.):

$$p = 0.01\rho\frac{v_d^{\,2}}{4} \tag{4-1}$$

gdje je:

p – tlak detonacije (bar)

ρ – gustoća (g/cm^3)

v_d – brzina detonacije (m/s)

4.2. MJERENJE TEMPERATURE DETONACIJE

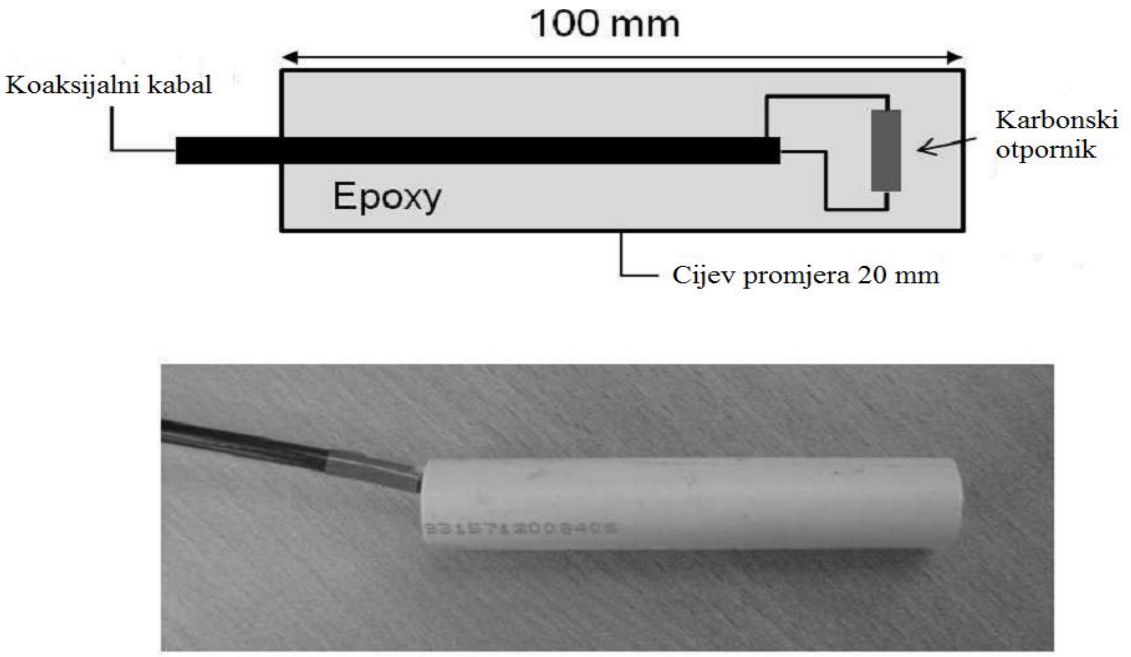
Mjerenje temperature detonacije je zahtjevno obzirom da zbog brzine detonacije i izuzetno kratkog vremena odvijanja kemijske reakcije su za mjerenje potrebna osjetila vrlo kratkog vremena odziva. Zbog jakog udarnog vala osjetilo u većini slučajeva se uništi prije nego što zabilježi izmjerenu temperaturu. Za mjerenja se koriste ispitni tuneli za stvaranje udarnih valova s temperaturom i tlakom sličnih veličina kao kod eksploziva.

Za mjerenje temperature mogu se koristiti i optička elektronička osjetila koja reagiraju na svijetlost iz detonacijske fronte. Svijetlost se iz detonacijske fronte prenosi pomoću svjetlovodnih kablova. Optička osjetila su brzog odziva, te im je to i glavna prednost (Cavanough i Onederra, 2011).

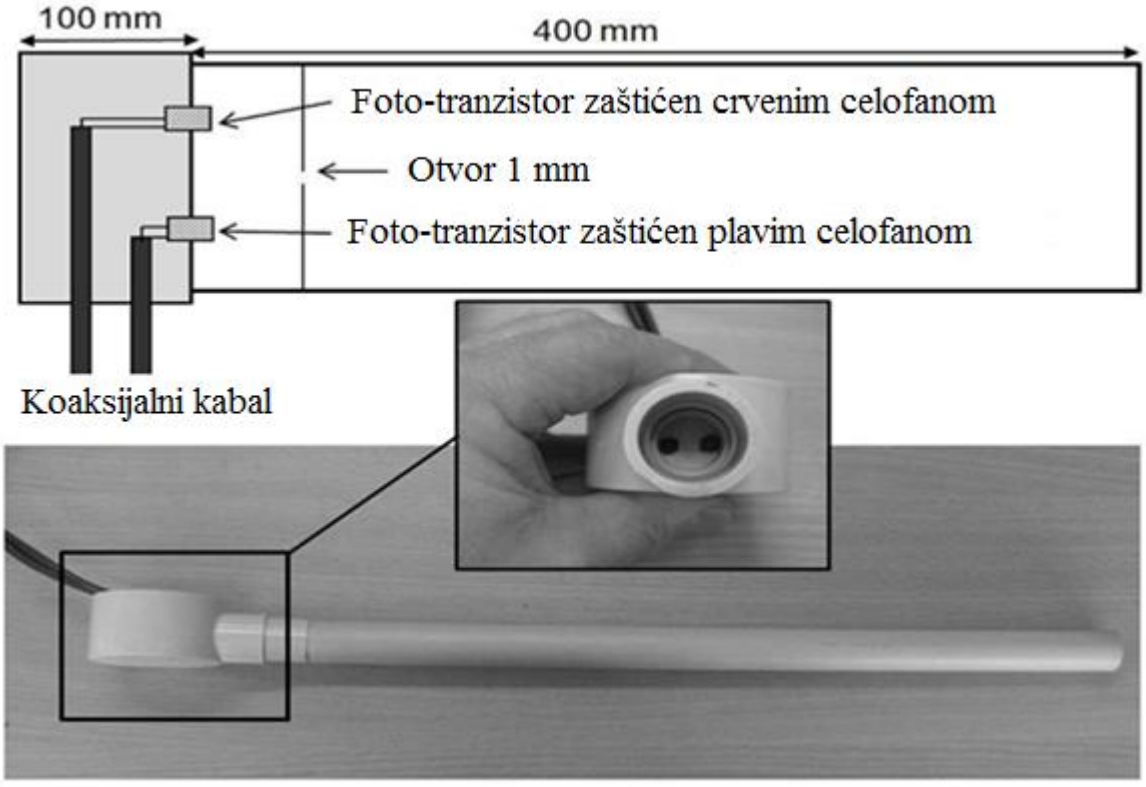
4.3. PROTOTIP INSTRUMENTA ZA MJERENJE TLAKA

Cavanough i Onederra (2011) su opisali prototip instrumenata za mjerenje tlaka detonacije u svim uvjetima (Slika 4-1). Instrument sadrži osjetilo koje se sastoji od karbonskog otpornika ugrađenog u epoksidnu smolu u plastičnoj cijevi promjera 20 mm. Za mjerenje temperature razvijeno je osjetilo na principu pirometra. Sustav za prikupljanje podataka funkcionira kao osciloskop za snimanje istosmjernih signala, a time omogućuje istovremeno mjerenje tlaka, temperature i brzine detonacije (VOD) iz više minskih bušotina.

