Ispitivanje radne sposobnosti eksploziva metodom ekspanzije metalne cijevi

Marek, Mihael

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:169:309214

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
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

ISPITIVANJE RADNE SPOSOBNOSTI EKSPLOZIVA METODOM EKSPANZIJE METALNE CIJEVI

Diplomski rad

Mihael Marek
R-215

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

ISPITIVANJE RADNE SPOSOBNOSTI EKSPLOZIVA METODOM EKSPANZIJE METALNE CIJEVI

Mihael Marek

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Djelovanje gospodarskih eksploziva moguće je opisati raznim veličinama za čije utvrđivanje postoje brojne metode ispitivanja. Postoje metode koje se izvode na terenu, odnosno *in situ*, i one čija provedba zahtjeva laboratorijske uvjete. Svaka od njih daje rezultate koji su empirijskog, teoretskog ili kombiniranog karaktera. Pojedine metode su opisane u radu. Metoda određivanja učinka djelovanja eksplozije putem ekspanzije metalne cijevi odnosno cilindra, osim empirijskih podataka dobivenih mjerenjima, u kombinaciji s konceptom Gurneyjeve energije daje i teoretske zaključke o djelovanju eksploziva. Brojnim ispitivanjima temeljenim na toj metodi potvrđena je i njena široka primjena koja se odnosi na međusobnom uspoređivanju svojstava eksploziva, ali i na optimizaciji svojstava eksplozivnih smjesa.

Ključne riječi: brizantnost, radna sposobnost eksploziva, Gurneyjeva energija, Gurneyjeva brzina, CYLEX test

Završni rad sadrži: 47 stranica, 13 tablica, 22 slike i 19 referenci.
Jezik izvornika: hrvatski
Završni rad je pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: Dr.sc. Mario Dobrilović, Izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Dobrilović, Izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, Docent RGNF
Dr. sc. Vinko Škrlec, Docent RGNF

Datum obrane: 20. rujan 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

University of Zagreb
Faculty of
Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master'sThesis

WORK ABILITY EXAMINATION OF EXPLOSIVES BY METAL PIPE EXPANSION METHOD

Mihael Marek

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

Abstract

The effects of commercial explosives can be described in various sizes, for which there are numerous test methods. There are methods performed in the field, that is, *in situ*, and those whose implementation requires laboratory conditions. Each of them produces results that are empirical, theoretical, or combined. Some methods are described in the paper. The method of determining the effect of an explosion through the expansion of a metal tube or cylinder, except empirical data obtained from measurements, combined with the concept of Gurney energy, also gives theoretical conclusions about the action of explosives. Numerous tests based on this method have confirmed its widespread application, which relates to the comparison of the properties of explosives, but also to the optimization of the properties of explosive mixtures.

Keywords: brisance, explosive work ability, Gurney energy, Gurney velocity, CYLEX test
Thesis contains: 47 pages, 13 tables, 22 figures and 19 references.
Original in: Croatian
Thes is deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Reviewers: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD
Assistant Professor Vječislav Bohanek, PhD
Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD

Date of defense: September 20, 2019., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA II

1. UVOD 1

2. RADNA SPOSOBNOST I ENERGIJA DETONACIJE EKSPLOZIVA 2

3. METODE ODREĐIVANJA BRIZANTNOSTI I RADNE SPOSOBNOSTI EKSPLOZIVA 6

3.1. Mjerenje radne sposobnosti eksploziva olovnim cilindrom – Trauzl 7

3.2. Relativna radna sposobnost određena pomoću balističkog njihala 7

3.3. Određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindara (po Hessu) 10

3.4 Određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindara (po Kastu) 11

3.5. Podvodni detonacijski pokus 13

3.6. Ispitivanje s dvostrukim cijevima 15

4. ODREĐIVANJE BRIZANTNOSTI EKSPLOZIVA ŠIRENJEM BAKRENOG CILINDRA 17

4.1. Opis metode 17

4.2. Načela ispitivanja ekspanzijske cijevi 21

4.2.1 Ekspanzijska krivulja 21

4.2.2. JWL jednadžba stanja 23

5. KONCEPT GURNEYJEVE ENERGIJE 24

5.1. Gurneyjeva energija 25

5.2 Dobivanje Gurneyjeve konstante putem CYLEX testa 28

6. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I REZULTATI 33

6.1. Rezultati za amonij-nitratne aluminizirane eksplozive 33

6.2. Rezultati za emulzijske eksplozive 35

6.3. Osvrt na rezultate laboratorijskih ispitivanja 44

7. ZAKLJUČAK 45

8. LITERATURA 46

POPIS SLIKA

Slika 2-1: Udarna, Huginotova adijabata u p-v dijagramu (Škrlec, 2015).....3
Slika 3-1: Shema balističkog njihala (OZM Research, 2014).....8
Slika 3-2: Balističko njihalo (OZM Research, 2014) 9
Slika 3-3: Shema određivanja brizantnosti prema Hessu (Bhalchandra, 2011) 10
Slika 3-4: Kastova aparatura (Sućeska, 1995).....12
Slika 3-5:Prikaz podvodnog detonacijskog testa (Mahadevan, 2012).....14
Slika 3-6: Shematski prikaz ispitivanja s dvostrukim cijevima (Škrlec, 2015).....15
Slika 3-7: Prikaz spljoštenja ispitne cijevi (Sućeska, 1995).....16
Slika 3-8: Prikaz cijevi prije (gore) i nakon otpucavanja (dolje) (Ester, 2005) 16
Slika 4-1: Radijalno postavljene ionizacijske igle tzv. *pinovi* za registraciju oblika kretanja, pomaka i brzine stijenki cilindra (Sanchidrian, 2015) 19
Slika 4-2: Prikaz nosive konstrukcije bakrenog cilindra u CYLEX testu (Souers & Vitello, 2015) 19
Slika 4-3: Shematski prikaz širenja bakrenog cilindra (Sućeska, 1995).....20
Slika 4-4: Primjer dobivene ekspanzijske krivulje - funkcijska ovisnost (r_m-r_0, t) (Sućeska, 1995) 22
Slika 5-1: Sendvič-sustav eksploziva i metala i pojednostavljena raspodjela brzina (Bohanek, 2013) 25
Slika 5-2: Ekspanzijska putanja individualne materijalne točke cilindra (Sućeska, 1995)..29
Slika 6-1: Grafički prikaz dobivenih rezultata ispitivanja (x-t graf) emulzijom E682 (Arvantidis et al., 2004) 39
Slika 6-2: Grafički prikaz dobivenih rezultata ispitivanja (x-t graf) emulzijom E682 s 20 % ANFO (Arvantidis et al., 2004) 39
Slika 6-3: Grafički prikaz rezultata ispitivanja (a-t graf) za čistu emulziju E682 (Arvantidis et al., 2004).....40
Slika 6-4: Grafički prikaz rezultata ispitivanja (a-t graf) za emulziju E682 s 20 % ANFO (Arvantidis et al., 2004) 41
Slika 6-5: Grafički Gurneyjeve brzine za čistu emulziju E682 (Arvantidis et al., 2004) 42
Slika 6-6: Grafički Gurneyjeve brzine za emulziju E682 s 20 % ANFO (Arvantidis et al., 2004) 42

POPIS TABLICA

Tablica 5-1: Gurneyjeve jednadžbe za pojedine različite simetrične i asimetrične konfiguracije metala i eksploziva (Bohanek, 2013) 26

Tablica 5-2: Gustoća, brzina detonacije i Gurneyjeva konstanta za pojedine eksplozive (Cooper, 1996).....27

Tablica 6-1: Prikaz pozicija sondi prilikom ekspanzijskog testa na bakrenim cilindrima Ø 50,8 mm i Ø 76,2 mm (Anderson et al., 2017).....34

Tablica 6-2: Rezultati CYLEX testa za amonal (Anderson etal., 2017).....34

Tablica 6-3: Sastav emulzijskog eksploziva E682 (Arvantidis et al., 2004).....35

Tablica 6-4: Nazivni podaci za ANFO eksploziv (Anolit) (Arvantidis et al., 2004).....36

Tablica 6-5: Nazivni podaci za čistu emulziju E682 i emulziju E682 s 20% ANFO (Anolita) (Arvantidis et al., 2004) 36

Tablica 6-6: Osnovni podaci naboja za ispitivanje u bakrenoj cijevi (Arvantidis et al., 2004) 37

Tablica 6-7: Prikaz odnosa vremena i radijalne ekspanzije vanjske stijenke cijevi punjene emulzijom E682 (Arvantidis et al., 2004).....37

Tablica 6-8: Prikaz odnosa vremena i radijalne ekspanzije unutarnje stijenke cijevi punjene emulzijom E682 (Arvantidis et al., 2004).....37

Tablica 6-9: Prikaz odnosa vremena i radijalne ekspanzije unutarnje stijenke cijevi punjene emulzijom E682 (Arvantidis et al., 2004).....38

Tablica 6-10: Gurneyjeva energija za ekspanzijske omjere v/v_0 5 i 10 (Arvantidis et al., 2004) 43

Tablica 6-11: Iznosi Gurneyjeve energije, energije eksplozije i njihovog međusobnog omjera (Arvantidis et al., 2004) 43

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH *SI* JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
a	akceleracija	m/s^2
C	masa eksploziva po jedinici površini	kg/m^2
C_v	specifični toplinski kapacitet	J/kgK
dT	promjena temperature	K
E	energija	J
E_0	unutarnja specifična energija neporemećene tvari	J/kg
E_1	unutarnja specifična energija stlačene tvari	J/kg
E_g	Gurneyjeva energija	J/kg
E_s	energija udarnog vala	J
M_E	masa eksploziva	g
M_m	masa metalnog cilindra	kg
Θ	kut ekspanzije	°
P	relativna radna snaga	%
p_0	tlak u neporemećenom dijelu tvari	Pa
p_1	tlak udarnog vala	Pa
q	toplinska energija oslobođena kemijskim reakcijama	J/kg
Q	toplina detonacije	MJ
Q_t	izmijenjena toplina	J/kg
R_0	početni vanjski radijus	mm
r_0	vanjski radijus	mm
R_i	početni unutarnji radijus	mm
r_i	unutarnji radijus	mm
r_m	središnji radijus	mm
t	debljina (visina) metalne ploče	m
t	vrijeme	s
V	volumen	m^3
v_0	specifični volumen neporemećene tvari	kg/m^3
v_1	specifični volumen tvari stlačene udarnim valom	kg/m^3
v_g	brzina produkata detonacije	m/s
v_m	brzina metala	m/s
v_{pd}	brzina plinova detonacije	m/s

w	obavljeni rad	J/kg
X	mjera spljoštenosti	mm
y_0	početna debljina eksploziva	m
α	kut otklona ispitivanog eksploziva	°
β	kut otklona referentnog eksploziva	°
μ	omjer mase cilindra i eksplozivnog punjenja	-
ρ_e	gustoća eksploziva	kg/m^3
ρ_m	gustoća metala	kg/m

1. UVOD

Energija eksploziva, snaga, brizantnost, rad, radna sposobnost te ostale veličine izvedene su za opisivanje djelovanja eksploziva u određenim uvjetima i za određene namjene. Pojedina svojstva odnose se na teoretske a pojedina na empirijske, odnosno na kombinirane veličine koje opisuju, posredno ili neposredno radni učinak eksplozije.

Metoda određivanja učinka djelovanja eksplozije putem ekspanzije metalne cijevi odnosno cilindra relativno je jednostavna za izvođenje. Stoga se metoda izvodi za ocjenu učinkovitosti novih vrsta eksploziva s mogućnošću usporedbe sa svojstvima uobičajeno korištenih eksploziva.

Pogodna je za ocjenu djelovanja gospodarskih eksploziva čiji se učinak poglavito oslanja na djelovanje ekspanzije prvotno stlačenih plinova nastalih detonacijom te dulje djelovanje tlaka na stijenke bušotine.

2. RADNA SPOSOBNOST I ENERGIJA DETONACIJE EKSPLOZIVA

Energija koja se oslobađa pri detonaciji eksploziva može se iskoristiti za obavljanje mehaničkoga rada. Unutarnja kemijska energija eksploziva eksplozivnim procesom se pretvara u toplinsku energiju predanu produktima eksplozije, koji su zagrijani na visoke temperature reda veličina nekoliko tisuća stupnjeva Kelvina i stlačeni tlakovima reda veličina nekoliko desetina milijuna kPa. Mehanički rad na okolinu je obavljen djelovanjem plinovitih produkata u ekspanziji.Ukupna toplinska teoretska energija može se uzeti kao mjera radne sposobnosti, odnosno potencijalne učinkovitosti samog eksploziva.

Za teoretsko određivanje radne sposobnosti, odnosno kvantificiranje mehaničkog djelovanja eksplozije (detonacije) koriste se postavke hidrodinamičke teorije detonacije i termodinamički zakoni.

Iz postavki hidrodinamičkog opisa ponašanja eksploziva prilikom djelovanja udarnog vala odnosno primjenom zakona o održanju mase, održanju energije i količine gibanja proizlaze opisi stanja plina primjenjivi i na kruti eksploziv prilikom takvog djelovanja te se opisuju *Rankine - Hugoinotovim* jednadžbama. Skokovita promjena unutarnje energije opisana je Hugionotovom jednadžbom udarne adijabate dobivene kombiniranjem *Rankine-Hugoinotovih* jednadžbi formulom 2-1:

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_0) \cdot (v_0 - v_1) \tag{2-1}$$

gdje su:

E_1 - unutarnja specifična energija stlačene tvari (J/kg),

E_0 - unutarnja specifična energija neporemećene tvari (J/kg),

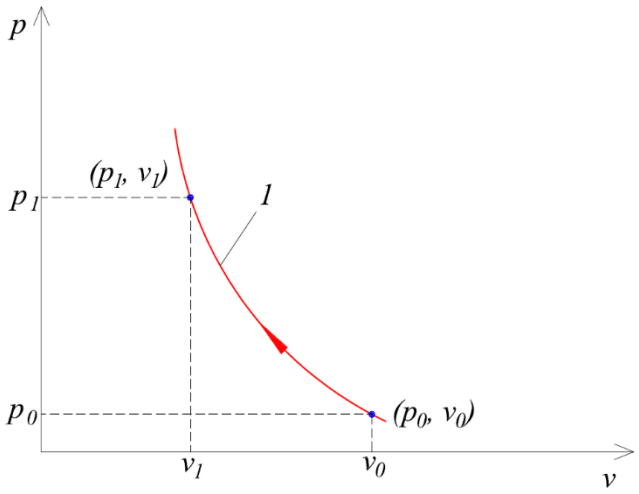
p_0 - tlak u neporemećenom dijelu tvari (Pa),

p_1 - tlak udarnog vala (Pa),

v_0- specifični volumen neporemećene tvari (kg/m^3),

v_1 - specifični volumen tvari stlačene udarnim valom (kg/m^3).

Udarna, Huginotova adijabata u p-v dijagramu prikazana je na slici 2-1.



Kazalo:

p - tlak (bar, Pa),
p_0 - tlak neporemećene eksplozivne tvari (bar, Pa),
p_1 - tlak u frontu udarnog vala (bar, Pa),
v - volumen, specifični volumen (m^3, m^3/kg),
v_0 - volumen, specifični volumen neporemećene eksplozivne tvari (m^3, m^3/kg),
v_1 - volumen, specifični volumen stlačene eksplozivne tvari (m^3, m^3/kg),
1 - udarna adijabata

Slika 2-1: Udarna, Huginotova adijabata u p-v dijagramu (Škrlec, 2015)

Djelovanjem detonacijskog vala, čija fronta inicira kemijske reakcije koje unose novu energiju u proces, odnosno, energiju koja u postavkama procesa formira udarni val, zakon o očuvanju energije se mijenja na račun toplinske energije oslobođene kemijskim reakcijama.

Zbog toga je promjena unutarnje energije prilikom detonacijskog procesa eksplozivne tvari zbroj povećanja unutarnje energije zbog kompresije u udarnom valu i topline oslobođene kemijskim reakcijama što se može opisati formulom 2-2:

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_0) \cdot (v_0 - v_1) + q, \tag{2-2}$$

gdje je:

q - toplinska energija oslobođena kemijskim reakcijama (J/kg).

Iz postavki prvog glavnog zakona termodinamike, prilikom promjene stanja sustava koji se događa i kod kemijskih reakcija, promjena unutarnje energije sustava jednaka je sumi izmijenjene topline s okolinom i rada obavljenog nad okolinom:

$$\Delta E = Q_t + w \tag{2-3}$$

gdje je:

Q_t -izmijenjena toplina (J/kg),
w - obavljeni rad (J/kg).

Za idealni plin vrijedi:

$$w = p \cdot dv, \tag{2-4}$$

Aproksimacijom da se plinoviti produkti ponašaju kao idealni plin i da je proces eksplozije proces u kojem nema izmjene topline s okolinom, ukupni rad bez gubitaka za adijabatski proces se izražava kao (Sućeska, 1995):

$$W_{max} = \int c_v dT, \tag{2-5}$$

gdje je:
C_v – specifični toplinski kapacitet (J/kgK),
dT – promjena temperature (K).

Ukupni rad predstavlja maksimalni rad koji plinoviti produkti detonacije mogu obaviti, ako je njihova unutarnja energija potpuno pretvorena u mehanički rad. Maksimalni rad je poznat i po nazivu „eksplozivni potencijal“.

U stvarnim uvjetima, različiti oblici gubitaka energije su prisutni, pa je obavljeni mehanički rad uvijek manji od eksplozivnog potencijala. Važno je uzeti u obzir uvjete u kojima se eksplozija odvija, kao i sama svojstva eksploziva. Radnu sposobnost eksploziva nije moguće izraziti pomoću jednog termokemijskog ili detonacijskog parametra, već je ona definirana s više parametara: količina plinova formirana reakcijom, oslobođena toplina i brzina detonacije. Utjecaj pojedinog parametra na određenu vrstu rada ovisi o uvjetima u kojima se proces eksplozije odvija.

Razlika značenja pojmova brizantnosti i radne sposobnosti (poznata kao i energija detonacijskih produkata, jačina eksploziva) je da se terminom brizantnosti podrazumijeva razorna snaga eksploziva kao posljedica impulsa tlaka, dok radna sposobnost označava mogućnost obavljanja rada eksploziva naknadnom ekspanzijom plinova detonacije.

Za određivanje brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva mogu se koristiti neke od sljedećih metoda:

- mjerenje radne sposobnosti eksploziva olovnim cilindrom – Trauzl,
- relativna radna sposobnost određena pomoću balističkog njihala,
- određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindra (po Hessu),
- određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindra (po Kastu),
- određivanje brizantnosti eksploziva metodom otiska na čeličnoj ploči,
- određivanje brizantnosti eksploziva širenjem (ekspanzijom) bakrenog cilindra,
- podvodni detonacijski pokus,
- ispitivanje s dvostrukim cijevima,
- linearno povećanje izbojnice,
- određivanje volumena kratera,
- ljevkasti pokusi.

Rezultati su izraženi kao relativno određene vrijednosti u odnosu na referentni eksploziv ili kao usporedba učinaka više različitih eksploziva.

U tekstu rada najviše pažnje posvećeno metodi ekspanzije bakrenog cilindra te konceptu Gurneyjeve energije koja, za razliku od pojma brizantnosti, daje sveobuhvatnije informacije o svojstvima i detonaciji eksplozivne tvari.

3. METODE ODREĐIVANJA BRIZANTNOSTI I RADNE SPOSOBNOSTI EKSPLOZIVA

Pri izvođenju minerskih radova važno je odabrati odgovarajući eksploziv jer sama uspješnost ovisi o odabranome eksplozivu. Odabrani eksploziv treba imati najveći učinak uz najmanju utrošenu masu. Zbog toga se od početka upotrebe gospodarskih eksploziva koriste metode za utvrđivanje efikasnosti i učinka eksploziva. Dvije su vrste metoda za utvrđivanje efikasnosti i učinka eksploziva. To su laboratorijske metode i metode *in situ*.

U ovom poglavlju opisane su metode određivanja učinka eksploziva u laboratoriju. Radni učinak se određuje na malim uzorcima eksploziva u laboratorijskim uvjetima i tako dobiveni rezultati se koriste za relativno određivanje radnog učinka u odnosu prema izabranom eksplozivu ili za međusobnu usporedbu radnog učinka različitih eksploziva. Ispitivanja se obavljaju u sredini koja najčešće nema zajedničkih karakteristika sa stvarnom sredinom u kojoj će se eksploziv koristiti.