Provedeno je ispitivanje pomoću prototipa na tri različita eksploziva: Pentolit, TNT i ANFO eksploziv. Rezultati brzine detonacije (VOD) testiranih eksploziva su: za pentolit je izmjerena brzina od 7400 m/s, za TNT je 3850 m/s i za ANFO iznosi 2500 m/s. Rezultati tlaka detonacije su: za pentolit od 6,0 do 6,4 GPa, za TNT od 1,7 do 1,8 GPa i za gorund ANFO od 1,1 do 1,5 GPa. Ovo su rezultati tlaka detonacije kada se senzor nalazio sa strane u odnosu na punjenje. Rezultati pokazuju značajan utjecaj orijentacije sonde i odvajanje na maksimalnom tlaku. Kada se senzor nalazi na kraju punjenja za TNT tlak je iznosio 10,4 GPa, a za ANFO 3,8 GPa. Kod mjerenja temperature koristio se pirometar (Slika 4-2). Temperatura prototipa instrumenta uvijek je orijentirana duž osi eksplozivnog naboja. Rezultati dobiveni za pentolit su reda 4300 K ili 4037 °C. Te vrijednosti su usporedive s izračunatim vrijednostima temperature od 3800 °C, korištenjem računalnog programa za izračun teoretskih parametara idealne detonacije. Vrijednosti dobivene za TNT su 3600 K i za ANFO 2850 K (Cavanough i Onederra, 2011).



Slika 4-1. Shema senzora za mjerenje tlaka detonacije (Cavanough i Onederra, 2011).



Slika 4-2. Shema osjetila za mjerenje temperature detonacije (Cavanough i Onederra, 2011).

4.4. PRELIMINARNI REZULTATI EXPRESS TEHNOLOGIJOM

Mencacci i Chavez (2005) u svom radu opisuju provedena ispitivanja. Ispitivanja su provedena unutar tri studije. U prvoj studiji se uspoređivala učinkovitost patrona eksploziva. Ispitivanja su provedena s dinamitnim tipom eksploziva i emulzijom. Promjer patrone je 50 mm, a bušotine 76 mm. Tlo je saturirano vodom. Maksimalni tlak za dinamit je 120 kbara, a za emulziju maksimalni tlak iznosi 100 kbara (Slika 4-4). Tlakovi koreliraju s brzinom detonacije. Za dinamit brzina detonacije iznosi 6500 m/s, a za emulziju iznosi 5000 m/s. Kinetička energija djeluje sporije, obzirom na manju brzinu detonacije kod emulzije što rezultira nižom oslobođenom energijom u detonacijskoj fronti.

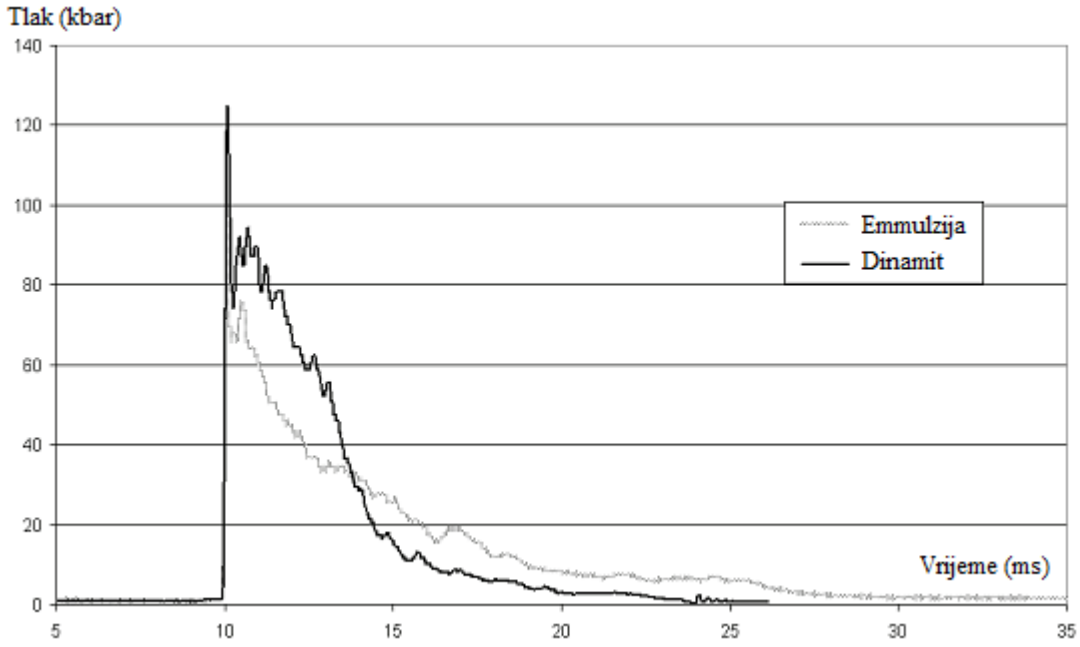
U drugoj studiji mjeren je tlak za ANFO eksploziv. Punjenje je duljine 4 m, razmak između bušotina je 4.5 m, a promjer bušotine 95 mm. Tri reda bušotina inicirani su električnim detonatorom. Maksimalni tlak iznosi 74 kbar (Slika 4-4). Vrijednost je manja od vrijednosti tlaka dinamita i emulzije iz istog razloga. Brzina detonacije iznosi 3800 m/s. 12 μs nakon maksimalnog tlaka tlak iznosi 20 kbar, i sporo opada na 10 kbar nakon 150 μs. Tlak kod ANFO-a sporije opada tijekom 120 μs. Ograničenje uvjeta stijene održava tlak.

Rezultati ispitivanja u čeličnim cijevima istog promjera daju slične vrijednosti tlakova prvih 12 μs. No u čeličnim cijevima tlak naglo opada do 0 kbar.

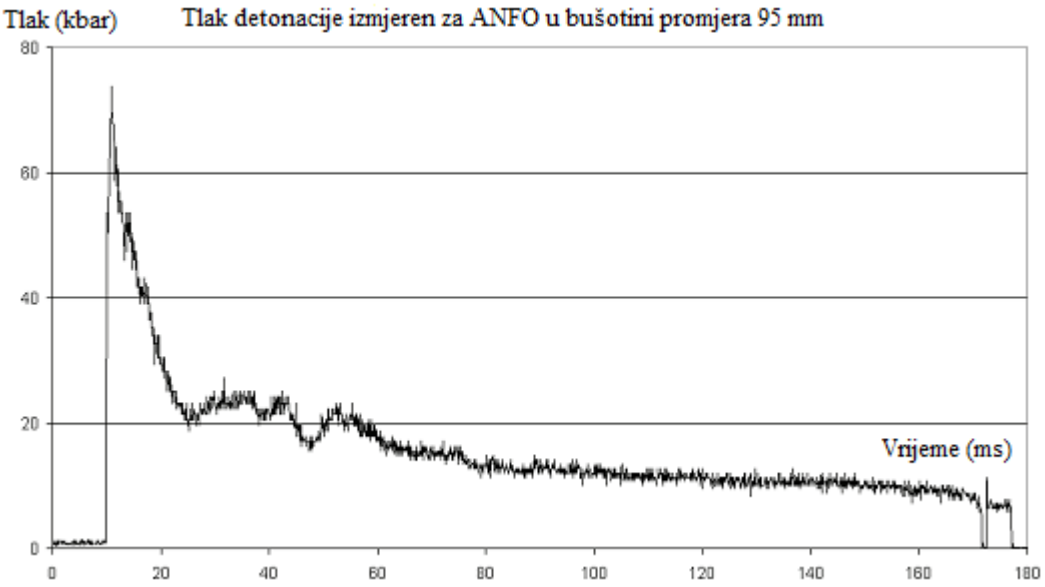
U trećoj studiji ispitivani su različiti promjeri bušotina punjeni *„heavy“* ANFO eksplozivom, odnosno promjeri bušotina od 95 i 110 mm. Za promjer 110 mm tlak iznosi 83 kbar-a, a za promjer 95 mm maksimalni tlak iznosi 74 kbar-a. Time je pokazano da povećanjem promjera bušotine raste i brzina detonacije eksploziva. U prvih 20 μs nakon iniciranja tlak je veći u bušotinama promjera 110 mm, ali nakon 50 μs brzo smanjuje iznos tlaka za promjer 110 mm.

Ispitivana su i dva različita ANFO-a eksploziva komercijalnog naziva Blendex 30 i Blendex 70, u jednakim polumjerima bušotina od 165 mm. Pri ispitivanju, visina etaže iznosila je 15 m, punjenja 5 m, razmak između bušotina 4,5 m. Za Blendex 70 maksimalni tlak iznosi 110 kbara, a za Blendex 30 maksimalni tlak iznosi 84 kbara. Brzina detonacije za Blendex 70 iznosi 5500 m/s, a brzina detonacije za Blendex 30 iznosi 4500 m/s. Nakon 20 μs postižu se različite vrijednosti tlaka zbog različitih brzina detonacije te vremena oslobađanja energije. Blendex 30 sadrži amonijev nitrat u obliku kuglica i te ima manju brzinu detonacije te širu zonu kemijskih reakcija, dok Blendex 70 ima veću brzinu

detonacije, užu zonu reakcija te se energija oslobađa brže. Time se može zaključiti da eksplozivi s istom potencijalnom energijom (istog kemijskog sastava) mogu imati različit učinak na okolnu stijenu, obzirom na uvjete i značajke detonacije (Menciacci i Chavez, 2005). Na slici (4-3.) prikazani su rezultati izmjerenog tlaka EXPRESS metodom.



Slika 4-3. Prikaz rezultata izmjerenog tlaka EXPRESS metodom (Mencacci i Chavez, 2005).



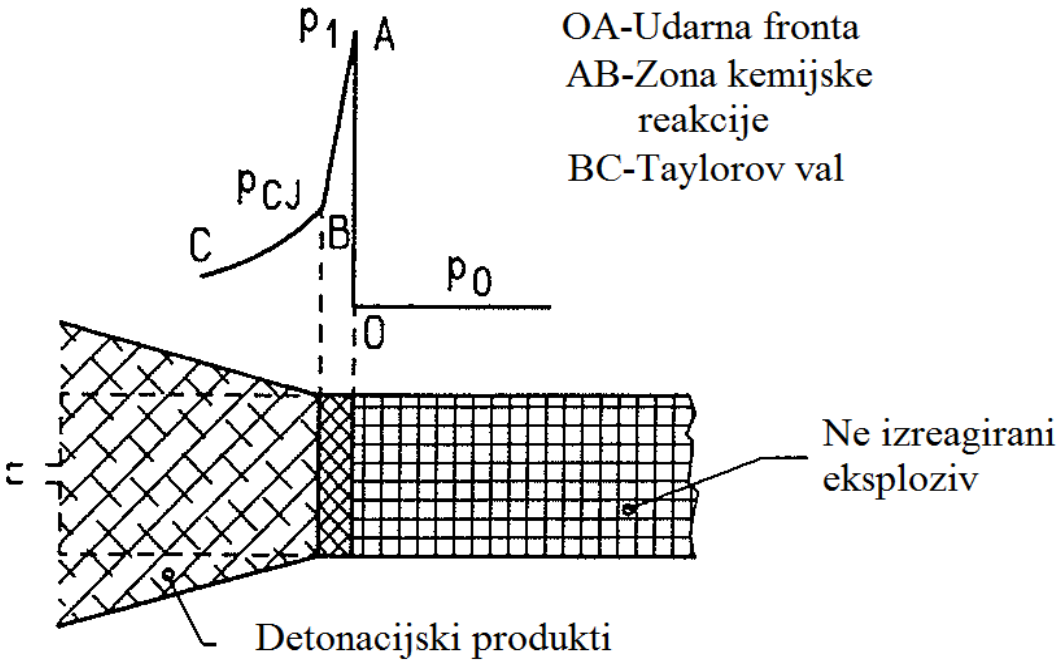
Slika 4-4. Prikaz rezultata izmjerenog tlaka detonacije za ANFO eksploziv (Mencacci i Chavez, 2005).

5. METODE ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA DETONACIJE

Za eksperimentalno određivanje tlaka u CJ točki i trajanje kemijskih reakcija koriste se različite metode. Struktura detonacijskog vala s parametrima prikazana je na slici (Slika 5-1). Provodili su se eksperimenti i teoretska istraživanja za određivanje parametara detonacije krutih eksploziva, jednadžbe stanja adijabatskog stlačivanja. Struktura detonacijskog vala uključuje:

- CJ ravninu,
- zonu kemijskih reakcija,
- Udarnu frontu koju prati zona kemijskih reakcija,
- Taylorovu izontropu ekspanzije produkata detonacije.

Postoje dvije grupe eksperimentalnih metoda određivanja parametara detonacijskog vala. U prvu grupu spadaju metode gdje se parametri određuju direktno, kao što su:. elektromagnetska metoda za određivanje brzine mase produkata detonacije i manganskih elektrootpornih osjetila za određivanje tlaka detonacije. Vrijeme signala mjereno ovim metodama reda je veličina nanosekunda. U drugu grupu spadaju metode za bilježenje stanja refleksije udarnog vala od barijere. Na temelju brzine tankih metalnih ploča može se odrediti tlak detonacije. Pri tome se može koristiti optička metoda, elektrokontaktni tip sondi i osciloskopska tehnika. Pod ovu grupu mogu se pribrojati i metoda za određivanje brzine udarnog vala kroz inertan materijal i akvarij test. Iako se mjerenje odvija u nanosekundama tehnike su i dalje neadekvatne (Sućeska, 1995).