3.1. Mjerenje radne sposobnosti eksploziva olovnim cilindrom – Trauzl

Isidor Trauzl osmislio je metodu za određivanje radne sposobnosti eksploziva upotrebom olovnog cilindra. Metoda se temelji na računanju razlika volumena provrta olovnog cilindra prije i proširenja nakon eksplozije.

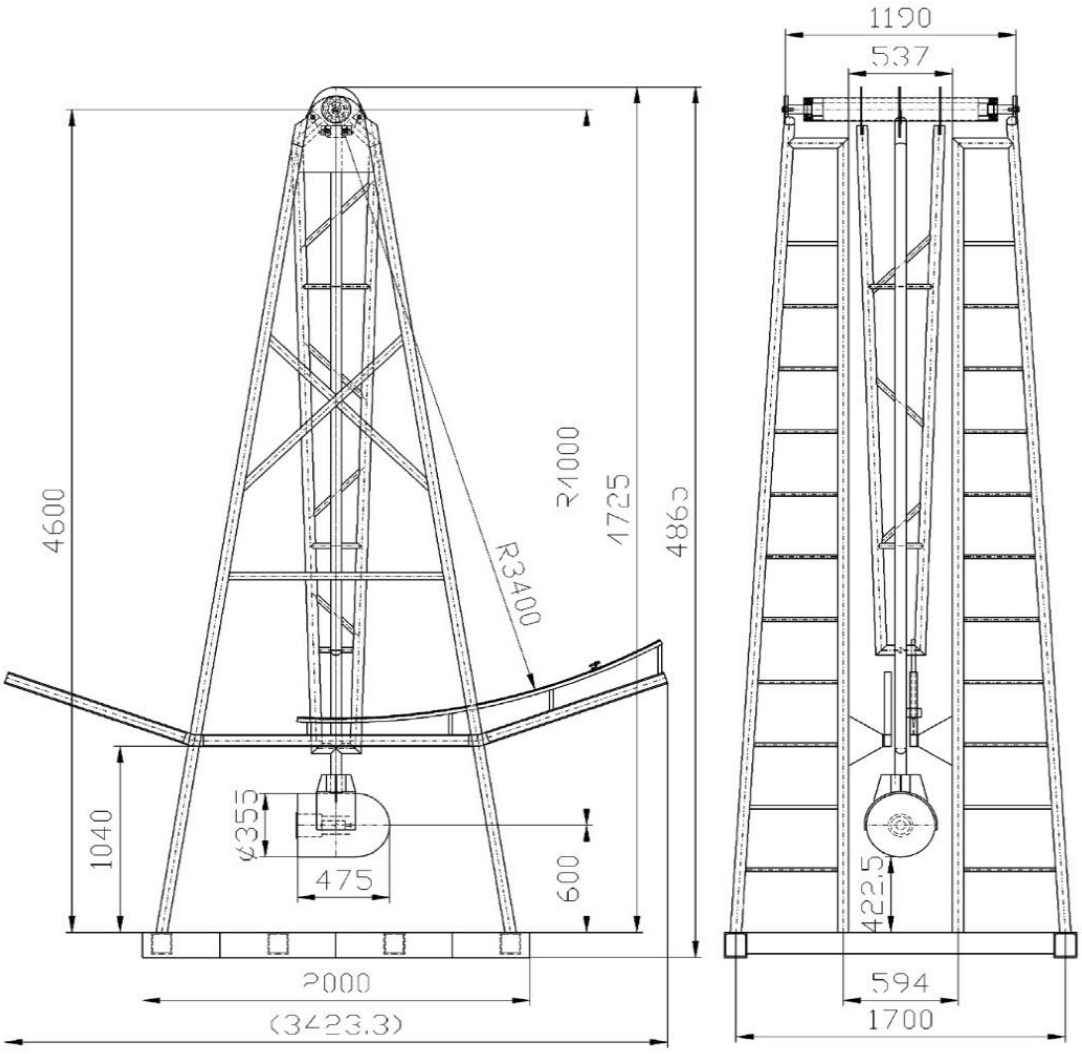
3.2. Relativna radna sposobnost određena pomoću balističkog njihala

Ispitivanje balističkim njihalom upotrebljava se za određivanje relativne snage eksploziva i impulsa sile na površini eksplozivnog naboja. Temelj metode čini usporedba kuta otklona njihala dobivenog otpucavanjem ispitivanog eksploziva s kutom otklona koji je postignut referentnim eksplozivom, odnosno, razornom želatinom (nitroglicerin i nitroceluloza), TNT-om ili pikrinskom kiselinom (Sućeska, 1995).

Balističko njihalo sastoji se od:

- noseće konstrukcije položene na betonski temelj,
- osovine njihala smještene na vrhu nosača,
- „ruke“ njihala,
- masivnog cilindričnog utega (*mortara*) koji se nalazi na kraju ruke njihala,
- projektila eksplozivnog punjenja,
- sklopa za zaustavljanje projektila.

Balističko njihalo shematski je prikazano na slici 3-1.



Slika 3-1: Shema balističkog njihala (OZM Research, 2014)

Ispitivanje se provodi tako da se u dno šupljine utega stavi uzorak ispitivanog eksploziva, a šupljina se naknadno zatvara projektilom. Otpucavanjem eksploziva, projektil izlijeće iz utega te se zaustavlja pomoću pristroja za zaustavljanje,smještenog na udaljenosti otprilike 6 m od njihala (Sućeska, 1995).

Zbog reaktivne sile i ekspanzije plinova pri detonaciji, uteg se pomiče u suprotnu stranu od projektila. Otklon ispitivanim eksplozivom uspoređuje se s otklonom postignutim otpucavanjem referentnog eksploziva određene mase. Rezultat je relativna radna snaga eksploziva u odnosu na referentni eksploziv, a prikazuje se postotnim odnosom prema izrazu:

$$P = \frac{1-cos\propto}{1-cos\beta} \times 100, \quad (3\text{-}1)$$

gdje je:

P – relativna radna snaga (%),

α – kut otklona ispitivanog eksploziva (°),

β – kut otklona referentnog eksploziva (°).

Na slici 3-2 prikazana je fotografija balističkog njihala.



Slika 3-2: Balističko njihalo (OZM Research, 2014)

3.3. Određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindara (po Hessu)

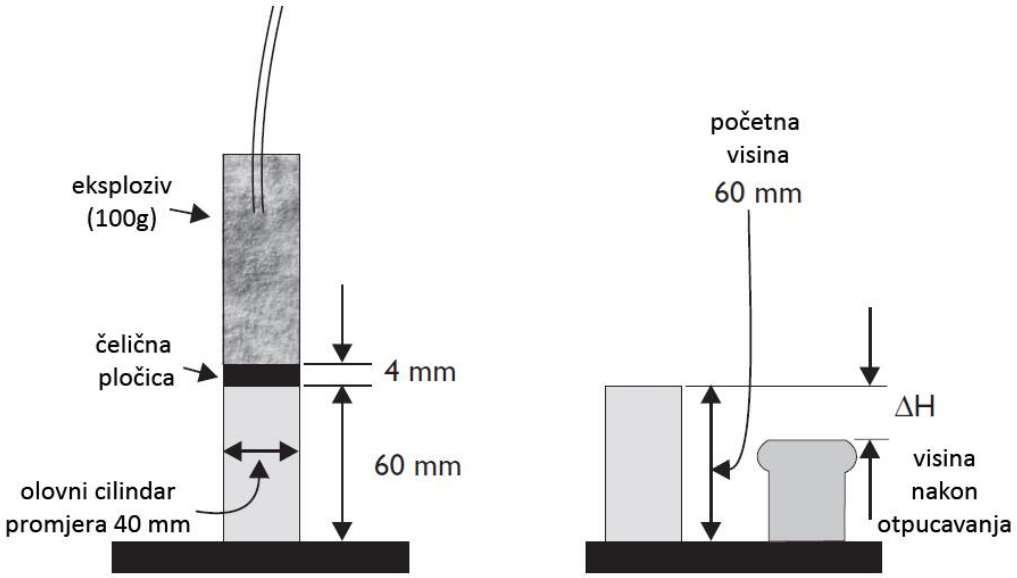
Brizantnost eksploziva se direktno određuje na temelju stlačenja olovnog cilindra pod utjecajem udarnog vala pri detonaciji ispitivanog eksploziva. Olovni cilindar visine 60 mm, promjera 40 mm i definirane kvalitete postavlja se na željezni nakovanj (Sućeska, 1995).

Olovni cilindar postavlja se na nakovanj ili krutu čeličnu ploču, čija je funkcija je prijenos udarnog vala na cilindar, a njegova debljina ovisi o brizantnosti eksploziva.

Razlika u visini olovnog cilindra prije i nakon detonacije služi kao direktna mjera za određivanje briznatnosti testiranog eksploziva.

Brizantnost testiranog eksploziva se može izraziti kao relativna brizantnost, brizantnost u odnosu na referentni eksploziv, a oba su testirana pod istim uvjetima. Relativna brizantnost se dobiva kao omjer između smanjenja visine cilindra pri detonaciji testiranog i referentnog eksploziva (Sućeska, 1995).

Shema određivanja brizantnosti po Hessu prikazana je na slici 3-3.