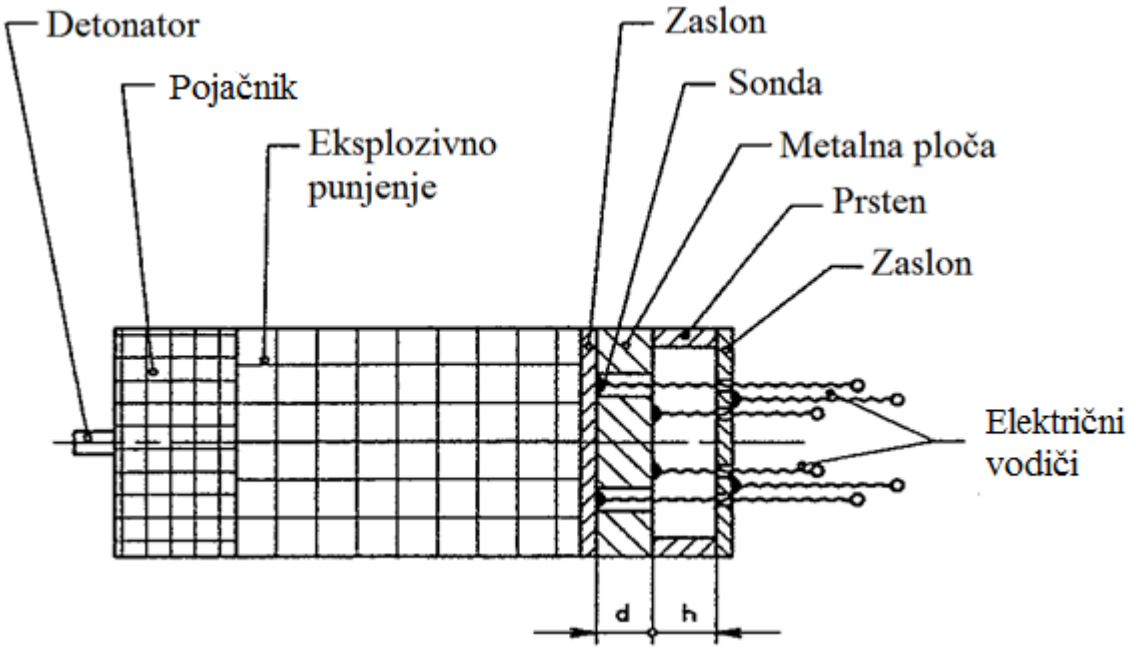
Slika 5-1. Struktura detonacijskog vala (Sućeska, 1995).

5.1. TEST LETEĆIH PLOČA

Određivanje tlaka detonacije eksploziva na temelju brzine slobodne površine metalne ploče prvi je predložio Gornasson. Brzina slobodne površine metalne ploče može se odrediti različitim optičkim metodama ili elektrokontaktnim tipom sonde i tehnikom osciloskopa.

Područje oštrog pada tlaka detonacije na nižim vrijednostima debljine ploče odgovara utjecajem zone kemijske reakcije na parametre udarnog vala u metalnoj ploči. Kada je debljina metalne ploče jednaka 0, tlak odgovara tlaku na CJ točki, odnosno tlaku detonacije. Za dobivanje omjera tlaka udarnog vala i debljine ploče, obavezno je prvo odrediti brzinu ploče slobodne površine kao funkcije debljine ploče. Odgovarajuća mjera tlaka bi se trebala izračunati kao funkcija debljine ploče na temelju odnosa između parametara detonacijskog vala.

Eksperimentalno se može odrediti brzina slobodne površine metalne ploče pomoću elektrokontakta (Slika 5-2) ili osciloskopom i optičkim metodama.



Slika 5-2. Određivanje brzine metalne ploče slobodne površine elektrokontaktnim sondama (Sućeska, 1995).

U elektrokontaktnoj sondi ploča, prsten i zasloni su izrađeni od istog materijala.Za ispitivanje je potrebno tri para sondi. Prvi par dodiruje površinu prvog zaslona i zatvara električni krug u trenutku kada udarni val djeluje na površinu zaslona. Drugi par dira slobodnu površinu metalne ploče i zatvara električni krug u trenutku kada je udarni val napustio slobodnu površinu ploče. Treći par dira vanjsku površinu drugog zaslona u

trenutku kada udar pomakne metalnu ploču zaslona zatvara se strujni krug. Nakon što se izračuna brzina slobodne površine visina prstena služi za mjerenje udaljenosti.

Osciloskopom se snimaju signali proizvedeni strujnim krugom nakon zatvaranja elektrokontaknih sondi. U metalnoj ploči može se dobiti brzina udarnog vala, nakon analize oscilograma.

Brzina udarnog vala može se izračunati prema jednadžbi:

$$U_m = \frac{d}{t_m} \tag{5-1}$$

Na temelju vremenskog intervala između prvog i drugog para sondi može se izračunati brzina slobodne površine metalne ploče.

Sljedeći uvjet mora biti zadovoljen, kako metalna ploča ne bi bila metalna ploča.

$$t_s < t_m \tag{5-2}$$

$$\frac{h}{v_{sp}} < \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{U_m}} \tag{5-3}$$

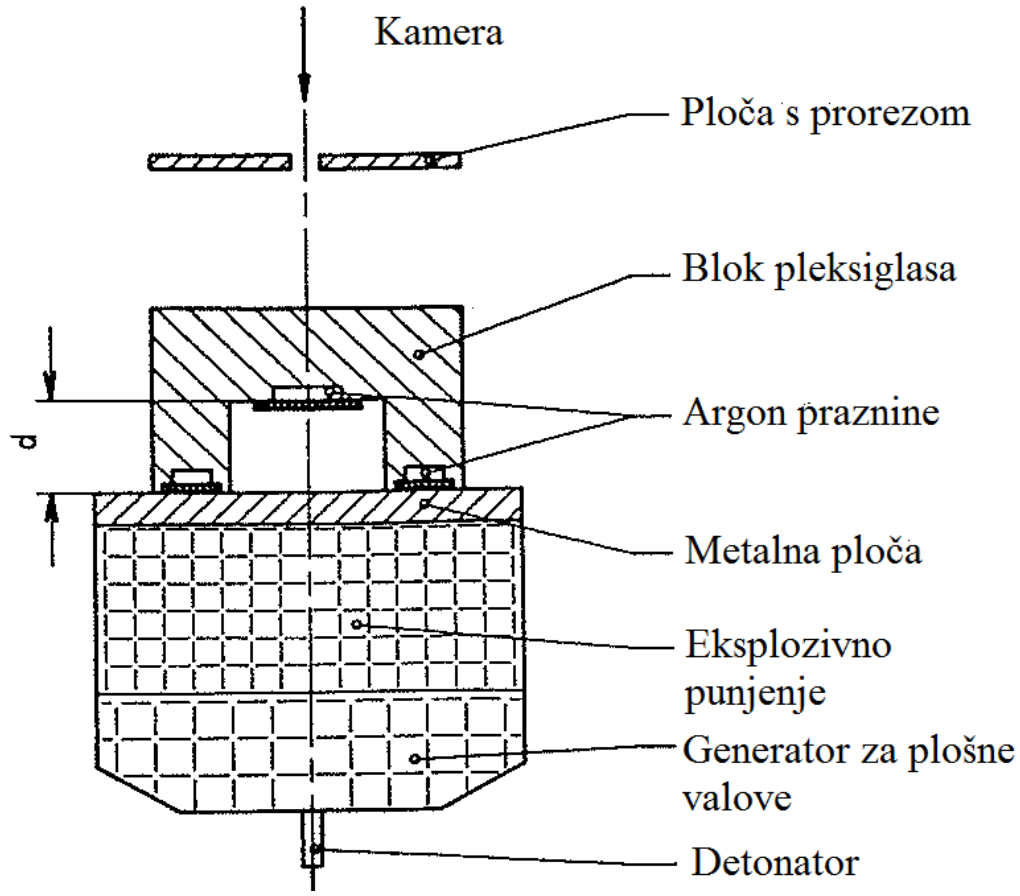
Usporenje udarnog vala može biti zanemareno time što je drugi zaslon 10 puta tanji od prstena.

$$t_s = \frac{h}{v_{sp}} \tag{5-4}$$

Prema brzini mase može se izračunati:

$$W_M = \frac{v_{sp}}{2} = \frac{h}{2_{ts}} \tag{5-5}$$

Kod optičke metode metalna ploča je postavljena na suprotno lice punjenja (Slika 5-3). Pleksiglas je smješten na vrh površine metalne ploče. Argon praznine su prekrivene tankim čeličnim podmetačem, koji se nalazi na bloku pleksiglasa. Djelovanjem eksploziva metalna ploča se počinje kretati, argon praznine blizu površine će se zatvoriti. Javit će se snop svjetlosti kratkog trajanja i snima se na film. Nakon prolaska poznate udaljenosti slobodne površine (d), zatvara se cijela praznina i stvara se novi snop svjetlosti.



Slika 5-3. Određivanje brzine slobodne površine optičkom metodom (Sućeska, 1995).

Vremenski interval između ta dva svjetlosna signala koristi se za računanje brzine ploče slobodne površine.

Omjer udara vala i brzine tereta (ploče):

$$p_m = p + p_{0r}(W - W_m) \tag{5-6}$$

Grunasonova jednadžba:

$$p = \frac{1}{2} W_m (\rho_0 D + \rho_{0m} U_m) \tag{5-7}$$

Na temelju rezultata dobije se graf s CJ točkom (Slika 5-4.). Eksperimentalno dobivenom ovisnosti brzine površine metalne ploče i debljine ploče ima dva moguća slučaja:

a) Nagib krivulje se jako mijenja te se CJ točka jasno vidi

b) CJ točka nije dobivena na krivulji

Eksplozivi koji imaju široku zonu kemijske reakcije su karakteristični za prvi slučaj. Može se dobiti iz tankih ploča. Tlak detonacije se može izračunati na sljedeći način:

- Parametri p_o, p_{om}, D su poznati
- Brzine slobodne površine metalne ploče su određene eksperimentalno

- Brzina tereta koja odgovara debljini ploče je izračunata jednadžbom (5-5)
- Iz adijabatskog udara na metalnu ploču računa se brzina udarnog vala za određivanje debljine ploče (5-8) i (5-9)

$$U_m = c + sW_m \tag{5-8}$$

$$U_m = c + sW_m + zW_m^{\,2} \tag{5-9}$$

- Veličina tlaka odgovara debljini ploče 0, time ta veličina odgovara i prijelaznoj točki koja je i tlak detonacije
- širina zone kemijske reakcije se može izračunati kada debljina odgovara CJ točki

Ako CJ točka nije postignuta eksperimentalno, može se izračunati ovim redosljedom:

- parametri p_o, p_{om}, D su poznati
- brzina ploče slobodne površine je određena za seriju različitih debljina ploča
- analitičkim izrazom za brzinu slobodne površine dobije se debljina ploče. Izračuna se brzina ploče slobodne površine za debljinu ploče 0
- na temelju veličine brzine slobodne površine za debljinu ploče 0 brzina tereta se izračuna po jednadžbi (5-5).Tekuće ocjene su jednake za obje strane kontaktne površine, brzina tereta odgovara brzini tereta produkata detonacije
- pomoću jednadžbe adijabatskog udara na ploču izračunata je brzina udarnog vala za debljinu ploče 0
- tlak detonacije se izračuna po Grunassonovoj jednadžbi (5-7)

Postoji još jedan način za određivanje CJ točke i tlaka detonacije u toj točki. Odredi se brzina slobodne površine u seriji ploča napravljenih od različitih ploča koje imaju različite impedencije. Debljina ploče mora biti veća od širine zone kemijske reakcije. Tada je odnos slobodne površine i debljine ploče linearan (Sućeska, 1995).

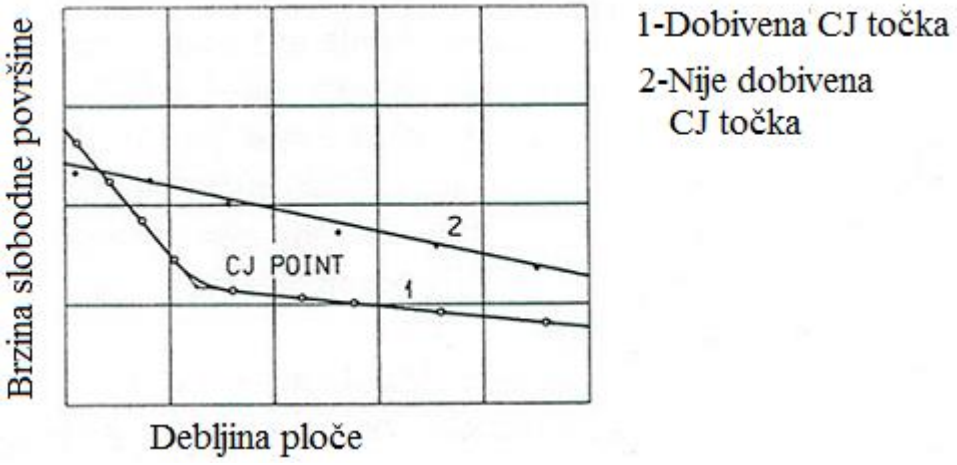
Gdje su:

d – debljina ploče	(mm)
U_m – brzina udarnog vala	(m/s)
t_m – vremenski interval između 1 i 2 para sondi	(s)
v_{sp} – brzina metalne ploče slobodne površine	(m/s)
ts – vrjeme gibanja ploče slobodne površine	(s)
h – visina prstena	(mm)
W_m – brzina tereta	(m/s)
r – parametar reflektiranog vala	(-)
m – parametar metalne ploče	(-)

p,W – parametri ovisni o CJ točki (-)

ρ_0 – gustoća (g/cm^3)

$c,s\ i\ z$ – eksperimentalne konstante (-)



Slika 5-4. Brzina ploče slobodne površine kao funkcija debljine ploče (Sućeska, 1995).

5.2. AKVARIJ TEST

To je modificirani test letećih ploča ali je metalna ploča zamijenjena vodom ili nekim drugim optičkim materijalom. Gibanje udarnog vala kroz inertan i optički transparentan materijal vidi se kao funkcija vremena. Brzina tereta iza fronte udarnog vala i detonacije tlaka testiranog eksploziva može se izračunati poznavajući jednadžbu adijabatskog udara i ovisnost omjera brzine-udaljenosti.

U stakleni spremnik koji je ispunjen vodom uranja se eksplozivno punjenje promjera 72 mm i 144 mm duljine (Slika 5-5.). Nakon detonacije udarni val putuje kroz vodu uzrokujući optičku prozirnost vode. Brzo snimajuća kamera snima položaj udarne fronte vala kao funkciju vremena, pomoću niza proreza duž osi punjenja. Koristi se za snimanje pozicije fronte udarnog vala kao funkcije vremena. Određivanje brzine udarnog vala u pleksiglasu kao optički transparentnom materijalu može se vidjeti na slici 5-6.

Gronasonova jednadžba za računanje tlaka detonacije:

- pomoću trake filma, dobije se vrijeme/ovisnost položaja fronte udarnog vala. Analitička i grafička ekstrapolacija ovisi o određivanju brzine udarnog vala u inertnim materijalima R_m=0.

$$R_m = a_1 + a_2 t - a_3 e^{-a_4 t} \qquad (5\text{-}9)$$

$$R_m = a_1 t + 4a_2 a_3 \cdot \arctan\left(\frac{t}{2a_2}\right) \quad (5\text{-}10)$$

$$U_m(0) = a_2 + a_3 a_4 \quad (5\text{-}11)$$

$$U_m(0) = a_1 + 2a_3 \quad (5\text{-}12)$$

- iz jednadžbe za adijabatski tlak i U_m vrijednosti izračunata je vrijednost brzine punjenja (5-13)

$$W_m = -0.607 + 0.372 \cdot U_m + 0.0283 \cdot U_m^{\,2} \quad (5\text{-}13)$$

- dobivena brzina tereta, gustoća eksploziva i inertnog materijala može se izračunati tlak detonacije Gurnasonovom jednadžbom (Sućeska, 1995.).