Slika 3-3: Shema određivanja brizantnosti prema Hessu (Bhalchandra, 2011)

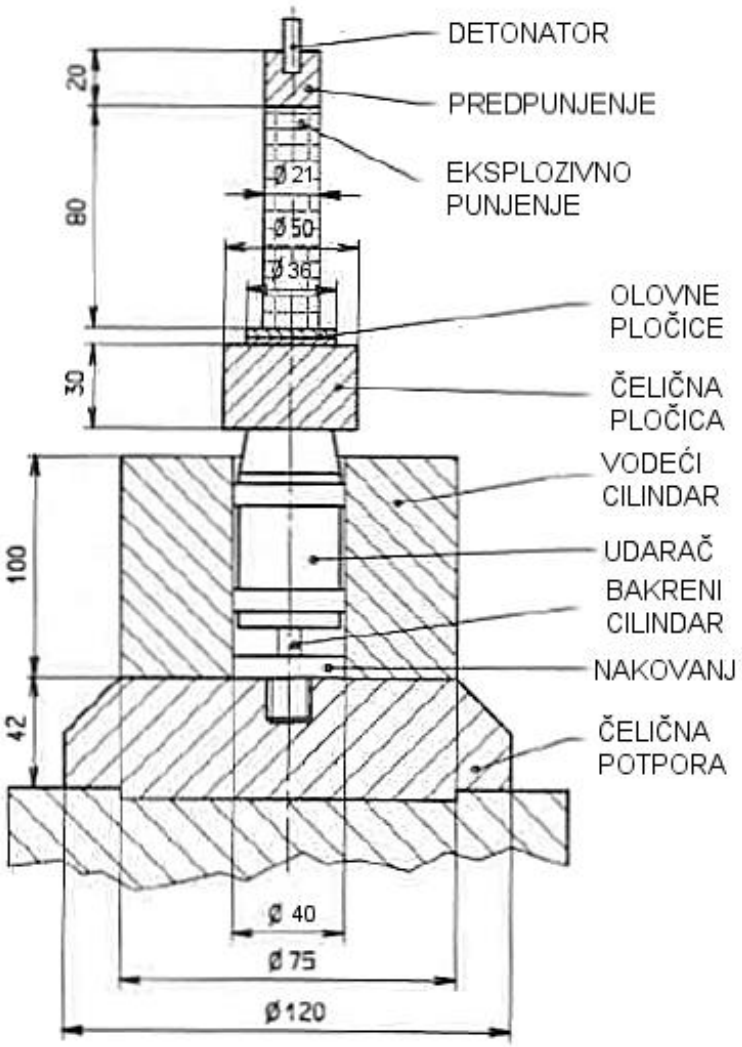
3.4 Određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindara (po Kastu)

Određivanje brizantnosti eksploziva ovom metodom temelji se na mjerenju stlačenja bakrenog cilindra uzorkovanog detonacijom eksplozivnog punjenja.

Brizantnost ispitivanog eksploziva se izražava preko deformacije cilindra, ili kao relativna brizantnost u odnosu na referentni eksploziv.

Aparatura za određivanje brizantnosti po Kastu prikazan je na slici 3-4 (Sućeska, 1995) i sastoji se od:

- čeličnog postolja (potpore) i vodećih cilindara,
- bakrenog cilindra postavljenog na nakovanj,
- udarača,
- čeličnih i olovnih pločica i
- pocinčane cijevi s eksplozivnim punjenjem i detonatorom.



Slika 3-4: Kastova aparatura (Sućeska, 1995).

3.5. Podvodni detonacijski pokus

Ovaj test ima posebnu važnost zato sto omogućava utvrđivanje jačine eksploziva koji ne mogu potpuno detonirati ako je njihova masa manja od 10 g. Kada se eksplozivno punjenje otpuca na određenoj dubini ispod površine vode, ukupna oslobođena energija podijeljena je na energiju udarnog vala, koji se sferično širi od centra eksplozije, i energiju ekspanzije plinova (energija mjehurića).

Metoda se temelji na detonaciji eksplozivnog naboja pomoću detonatora ili putem pojačivača na definiranoj podvodnoj dubini i mjerenju vremenskog perioda udarnog vala i perioda ekspanzije plinova pomoću piezoelektrične sonde. Sonda se nalazi na određenoj udaljenosti od eksplozivnog punjenja, a mjeri promjenu tlaka u odnosu prema promjeni vremena, tako da se prvo mjeri promjena tlaka uzrokovana udarnim valom, a onda promjena uzrokovana ekspanzijom produkata eksplozije

Na temelju vremenskog profila udarnog vala dobiva se energija udarnog vala, a na temelju vremenskog perioda mjehurića dobiva se energija mjehurića. Njihovom sumom dobiva se ukupna energija eksploziva.

Testiranja se izvode na rijekama ili morima, ali moguće je i u vodom ispunjenim bazenima različith veličina. Rijeke i mora imaju prednost budući da omogućavaju testiranje eksploziva većih masa.

Energija udarnog vala (E_s) se dobiva na temelju eksperimentalne dobivene ovisnosti tlaka udarnog vala o vremenu prema izrazu:

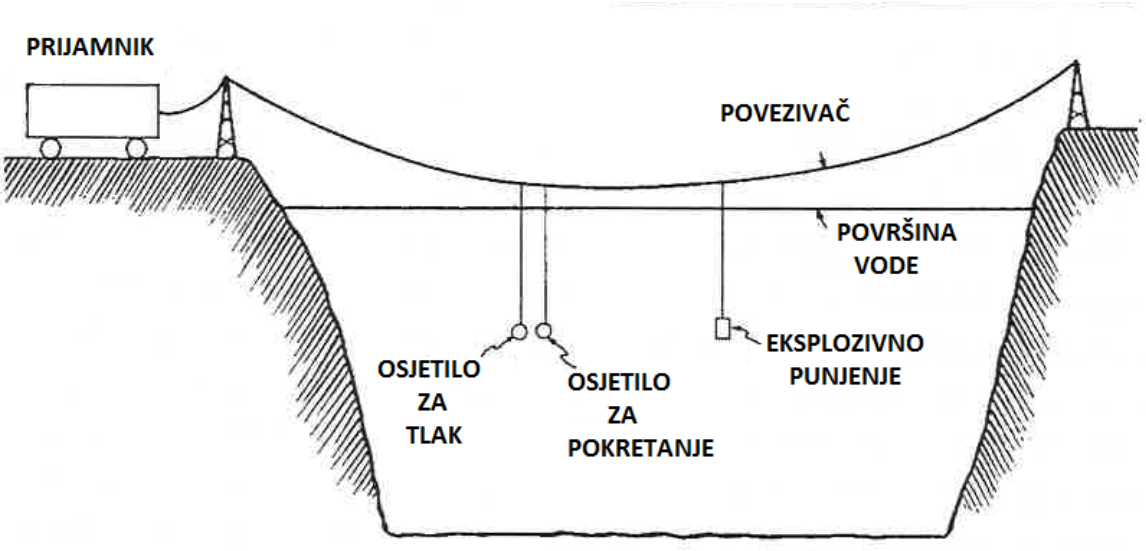
$$E_s = \int p dt \tag{3-2}$$

gdje je:

p - tlak (Pa),

dt - promjena vremena (s)

Na slici 3-5 prikazan je shematski prikaz detonacijskog podvodnog testa.



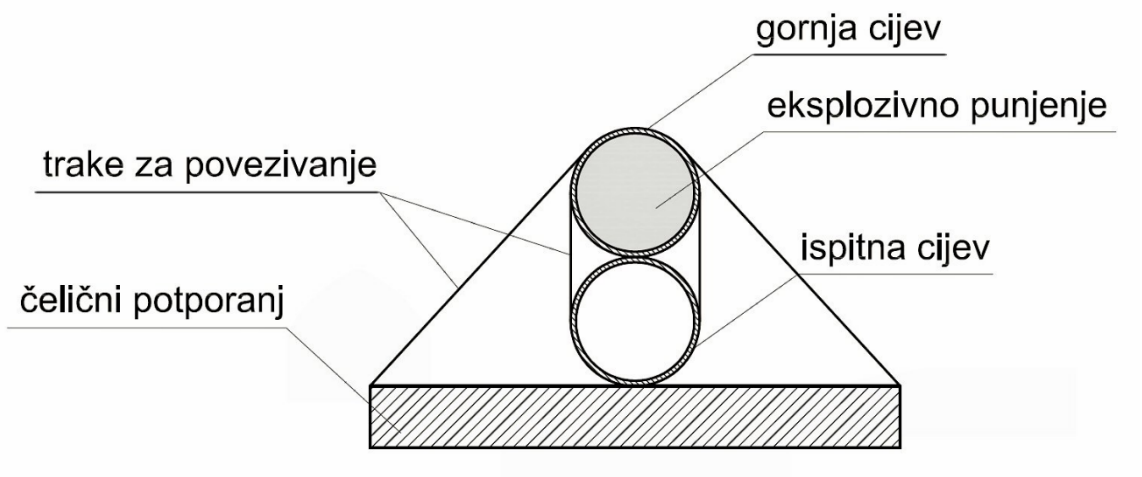
Slika 3-5:Prikaz podvodnog detonacijskog testa (Mahadevan, 2012).

3.6. Ispitivanje s dvostrukim cijevima

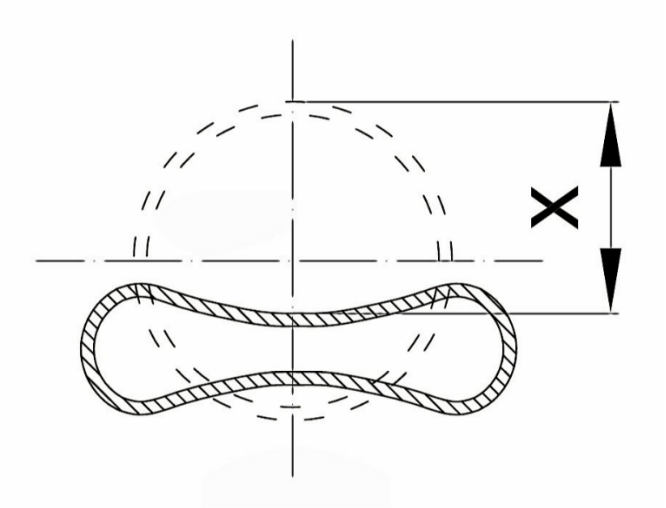
Ispitivanje s dvostrukim cijevima je jednostavna metoda koja se može koristiti za određivanje brizantnosti i radne sposobnosti komercijalnih eksploziva, pogotovo onih koji se koriste u bušotini. Uvjeti ispitivanja su slični stvarnim uvjetima, što predstavlja važnu prednost ove metode.

Eksplozivno punjenje u obliku standardnih patrona različitih duljina se postavlja u metalnu cijev koja simulira bušotinu. Zajedno s punjenjem, cijev je postavljena iznad prazne ispitne cijevi, koja je položena na nakovnju (slika 3-6). Nakon detonacije eksplozivnog punjenja dolazi do deformiranja ispitne cijevi (slika 3-7). Na slici 3-8 usporedno su prikazani izgledi dvostrukih cijevi prije i poslije provedenog ispitivanja.

Deformacije se mjere uzduž ispitne cijevi i ovise o više parametara: karakteristike eksplozivnog punjenja, promjer patrone eksploziva, gustoća punjenja, karakteristike materijala čelične cijevi.Dobiveni podatci ispitivanja se uspoređuju s rezultatima referentnog eksploziva u istim uvjetima.