Gdje su:

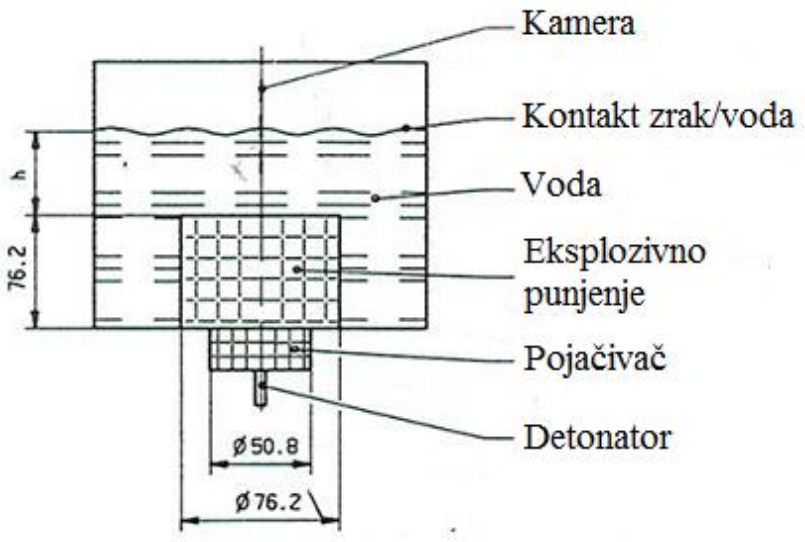
R_m – površina eksplozivnog punjenja (m^2)

a_1-a_4 – koeficijenti dobiveni odgovarajućom procedurom (-)

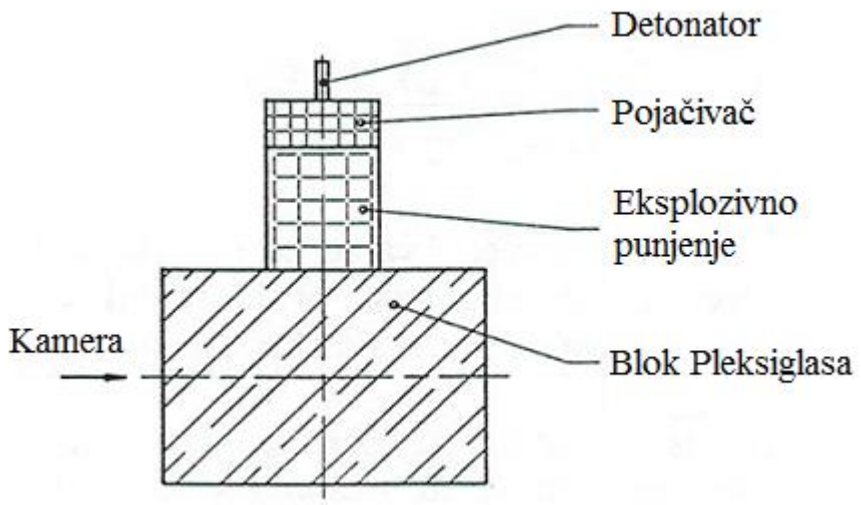
U_m – brzina udarnog vala (m/s)

W_m – brzina tereta (m/s)

t – vrijeme (s)



Slika 5-5. Shema akvarij testa (Sućeska, 1995).



Slika 5-6. Akvarij test s blokom pleksiglasa kao transparentni materijal (Sućeska, 1995).

5.3. PROCJENA TLAKA DETONACIJE I BRZINE EKSPLOZIJE

CJ detonacijski parametri za neidealne eksplozive mogu se izračunati pomoću eksperimentalnih rezultata. Zang i Chang (2012) u svojem radu koriste novi pristup za procjenu tlaka detonacije i brzine alumiziranih eksploziva termodinamičkom teorijom detonacije. Podudaranje s eksperimentalnim podacima dobiven je podešavanjem parametara u BKW (Becker-Kistakosky-Wilson) jednadžbi. Veličine tlaka detonacije i brzine detonacije podudaraju se s eksperimentalnim rezultatima.

U mješovitim eksplozivima veličina alumiziranih čestica je oko 10 μm. Prije nego što sudjeluje u kemijskoj reakciji prah aluminija bi trebao biti pobuđen nekoliko μs prije reakcije. Aluminijski prah može sudjelovati u kemijskoj reakciji reakcijske zone s visoko energetskim sastojcima.

Jaguar procedura u kojoj se uspoređuje vrijednost eksperimentalne detonacije za nekoliko eksploziva s CJ brzinama (Stiel et al., 2004). U toj proceduri se može vidjeti da su na detonacijskoj fronti ugljik i ostali plinovi u kemijskoj ravnoteži te da samo mala reakcija aluminija dolazi do detonacijske fronte. Procjena tlaka detonacije se postiže pomoću CJ termodinamičke teorije detonacije. Ovom teorijom termodinamička ravnoteža se može postići odmah. Aluminijske čestice ne sudjeluju u kemijskoj zoni reakcije, ali djeluju kao inertni sastojci. Izračunati rezultati dobro se podudaraju s izmjerenim podacima u odnosu na procijenjene rezultate korištenjem empirijskih formula. U ovom pristupu ne trebaju se koristiti pretpostavke potpune i djelomične ravnoteže aluminizirane prašine u reakcijskoj zoni.

Svojstva detonacije aluminiziranog eksploziva ne može se opisati CJ teorijom, zato jer se pretpostavlja da je oslobođena energija trenutna. U BKW jednadžbi *k* parametar se prilagođava. *K* parametar se zbog frakcija krutih proizvoda u CJ reakciji mora prilagoditi, ako se povećava. Za RDX originalna vrijednost *k* parametra iznosi 10,91, prilagođen je na 9,272, a kod TNT-a originalna vrijednost iznosi 12,68 i prilagođena je na 10,40.

U rezultatima se može vidjeti da se izračunati CJ tlak detonacije i brzina detonacije dobro poklapaju s eksperimentalnim rezultatima iako su parametri podešeni. Postoje dvije grupe faktora, jedna grupa je CJ parametar detonacije, a drugi je temperatura i toplina kao završni produkt. Vrijednost tlaka detonacije i brzine izračunati su novim pristupom. Tlak detonacije ovisi o gustoći punjenja eksploziva (5-14):

$$p_d = p_{\max}\left(\frac{\rho_0}{\rho_{\max}}\right)^2 \tag{5-14}$$

Za mješovite eksplozive:

$$p_{\max} = \Sigma\left(p_{e\max i}\frac{\alpha_{evi}}{\rho_{e\max i}}\right)\rho_{\max} \tag{5-15}$$

Iz jednadžbe (5-12) i (5-13) dobije se jednadžba:

$$p_d = \Sigma\left(p_{e\max i}\frac{g_{ei}}{\rho_{e\max i}}\right)\left(\frac{1}{\rho_{\max}}\right)\rho_o{}^2 \tag{5-16}$$

Ova empirijska formula koristi se za procjenu tlaka detonacije za miješane eksplozive. Jednadžbom (5-16) može se dobiti tlak detonacije za alumizirane eksplozive ako je p_{emaxi} poznat. Brzina detonacije može se dobiti na način sličan kao i tlak detonacije. Iz rezultata se može zaključiti da je izračunati tlak detonacije u novom pristupu bliži eksperimentalnom rezultatu nego empirijskoj vrijednosti. Odstupanja dobivena u rezultatima su manja od 9% za izračunati tlak i 7% za brzinu detonacije (Zhang i Chang, 2012).

Gdje su:

p_d – tlak detonacije (GPa)
ρ – gustoća punjenja (g/cm^3)
ρ_{max} – teoretska gustoća (g/cm^3)
p_{emaxi} – teoretski tlak detonacije za *i* vrstu mješavine (GPa)
α_{evi} – volumen frakcije za *i* vrstu (cm^3)
ρ_{emaxi} – teoretska gustoća za *i* vrstu mješavine (g/cm^3)
g_{ei} – masa frakcije za *i* vrstu mješavine (g)

5.4. RAČUNANJE TLAKA DETONACIJE CHNO EKSPLOZIVA

Detonacija eksplozije je rezultat kemijske reakcije prilikom čega se stvara ekstremni tlak i temperatura iza detonacijskog vala. Pod time se misli da je termodinamička ravnoteža detonacijskih produkata trenutna. Međuodnosom Rayleigh linijom s izmjerenom izentropom ili hugiotom može se odrediti CJ točka. Eksperimentalno su izmjereni CJ tlak P_{cj} i brzina v_{cj} dok su temperatura i sastav nepoznati. Kondenzirana toplina formacije za neke CHNO eksplozive je jedan od važnijih parametara. Određivanje parametara detonacije zahtjeva primjenu jednadžbe stanja produkata detonacije npr. BKW-EOS, JCZ-EOS i KHT- EOS pojednostavljene računalnom metodom. CHNO eksplozivima sa gustoći punjenja većom od 1 g/cm^3, mogu se svojstva detonacije procijeniti na temelju topline stvaranja. Uz bilancu kisika i sastav produkata detonacije kao npr. CO, CO_2, H_2O, HF, O_2, kruti ugljik i H_2.

Nakon detonacije nastali produkti su složene mješavine s velikim brojem različitih molekula. Njihova koncentracija se mjenja s temperaturom i tlakom. Glavni produkti detonacije mogu sadržavati CO, H_2, NH_3, O_2 i druge vrste molekula. O stehiometriji pri tlaku detonacije i efekata drugih ravnoteža ovise sadržaji drugih produkata.

Prema BKW jednadžbi računanje p_{cj} i v_{cj} CHNO eksploziva su vrlo osjetljivi na ravnotežu između HF, C i ugljik tetrafluorida. Formacija CF_4 je manje poželjna nego HF. Toplina detonacije može se udvostručiti dodavanjem fluora, bora i aluminija.

Efekt produkata plinova u detonacijskom produktima može jednostavno označiti proceduru stehiometrijske reakcije za kisikom siromašne i kisikom bogate detonacije. Prilikom reakcije fluoridi se spajaju u HF ako je vodik prisutan, kisik prelazi u H_2O, a ugljik prije prelazi u CO nego u CO_2. Eksplozivi bogati kisikom u kojima se traži

korelacija za tlak detonacije kao funkcije broja produkata, smatra se da su produkti ograničeni za HF, CO, CO2.. Procedura je jednostavna zato jer ne treba znati točan sastav produkata detonacije.

Nakon iniciranja oslobađa se toplina pod adijabatskim uvjetima čime se može odrediti radni kapacitet (sposobnost) eksploziva. Temperatura detonacije ili eksplozije je maksimalna temperatura i koristi se za računanje radne sposobnosti eksploziva, koju produkti detonacije mogu postići pod adijabatskim uvjetima. Jednostavan pristup se temelji na reakciji raspadanja kako bi se dobio približni tlak detonacije. Toplina detonacije eksploziva se u potpunosti iskorištava za toplinu produkata detonacije.

Reakcija detonacije se događa ekstremno brzo, toplina reakcije detonacije podiže temperaturu produkata detonacije u adijabatskim uvjetima. Između inicijalne temperature i temperature detonacije toplina detonacije je konstantna. Poznavajući molarnu toplinu formacije eksploziva i produkata detonacije može se izračunati toplina detonacije.

Detonacija je najčešće ograničena eksplozija u zatvorenom prostoru gdje je volumen konstantan. Nekontrolirana eksplozija se događa na otvorenom prostoru gdje je atmosferski tlak konstantan. Ako se koristi toplina formacije u plinovitom stanju može se izračunati približna toplina detonacije. Ti uvjeti se prihvaćaju za dobivanje korelacije za procjenu tlaka detonacije bez korištenja eksperimentalnih podataka. Približna temperatura detonacije može se dobiti jednadžbama (5-17) i (5-18):

$$T_{ad} = 298{,}15 - Q_{ad} / \sum C_r \qquad (5\text{-}17)$$

$$T'_{ad} = 298{,}15 - Q_{ad} / \sum C_p \qquad (5\text{-}18)$$

Manja točnost, koja se kreće između 10-20% u eksperimentalnom mjerenju P_{cj} događa se zbog nestacionarne prirode detonacijskih valova. Omjer p_{cj} tlaka i gustoće punjenja trebao bi se odmah dobiti odgovarajućom metodom. Podaci potrebi za računanje *Tad* i *T'ad* su kemijske formule, toplina formacije izračunata Joackovom procedurom ΔHF (kJ/mol) i broj produkata plinova dostupnih za jedinicu težine eksploziva. Izražavanje tlaka detonacije kao funkcije *Tad, T'ad* i η ili kvadratne gustoće punjenja, koristi se eksperimentalno izmjerenim *pcj* različitih kombinacija *Tad* , *T'ad* i η dani gustoćama punjenja za 12 CHNO eksploziva. Linearni odnos je dobiven jednadžbama (5-19) i (5-20):

$$P_{cj} = 7{,}83\left(\eta T_{ad}\right)^{1/2} \cdot \rho_0{}^2 - 0{,}69 \qquad (5\text{-}19)$$

$$P_{cj} = 9{,}02(\eta T_{ad})^{1/2} \cdot \rho_o{}^2 - 1{,}2 \qquad (5\text{-}20)$$

BKW je jednadžba koja se najčešće koristi za izračun stanja detonacije jakih eksploziva. Dva parametra su potrebna za odgovarajuću vrstu eksploziva u ovoj metodi. Prvi parametri su predloženi za većinu eksploziva. Računanje BKW temperature pokazuje razliku kao usporedbu empirijskih vrijednosti. Prednost jednadžbe (5-19) i (5-20) je jednostavno računanje parametara T_{ad}, T'_{ad} i η, te oni ne ovise o gustoći punjenja.

Dvije su prednosti ove metode koje mogu pomoći u procjeni tlaka detonacije sastav produkata i korištenje topline stvaranja eksploziva u plinovitoj fazi. Prednosti nove korelacije su: lako računanje p_{cj}, nije potrebno poznavati kruto stanje eksploziva i p_{cj} je moguće dobiti za velik raspon gustoće punjenja (Keshavarz i Pouredetal, 2006.).