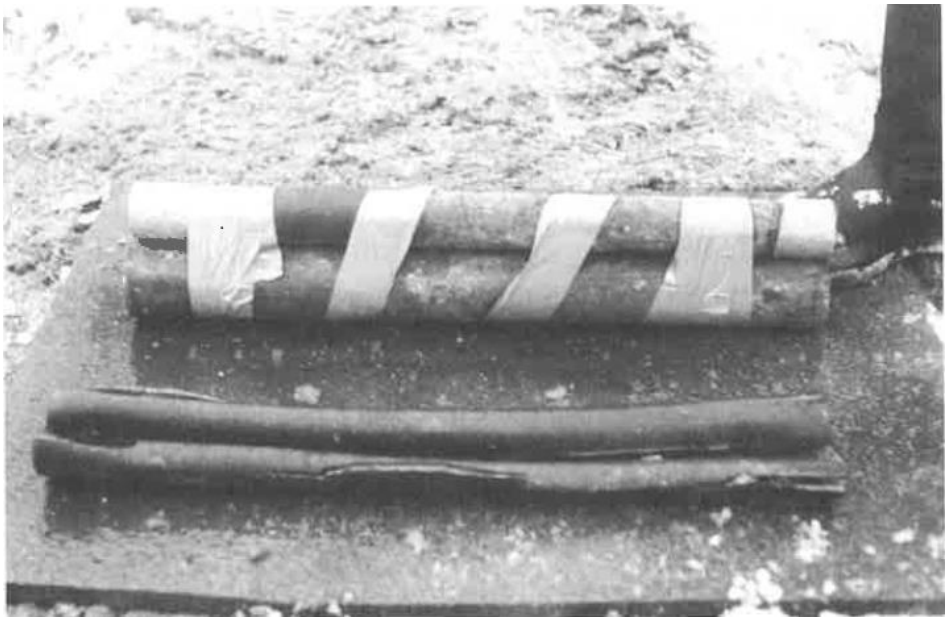
Slika 3-6: Shematski prikaz ispitivanja s dvostrukim cijevima (Škrlec, 2015)



Kazalo:

X – mjera spljoštenosti (mm).

Slika 3-7: Prikaz spljoštenja ispitne cijevi (Sućeska, 1995)



Slika 3-8: Prikaz cijevi prije (gore) i nakon otpucavanja (dolje) (Ester, 2005)

4. ODREĐIVANJE BRIZANTNOSTI EKSPLOZIVA ŠIRENJEM BAKRENOG CILINDRA

Test ekspanzije cilindra *(eng. Cylinder Expansion Test, CYLEX)* laboratorijska je metoda određivanja radne sposobnosti i brizance eksploziva. Metoda je razvijena 1960. godine u laboratoriju Lawrence Livermore (Kalifornija, SAD) (Harrier, 2016). Radi se o jednom od najpopularnijih postupaka karakterizacije adijabatske ekspanzije detonacijskih produkata putem mjerenja pomaka i brzine ekspandirajućeg bakrenog cilindra. Primarna svrha testa bila je određivanje ekspanzijske energije, odnosno rada eksploziva,u vojne svrhe (Castedo et al., 2018; Brown, 2014).

Ekspanzijski test daje najpotpunije informacije za rješavanje problema kao što je optimalni transfer energije s eksplozivnog naboja na susjedni medij (ili okolinu) promatranjem ekspanzije detonacijskih produkata u bakrenoj cijevi (Sućeska, 1995).

4.1. Opis metode

Sam cilindar izrađen je od bakra (Cu) zbog njegovih izrazitih svojstava vodljivosti te čvrstoće, odnosno, omogućava veliku ekspanziju cilindra prije puknuća istoga. U usporedbi s čelikom, mogućnost ekspanzije mu je dvostruko veća prije no što dosegne kritične vrijednosti čvrstoće. Zbog povoljnih uvjeta za širenje detonacije fronte i postizanje maksimalne brzine detonacije, minimalni odnos dimenzija duljine i širine (promjera) cilindra iznosi 8:1. Debljina stijenki bakrenih cijevi kreće se oko 1/5 radijusa cilindra propisanog standarda. (Brown, 2014).

Sam cilindar, građen od OFHC bakra (*Oxygen Free High Conductivity* – visoke provodljivosti, bez udjela kisika), mora biti vakuumski žaren na otprilike 600°C u struji inertnog dušika u trajanju od najmanje dva sata te bez prisustva kisika (prema normi *ASTM F68-05*). Žarenjem bakra poboljšavaju se već spomenuta svojstva vodljivosti materijala. Osim bakra, norma testa dozvoljava korištenje i drugih materijala, kao što je tantal (Ta), no takav se materijal obično koristi u slučaju ispitivanja vojnih eksploziva velike gustoće (Hansson, 2009).

Brzina vanjske površine cilindra obično se mjeri u smjeru pomaka materijala pomoću specijaliziranih kamera, Fabry-Perot interferometra, PDV senzora ili drugih tehnologija (Hansson, 2009). Trenutna pozicija stijenke, u određenom vremenu, bilježi se na otprilike 500 točaka uzduž cilindra.

Instrumentirano ispitivanje eksploziva obično zahtijeva neku vrstu pribora za držanje sondi, montažu senzora ili detonatora, osiguravanje stabilnosti dimenzija ili poravnanje cijelog sklopa. Uređaji su obično izrađeni od drveta ili plastike što ih čini relativno jeftinima, laganim, lako prenosivim te sigurnim (bez metalnih fragmenata). S druge strane, detonacija ih pretvara u beskorisni otpad koji pokriva mjesto ispitivanja tako da se u obzir treba uzeti i utjecaj na okoliš.Kretanje stijenke cijevi može se pratiti pomoću niza električnih (ionizacijskih) igli za kratko spajanje (slika 4-1), velike brzine snimanja fotoaparata ili laserskih interferometrijskih tehnika, kao što je fotonska Doppler brzina (PDV) (Künzel et al., 2013).

Postolje cilindra i držači sondi mogu biti izgrađeni od različitih materijala. Prvi pokušaji bili su izvedeni jednostavnim drvenim stalcima i držačima sondi, ali ih je bilo teško prilagoditi te su pokazivali nezadovoljavajuće rezultate glede čvrstoće. U narednim godinama bili su u upotrebi držači sonde izrađeni od aluminijskih blokova s probušenim rupama. Postolja i držači te vrste pokazali su se neadekvatnim za višekanalne sonde (PDV) (Künzel et al., 2013).

Razvojem tehnologije, ponajprije softvera za 3D modeliranje, kao što je Free CAD, postolje za cilindar test moguće je brzo i efikasno dimenzionirati i izraditi te pritom zadovoljiti tražene uvjete kvalitete konstrukcije kao što su jednostavna montaža, čvrstoća i stabilnost, mali broj dijelova, mala težina te prilagodljivost mjernom sustavu, itd.

Kao najbolje rješenje, prema *Künzel et al., 2013,* pokazale su se kombinacije laserskog rezanja i 3D printane konstrukcije postolja od plastičnih masa:

- polilaktidi (PLA) - uz 20 % ispune;
- modificirani polietilen tereftalat (PETG) - uz 80 % ispune;
- vlaknaste *Fireboard* ploče (MDF) srednje gustoće.

Navedene inačice pokazale su zadovoljavajuću krutost i omogućile dovoljnu preciznost dobivenih signala iz PDV sondi. Glavni nedostatak upotrebe plastičnih masa za izgradnju nosive konstrukcije jesu krhotine plastike koje zaostaju nakon odrađenog testa, odnosno, nakon detonacije. PLA plastična masa koja se koristi prirodno je biorazgradiva (bakterijski ili fotokemijski), tako da raspršeni komadići plastike ne predstavljaju veliku opasnost za okoliš (Künzel et al., 2013).

Prema slici 4-2, cilindar je na okolnu konstrukciju pričvršćen na udaljenosti 1/4 ukupne duljine od dna. Detonacija se kreće odozdo prema gore (Souers & Vitello, 2015).



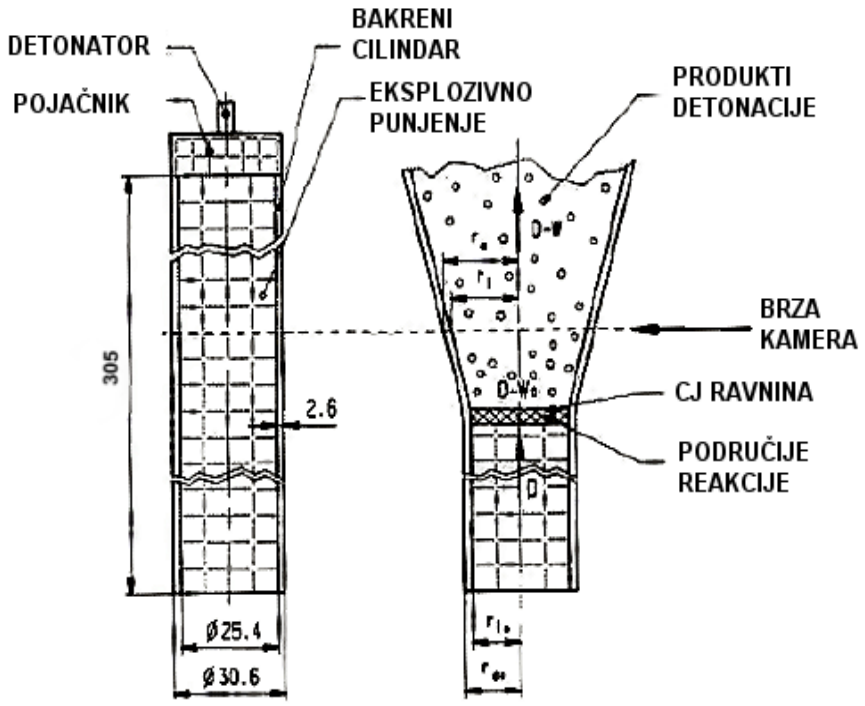
Slika 4-1: Radijalno postavljene ionizacijske igle tzv. *pinovi* za registraciju oblika kretanja, pomaka i brzine stijenki cilindra (Sanchidrian, 2015)



Slika 4-2: Prikaz nosive konstrukcije bakrenog cilindra u CYLEX testu (Souers & Vitello, 2015)

Za test s bakrenim cilindrom nastoji se koristiti eksplozivni naboji male duljine (od 1" do maksimalnih 6 ", ovisno o vrsti upotrebljene preše). Rubovi eksplozivnog naboja trebaju biti što ravniji kako bi zračni raspor između njih bio što manji. Važno je zadržati radijalne zračne razmake između naboja i bakrenog cilindra kako bi se suzbila mogućnost pojave kanalnog efekta prilikom detonacije. Sonde se ciljano postavlja između praznina (Souers & Vitello, 2015).

Ispitivani eksploziv stavlja se u bakreni cilindar. Unutarnji promjer standardnog cilindra je 25,4 mm, duljina 306 mm, a debljina stijenki 2,6 mm (slika 4-3). Iniciranje pripremljenog eksplozivnog punjenja izvršava se na jednom kraju cilindra pomoću detonatora i pojačnika (boostera). Ekspanzija cilindra, povećanje vanjskog radijusa, bilježi se odgovarajućim uređajima, primjerice, specijaliziranim kamerama pozicioniranim okomito na konstantni presjek cilindra. Zbog načina bilježenja potrebnih podataka potrebno je osigurati adekvatnu rasvjetu.



Slika 4-3: Shematski prikaz širenja bakrenog cilindra (Sućeska, 1995)

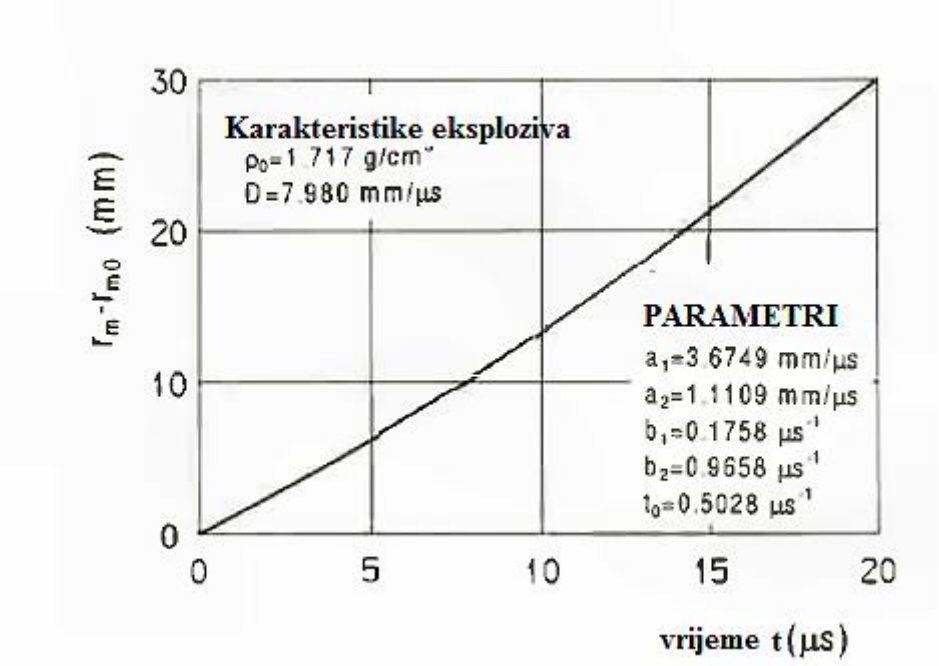
4.2. Načela ispitivanja ekspanzijske cijevi

CYLEX autori često opisuju kao kalibrirani test *(cijevna bomba)* kojime je tijekom cijelog procesa uspješno očuvana gustoća energije detonacije. Izlazna vrijednost cilindar testa je funkcijska vrijednost odnosa vremena i brzine detonacije. Kvadratna funkcija brzine proporcionalna je gustoći detonacijske energije (E_d) pri specifičnom relativnom volumenu (v). Iz opisanih izlaznih podataka težnja je dobiti (Souers & Vitello, 2015):

1) odnos brzine u stijenkama bakrenog cilindra s gustoćom detonacijske energije;
2) eksperimentalne odnose dobivene putem testa svesti na analitičke;
3) dobivene rezultate povezati s JWL (Jones-Wilkins-Lee) jednadžbom stanja za eksplozivne tvari;
4) dobiti adekvatne rezultate u prethodnim točkama zbog točnosti pri daljnjim ispitivanjima ove vrste.

4.2.1 Ekspanzijska krivulja

Ekspanzijska krivulja predstavljena je kao funkcijska veza između promjene vanjskog radijusa cilindra i vremena. Putem ekspanzijske krivulje izračunava se brzina stijenki i Gurneyjeva energija. Osim toga, ako su detonacijski produkti u Chapman - Jouguetovoj točki poznati, moguće je izračunati konstante u Jones-Wilkins-Lee jednadžbi stanja za detonacijske produkte izentropske ekspanzije (Sućeska, 1995).



Slika 4-4: Primjer dobivene ekspanzijske krivulje - funkcijska ovisnost (r_m-r_0, t) (Sućeska, 1995)

Kako je opisano u prethodnom potpoglavlju, šuplji bakreni cilindar puni se eksplozivnim nabojem. Eksplozivno punjenje se zatim detonira, a pomaci na stijenkama cilindra i brzine oscilacija se registriraju. Pomaci i registrirane brzine u bakrenom cilindru rezultat su djelovanja produkata visokoga tlaka koji akceleriraju i šire stijenku cilindra. Utvrđuje se volumen ekspandirajućih produkata i pripadajući postignuti pritisak koji akcelerira stijenke. Brzina na standardom određenim mjestima stijenki koristi se za proračun Gurneyjeve energije, a podaci o pomaku (položaju) stijenke cilindra i njenog ubrzanja čine izentropu produkata detonacije.

Izračunati pomak i brzina bakrene cijevi preračunavaju se za centralni dio cijevi i to se obično postiže pretpostavkama plastične (nekomprimirajuće) deformacije cilindra i činjenice da materijal stijenki nema pomak (tečenje) u uzdužnom smjeru. Nakon uvažavanja navedenoga, središnji radijus stijenki se računa iz površine presjeka na polovici cilindra prema izrazu (Hansson, 2009):

$$\pi(r^2{}_0 - \mathrm{r}^2{}_\mathrm{m}) = \pi(\mathrm{r}^2{}_\mathrm{m} - r^2{}_0) = \frac{1}{2}\pi(\mathrm{R}^2{}_0 - \mathrm{R}^2{}_\mathrm{i}), \qquad (4\text{-}1)$$

gdje je:

r_m - središnji radijus (mm),

r_0 - vanjski radijus (mm),

r_i - unutarnji radijus (mm),

R_0 - početni vanjski radijus (mm),

R_i - početni unutarnji radijus (mm).

Radijalna promjena centra radijusa (Δr_m) računa se na sljedeći način:

$$\Delta r_m = r_m - R_m = \sqrt{r_0^2 + \frac{R_i^2 - R_0^2}{2}} - \sqrt{R_0^2 + \frac{R_i^2 - R_0^2}{2}}, \quad (4\text{-}2)$$

Dobivene vrijednosti radijalne ekspanzije centra radijusa koriste se za usporedbu s rezultatima numeričkih simulacija (Hansson, 2009).

4.2.2. JWL jednadžba stanja

JWL (Jones-Wilkins-Lee) je jednadžba stanja koja se koristi pri modeliranju detonacije eksploziva te opisuje vezu između pritiska, volumena i energije detonacijskih produkata, a glasi:

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (4\text{-}3)$$

gdje su:

A, B, C, R_1, R_2 i ω konstante koje se trebaju utvrditi, a većinom su vezane upravo uz svojstva ispitivanog eksploziva,

E - energija (J),

V- volumen (m^3).

Upotreba JWL jednadžbe stanja prilikom obrade rezultata dobivenih metodom ekspanzije bakrenog cilindra je česta, a u kombinaciji s Gurneyjevom energijom osigurava detaljne informacije o svojstvima detonirane eksplozivne tvari te prijenosu i količini energije oslobođene tim procesom.

5. KONCEPT GURNEYJEVE ENERGIJE

Brizantnost eksploziva može se definirati kao omjer potencijala eksploziva i vremena trajanja detonacije, no ona spada pod pojam koji je po svom uskom značenju promjenjiv, a njezina vrijednost tumači se isključivo unutar metoda kojima se određuje. Uz dobru aproksimaciju, u slučajevima kada je to moguće koristi se povezanost između brizantnosti i detonacijskog udarnog vala, odnosno, kada je cilj predvidjeti učinke eksploziva na određeni medij dominantno se koristi načelo Gurneyjeve energije (Sućeska, 1995).

Matematički izrazi za proračun maksimalne brzine fragmenata metala odbačenih uslijed detonacije eksplozivnog punjenja razvijeni su od strane R.W. Gurneyja. Metoda koja je prema navedenom autoru dobila ime izravno je i jednostavno primjenjiva u mnogim slučajevima interakcije između eksploziva i metala (Walters & Zukas, 1989).

Za proračun maksimalne brzine metala koji je ubrzan djelovanjem eksploziva koristi se Gurneyjev model, a za proračun brzine primarnog i sekundarnog mlaza kumulativnih naboja Birkhoffov modeli PER teorija (Bohanek, 2013).