Gdje su:

T_{ad}, T'_{ad} – približne temperature detonacije za ograničene i neograničene uvjete (°C)

Q_{ad} – razlika između topline formacije dekompozicije produkata i eksploziva u plinovitom stanju (-)

ΣCv, ΣCp – suma molarnog kapaciteta topline produkata detonacije konstante volumena

η – parametar (mol/g)

P_{cj}, P'_{cj} – približni tlakovi detonacije za ograničene i neograničene uvjete (kbar)

5.5. TEORETSKA PROCJENA TLAKA DETONACIJE ZA CHNO EKSPLOZIVE

Ova metoda se koristi za računanje maksimalnog tlaka detonacije za svaki čisti ili miješani CHNO eksploziv. Prilikom računanja nije potrebno koristiti toplinu stvaranja i kristalnu gustoću eksploziva u tim produktima. Tri parametra su potrebna za mjerenje izvedbe detonacije eksploziva i to su: tlak detonacije, brzina i toplina. Ovom metodom se računa tlak detonacije bez korištenja eksperimentalnih podataka. Tlak detonacije CHNO eksploziva ovom metodom se može procijeniti direktno iz elementarne kompozicije strukturnih parametara.

Maksimalni tlak detonacije može se izraziti kao funkciji odgovarajućih molekulskih faktora. Neke studije prikazuju da se tlak detonacije različitih čistih i miješanih eksploziva može izraziti na maksimumu gustoće kao funkcija broja molekula ugljika, vodika, dušika i

kisika. Jednadžba (5-21) za dobivanje maksimalnog tlaka detonacije eksploziva s glavnom formulom $C_{b1},H_{b2},N_{b3},O_{b4}$:

$$P = x_1 + \sum_{i=2}^{5} x_i \cdot b_{i-1} + \sum_{i=6} x_i SSP_i \qquad (5\text{-}21)$$

Završna korelacija za čiste eksplozive:

$$P=221,53-20,437b_1-2,2538b_2+17,216b_3+16,140b_4-79,067C_{SSp}-66,335n_N \qquad (5\text{-}22)$$

Jednadžba (5-22) služi za određivanje izvedbe detonacije za maksimalnu normalnu ili teoretsku gustoću. Greška se izračunava [(procijenjena vrj.-izmjerena vrj.)/izmjerena]x100. Unatoč velikoj nesigurnosti (sve do 20%) izmjereni tlak detonacije se slaže s eksperimentalnim vrijednostima (Keshavarz, 2007).

Gdje su:

x_i – prilagođavajući parametar

SSP_i – specifični strukturni parametar

6. ZAKLJUČAK

Prije početka miniranja potrebno je odabrati odgovarajući eksploziv. Eksploziv se odabire po svojim svojstvima i parametrima. Kako bi se odredili parametri potrebno je napraviti ispitivanja na eksplozivu. Ispitivanja se izvode na idealnim i neidealnim eksplozivima. Rezultati kod ne idealnih eksploziva su manjih vrijednosti nego kod idealnih eksploziva stoga se dobivene vrijednosti za ne idealne eksplozive koriste za računanje parametara. Prilikom ispitivanja rade se mjerenja kako bi se odredio tlak, temperatura, brzina detonacije i drugi potrebni parametri eksploziva. Instrumenti koji su opisani u ovom radu poput manganskog instrumenta za mjerenje, karbonski otpornici i PVDF instrumenti za mjerenje imaju visoku točnost mjerenja tlaka detonacije. Nedostatak instrumenta za mjerenje tlaka i temperature detonacije je taj što prilikom eksplozije budu uništeni. Za određivanje parametara se koriste posebne metode i tehnike. Metode i tehnike se temelje na određivanju CJ točke i računanje pomoću jednadžbi tlakove detonacije i druge parametre. Najčešća jednadžba koja se koristi za računanje tlaka detonacije je BKW (Becker-Kistakosky-Wilson) jednadžba. U testu letećih ploča i akvarij testu potrebno je eksperimentalno odrediti neke parametre kako bi se mogao izračunati tlak detonacije. Kod procjene tlaka detonacije, tlak detonacije može se dobiti sa ili bez eksperimentalnih podataka. Najveći nedostatak kod procjene tlaka detonacije je nesigurnost rezultata, zato jer prilikom svake procjene rezultati odstupaju za određen postotak od stvarnih vrijednosti.

7. LITERATURA

ABEGG M. T., FISHER F. J., LAWTON C. H., WATHERILL W. T. 1960: Low detonation pressure explosives, URL: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/07_3_NEW%20YORK_09-63_0218.pdf

CAVANOUGH G. i ONEDERRA I., 2011.: Development of pressure and temperature gauges to monitor the in situ performance of commercial explosives, Sustainable Minerals Institute.

CLAY B. R., COOK A. M., COOK O. V. 1964.: Shock coupling, loading densitiy and the efficiency of explozives in commercial blasting, URL: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/07_3_NEW%20YORK_09-63_0195.pdf

CUNNINGHAM C. 2006.: Blasthole Pressure: What it really means and how we should use it, International Society of Explosives Engineers. URL: https://miningandblasting.files.wordpress.com/2009/09/blasthole-pressure_what-it-really-means-and-how-we-should-use-it.pdf

GINSBERG, M.J. i ASAY, B.W. 1991.: Commercial carbon composition resistors as dynamic stress gauges in difficult environments. Rev. Sci. Instrum. 62(9).

KATSABANIS, P.D. i YEUNG, C. 1993. Effects of low amplitude shock waves on commercial explosives- the sympathetic detonation problem. Proceedings of the Fourth Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast-4.

KATSABANIS, P.D., YEUNG, C., FRITZ, G., HEATER, R. 1994.: Explosives malfunction from sympathetic detonation to shock desensitization. Proceedings of Tenth Symposium on Explosives and Blasting Research.

KESHAVARZ M. Z., POURETEDAL H. R. 2006.: Calculation of detonation pressure of condensed CHNOF exsplosives, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 29. str. 145-151.

KESHAVARZ M. Z. 2007.: Teoretical prediction of detonation pressure of CHNO high energy materials, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 29, str. 77-80.

MENCACCI S., CHAVEZ R. 2005.: The measurement and analysis of detonation pressure during blasting, Brighton Conference Proceedings, str. 231-236.

SILVA G. i KATSABANIS P.D. 2003.: Pressure measurements in a low density explosive, International Society of Explosives Engineers, 269-282.

STIEL L.I., BAKER E.L., CAPELLOS C. 2004.:, Jaguar Analyses of Experimental Detonation Values for Aluminized Explosives, Proc. AIP Conf, 706, 891-894.

SUĆESKA M. 1995.: Test methods for exsplosives, the efticiency of explozives in commercial blasting.

ŠKRLEC V. 2015.: Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja, Zagreb.

ZHANG Q., CHANG Y., 2012.: Prediction of Detonation Pressure and Velocity of Explosives with Micrometer Aluminum Powders, Central European Journal of Energetic Materials str. 77-86. URL: http://www.wydawnictwa.ipo.waw.pl/cejem/vol-9-1-2012/Zhang.pdf

WIELAND, M. 1988.: Cross borehole stress wave measurement in underground coal. Proceedings of Fourth Mini-symposium on Explosives and Blasting Research.