Gurneyjev model se temelji na zakonima o očuvanju energije i količine gibanja te sljedećim pretpostavkama (Bohanek, 2013):

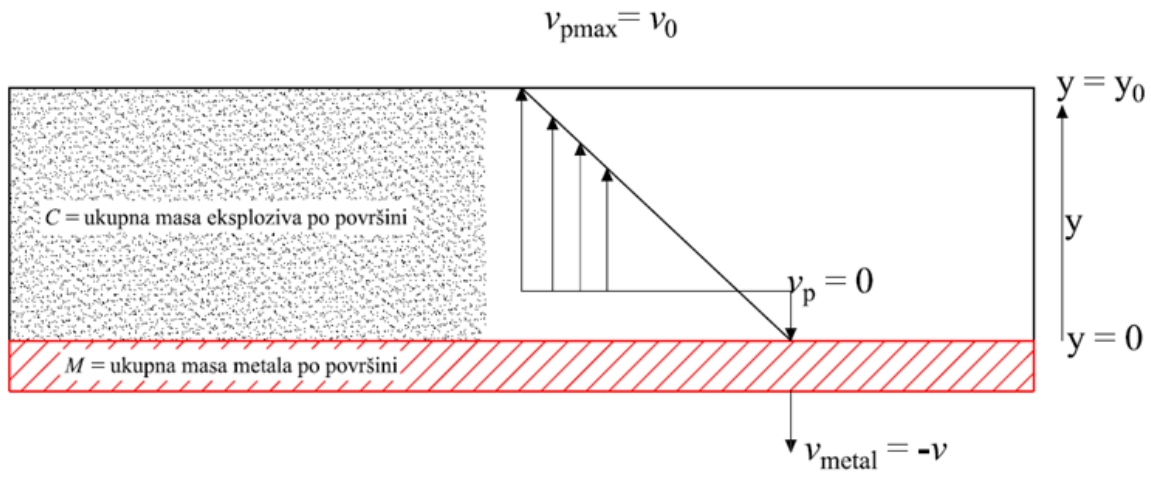
- količina energije oslobođena detonacijom eksploziva po jedinici mase metala je konstantna. Energija se pretvara u kinetičku energiju ubrzanog metala te kinetičku energiju putem plinovitih produkata detonacije;
- plinoviti produkti imaju jednoliku gustoću po cijelom volumenu i linerani jednodimenzionalni profil brzine u prostornom koordinatnom sustavu.

Ovisno o načinu djelovanja udarnog vala eksplozivnog naboja i obliku obloge linijskih kumulativnih rezača, koji se uglavnom sastoji od ravne površine, neizostavno je poznavati i Taylorov model (Bohanek, 2013).

5.1. Gurneyjeva energija

Gurneyjeva energija E_g (J/kg) je energija pretvorena iz kemijske energije eksploziva u početnom stanju u kinetičku energiju konačnog stanja. Uz pretpostavku da je brzina metala konstantnog iznosa duž njegove debljine te da su brzine metala i plinova u svakoj točki okomite na uzdužnu os promatranog sustava (Altgilbers et al., 2011). Opisane pretpostavke uvelike pojednostavljuju proces, a naposljetku, i sam proračun.

Moguće je napisati jednadžbu očuvanja energije za bilo koji tip jednostavne simetrične i asimetrične konfiguracije metala i eksploziva (Tablica 5-1 i 5-2). Integracijom jednadžbe očuvanja dobiva se analitički izraz za konačnu brzinu ubrzanog metala. Maksimalna brzina 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 prikazan je za sustav na slici 5-1, jednostavni asimetrični sendvič sustav s otvorenim naličjem.



Slika 5-1: Sendvič-sustav eksploziva i metala i pojednostavljena raspodjela brzina (Bohanek, 2013)

U slučaju linearnog rasporeda brzina po osi y proizlazi:

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

gdje je:

v_m - brzina metala (m/s),

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

y_0 - početna debljina eksploziva (m).

Ako eksplozivni naboj detonira u metalnom cilindru, uz pretpostavku da je gustoća produkata detonacije konstantna, izraz za Gurneyjevu energiju je sljedeći:

$$2E_g = \mu v_m^2 + \frac{1}{2}\int v_g dV, \tag{5-2}$$

gdje je:

v_m - brzina stijenki materijala (m/s),

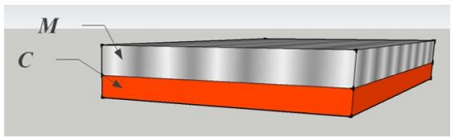
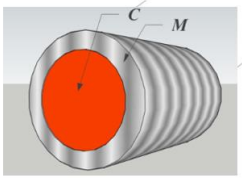
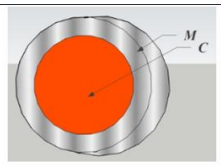
v_g - brzina produkata detonacije (m/s),

μ - omjer mase cilindra i eksplozivnog punjenja.

Gurneyjeva konstanta $\sqrt{2E_g}$ pojavljuje se u svim jednadžbama, a za pojedini eksploziv može se odrediti na više načina. Prema različitim autorima, postoji više relacija za izračun Gurneyjeve energije:

- relacija koju je predložio Kennedy:
  $E_g \approx 0{,}7Q_v$, gdje je Q_v detonacijska toplina eksploziva;
- relacija koju su predložili Koch i suradnici:
  $\sqrt{2E_g} = \frac{v_d}{3{,}08}$, gdje je $\sqrt{2E_g}$ Gurneyjeva konstanta (brzina) (m/s) i v_d brzina detonacije eksploziva (m/s)

Tablica 5-1: Gurneyjeve jednadžbe za pojedine različite simetrične i asimetrične konfiguracije metala i eksploziva (Bohanek, 2013)

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

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

Eksploziv	**Gustoća (g/cm^3)**	**Brzinadetonacije (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

Prednosti Gurneyjevog modela su, *prema Walters &Zukas, 1989*:

- visoka točnost, odstupanja su unutar 10 % eksperimentalno dobivenih rezultata;
- primjenjivost unutar odnosa M/C od 0,1 do 10;
- jednostavnost proračuna;
- raširenost primjene proračuna (fragmentacija bojevih glava, zavarivanje metala eksplozivom, oblikovanje metala uz pomoć eksploziva).

5.2 Dobivanje Gurneyjeve konstante putem CYLEX testa

Gurneyjeva energija najčešće se dobiva iz eksperimentalnih podataka putem ekspanzijskog cilindar testa. Štoviše, prema detaljnijim teorijskim razmatranjima pokazuje se kako je cilindar testom moguće izračunat i tlak detonacije i detonacijsku toplinu eksploziva (Sućeska, 1995). Iako je test izvedbeno jednostavan, obrada dobivenih podataka predstavlja važniji i kompliciraniji segment metode. Iz izmjerenih podataka brzine stijenke cilindra dobivamo Gurneyjevu energiju te jednadžbu produkata detonacije izentropske ekspanzije. Pomoću grafičkog ili analitičkog pristupa dobivenoj ekspanzijskoj krivulji cilindra, brzinu stijenki možemo dobiti na sljedeće načine (Sućeska, 1995):

- tangentom na krivulju i
- derivacijom analitičkog izraza.

U početku ekspanzije, materijal stijenki cilindra giba se nejednoliko, te se zbog toga pri obradi dobivenih podataka za početnu vrijednost radijalne ekspanzije uzima vrijednost od 5 mm (r_a - r_{a0} = 5 mm). Jednako tako, za točku maksimalne brzine stijenki uzima se odgovarajući prirast nastao zbog ekspanzije koji iznosi 19 mm ((r_a - r_{a0} = 19 mm). U ostalim slučajevima dobiveni podaci ekspanzije se izravno mjere i korigiraju sukladno potrebama. Pretpostavljajući da tlak detonacijskih produkata, koji se pojavljuje iza detonacijske valne fronte, i radijalna akceleracija imaju eksponencijalni porast, proizlazi:

$$\frac{d^2 r_m}{dt^2} = \sum a_j b_j e^{-b_j t_i}, \tag{5-3}$$

gdje r_m - radijus cilindra (mm), s vrijednošću koja se nalazi unutar intervala unutarnjeg (r_i) i vanjskog radijusa (r_a).

Prema početnim uvjetima ekspanzije, vrijedi:

$$r_i = r_{io}$$

$$\frac{dr_i}{dt} = 0$$

$$t_i = 0$$

$$r_m dr_m = r_i dr_i$$

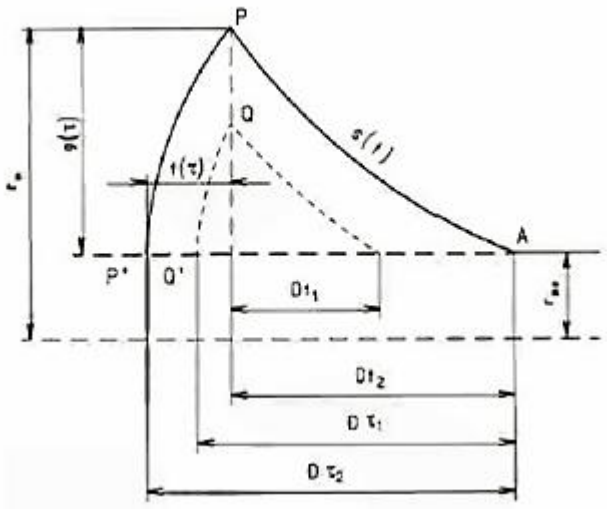
Dvostrukom integracijom jednadžbe 5-3 uz gore navedene početne uvjete dobiva se:

$$(r_m - r_{m0}) = \sum a_j \left[t_i - \frac{1}{b_j}\left(1 - e^{-b_j t_i}\right) \right], \qquad (5\text{-}4)$$

Parametre a_j i b_j određujemo ovisno o eksperimentalno dobivenim podacima (r_m-r_{m0}, t). Ekspanzijski proces, s gledišta udarnog detonacijskog vala na prstenasti infinitezimalni dio unutrašnje stijenke cilindra, propagira kroz spomenuti dio sve dok ne dođe do vanjske površine istoga. Prije no što se to dogodi, infinitezimalni prstenasti dio cilindra počine se gibati kao slobodna površina. Zbog opisanih razloga, promjenom početnih uvjeta iz t_i=0 u t_i = t+t_0, izraz za ekspanziju cilindra prelazi u:

$$(r_m - r_{m0}) = \sum a_j \left[t_i - \frac{e^{-b_j t_0}}{b_j}\left(1 - e^{-b_j t_i}\right) \right], \qquad (5\text{-}5)$$

Specijalnim kamerama bilježi se ekspanzija cilindra. Snimaju se točke na pozicijama Q i P u vremenima t_1 i t_2. Početni položaji na stijenkama cilindra su Q' i P', a nakon prolaska vremenskih perioda t_1 i t_1, detonacijska valna fronta napreduje do položaja Dt_1 i Dt_2. Točke P' i Q' podliježu ekspanziji i prije no što to uspije zabilježiti kamera (slika 5-2). Vrijeme ekspandiranja čestice, τ, veće je od vremena zabilježenog kamerom,t (Sućeska, 1995).



Slika 5-2: Ekspanzijska putanja individualne materijalne točke cilindra (Sućeska, 1995)

Točku P na stijenkama cilindra možemo opisati koordinatama:

$$g(\tau) = r_m(t) - r_{m0}$$

$$f(\tau) = D(\tau - t)$$

Uz pretpostavku da je materijal stijenki cilindra nestišljiv, te da duljina luka s(t) mora biti jednaka putanji detonacijskog vala (AP'),izvodi se sljedeća diferencijalna jednadžba:

$$\frac{d\tau}{dt} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{D}\frac{dr_m}{dt}\right)^2} = \frac{1}{cos\Theta}, \tag{5-6}$$

gdje je Θ kut ekspanzije dan prema izrazu 5-7 ili 5-8:

$$\frac{dr_m}{dt} = v_r = Dtan\Theta, \tag{5-7}$$

ili:

$$tan\Theta = \frac{v_r}{D}, \tag{5-8}$$

gdje je v_r radijalna komponenta brzine stijenke cilindra (s^{-2})

Zatim se Gurneyjeva energija izračunava iz podataka brzine stijenke cilindra i pripadajuće akceleracije (Sućeska, 1995).

Pretpostavljajući da je brzina detonacijskih produkata u linearnom porastu u smjeru ekspanzije, te da je zbog geometrije cilindra moguće uspostaviti odnos $v_g = v_m r/r_m$ (gdje je r_m radijus cilindra), gore navedeni izraz integracijom prelazi u:

$$2E_g = \left(\mu + \frac{1}{2}\right) v_m^2, \tag{5-9}$$

A prema tome, brzina v_m:

$$v_m = \sqrt{\frac{2E_g}{\left(\mu + \frac{1}{2}\right)}}, \tag{5-10}$$

Iz dobivenog je vidljivo kako brzina stijenki pri CYLEX testu izravno ovisi o omjeru masa cilindra i eksplozivnog punjenja. Vrijednost $2E_g$ naziva se Gurneyjeva konstanta.

Maksimalna brzina stijenki cilindra može se izračunati teoretski ako je poznata brzina detonacije eksploziva, uz pretpostavku da je totalna energija eksploziva (M_Eq) (formula 5-11) u potpunosti iskorištena na stijenkama cilindra (brzina stijenki). Dakle, svi su oblici gubitaka energije zanemareni.

$$M_E Q = \frac{M_m v_m^2}{2}, \tag{5-11}$$

gdje je:

M_E - masa eksploziva (g);

Q - toplina detonacije (MJ),

M_m - masa metalnog cilindra (kg).

Ako se detonacijska brzina izrazi preko topline detonacije dobiva se:

$$D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)q}, \tag{5-12}$$

Ako se za vrijednost politropske konstante, γ, uzme 3 (aproksimacija za eksplozive veće gustoće) proizlazi:

$$D = 4\sqrt{q}, \tag{5-13}$$

Odnosno:

$$D = \frac{D^2}{16}, \tag{5-14}$$

Uključivanjem tog izraza u jednadžbu za totalnu energiju eksploziva, maksimalna brzina stijenki može se izračunati:

$$v_{m,max} = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{1}{2\mu}}, \tag{5-15}$$

Uzimajući u obzir gubitke kinetičke energije detonacijskih produkata i gubitke topline, dolazi se do analognog izraza:

$$v_m = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{1}{2\mu+1}}, \tag{5-16}$$

Gurneyjeva energija dobiva se pomoću već opisane jednadžbe:

$$2E_g = \left(\mu + \frac{1}{2}\right) v_m^2, \tag{5-17}$$

Uz pretpostavku da je brzina pojedine čestice konstantna tijekom vremena, jednadžbe za očuvanje energije i količine gibanja poprimaju sljedeći oblik:

$$CE_g = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}\rho_e \int_0^{y0} \left[(v_0 + v_m)\frac{y}{y_0} - v_m\right]^2 dy$$

$$0 = -Mv + \rho_e \int_0^{y0} \left[(v_0 + v_m)\frac{y}{y_0} - v_m\right] dy \tag{5-18}$$

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),

ρ_m - gustoća metala (kg/m^3),

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

Integriranjem jednadžbi očuvanja dobivaju se sljedeći izrazi:

$$Mv = \rho_e \left[(v_0 + v_m) \frac{y^2}{2y_0} - v_m y \right]_0^{y_0}, \tag{5-19}$$

$$Mv = \rho_e y_0 \left[\left(\frac{v_0 + v_m}{2} \right) - v_m \right], \tag{5-20}$$

$$v_m = \sqrt{2E_g} \left[\frac{\left(1+2\frac{M}{C}\right)^3 + 1}{6\left(1+\frac{M}{C}\right)} + \frac{M}{C} \right]^{-1/2}, \tag{5-21}$$

$$\frac{v_0}{v_m} = 2\frac{M}{C} + 1, \tag{5-22}$$

6. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I REZULTATI

U okviru ovog poglavlja prikazat će rezultati ekspanzijskih testova na bakrenim cilindrima. Osim što različite vrste eksploziva daju različite rezultate, jednako tako na sam oblik rezultata utječe i promatrani parametar (pomak, brzina, energija), ali i sam način izvedbe eksperimenta (kut ionizacijskih igli).

Prilikom usporedbe rezultata ispitivanja najrelevantniji kriterij usporedbe je Gurneyjeva energija.

U sljedećim potpoglavljima razmatrat će se rezultati CYLEX testa za različite vrste eksplozivnih smjesa.

6.1. Rezultati za amonij-nitratne aluminizirane eksplozive

Cilj ovog ispitivanjima na aluminiziranoj smjesi amonij-nitrata bio je utvrditi karakteristike navedene eksplozivne smjese te pokušati odrediti pri kojoj je gustoći detonacijski proces, u vidu oslobođene energije optimalan.

Prema Anderson et al. (2017), amonij-nitrat (čistoće 98 %) i aluminijev prah (čistoće 99,8 %) za potrebe ispitivanja pomiješani su u omjeru 9:1 i stavljeni u bakrenu cijev. Posebna pažnja posvećena je i granulaciji eksplozivnog punjenja, pa su eksplozivne komponente prethodno bile obrađivane u mlinu na određenu granulaciju.

Prilikom punjenja, cijev je lagano potresana kako bi se povećala gustoća punjenja eksplozivne smjese. Korištena je bakrena cijev (OFHC) povećane vodljivosti. Ispod cijevi postavljeno je i zrcalo okrenuto prema punjenju kako se kamerom mogao precizno zabilježiti proces detonacije. Eksplozivna smjesa inicirana je odozgo.

PDV sonde, orijentirane okomito na stijenku cijevi, postavljene su na različitim pozicijama (Tablica 6-1).

Tablica 6-1: Prikaz pozicija sondi prilikom ekspanzijskog testa na bakrenim cilindrima Ø 50,8 mm i Ø 76,2 mm (Anderson et al., 2017)

RB sonde	Ø 50,8 mm Udaljenost *z*	Udaljenost *r*	Ø 76,2 mm Udaljenost *z*	Udaljenost *r*
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	94	144	151	151
2	94	144	151	165
3	196	144	304	144
4	196	144	304	146
5	296	144	456	166
6	296	144	456	163
7	387	131	608	162
8	502	131	761	146

Profili brzina odgovaraju parametrima i energijama za CYLEX test amonala (Tablica 6-2). E_{19} označava energiju cilindra, a tt_{19} Gurneyjevu energiju na skaliranim razmacima od 19 mm (Anderson et al., 2017).

Tablica 6-2: Rezultati CYLEX testa za amonal (Anderson etal., 2017)

Test	Gustoća amonala	Detonacijska brzina	v_∞	Akceleracija a_0	Kutna brzina ω	E_{19}	tt_{19}
Skala	(g/cm^3)	(mm/μs)	(mm/μs)	(mm/μs^2)	(–)	(kJ/g)	(kJ/g)
0.5*	1,023	2,644	804,03	260,23	0,1619	0,211	0,915
0.5*	1,023	2,644	843,28	268,97	0,1439	0,216	0,904
1*	1,023	3,068	947,17	375,00	0,1980	0,306	1,32
2*	1,044	3,673	1037,5	296,84	0,1431	0,384	1,63
2*	1,002	3,486	990,16	335,71	0,1695	0,349	1,54
2	0,968	3,516	1035,4	329,51	0,1591	0,379	1,72
3	0,953	3,824	1036,2	342,05	0,1651	0,401	1,85

Izmjereni profili brzine postavljeni su u uobičajeno odgovarajući oblik kako bi se olakšala analiza, a energija cilindra i Gurneyjeva energija izračunate su za ispitivanja cilindra 4 različita unutarnjeg promjera: 12,7 mm, 25,4 mm, 50,8 mm i 76,2 mm. Usporedba energija prikazana je kao funkcija promjera ispitnog cilindra te je pokazala da se specifična energija uvijek povećava kako se povećava skala testa.

Ispitivanje profila brzine stijenke cilindra pokazuje da se energija i dalje prenosi na stijenku cilindra u vremenima većim od 50 μs nakon prolaska detonacije. Rezultati sugeriraju da nakon detonacijske ekspanzije dolazi do značajnog oslobađanja topline. Kasno oslobađanje topline povećava se kako se mjerilo ispitivanja povećava, vjerojatno jer veći testovi

održavaju više temperature proizvoda tijekom širenja. Razlike u proizvodnji energije između ispitivanja 50,8 mm i 76,2 mm bile su manje od onih između ispitivanja od 12,7 mm i 25,4 mm, što ukazuje da određeno oslobađanje energije u funkciji promjera slijedi raspored smanjenja povrata. Ujedno, rezultati pokazuju da je proces detonacije amonala neidealan (Anderson et al., 2017).

6.2. Rezultati za emulzijske eksplozive

Provedena su ispitivanja ekspanzije cilindra četiri različita promjera u rasponu od 40 do 100 mm. Punjenje je činio generički emulzijski eksploziv E682, čiji je sastav naznačen u tablici 6-3. E682 testirao se zasebno i u smjesi sa 20% ANFO eksploziva. Svojstva dodanog anolita nalaze se u tablici 6-4, a nazvivni podaci dobivene eksplozivne smjese u tablica 6-5. Cilj ispitivanja bio je odrediti utjecaj promjera naboja na radnu sposobnost eksploziva izraženog putem Gurneyjeve energije. Mjereno je radijalno širenje, kao i brzina detonacije u ukupno jedanaest bakrenih cijevi.

Tablica 6-3: Sastav emulzijskog eksploziva E682 (Arvantidis et al., 2004)

Komponenta	**Sastojak**	**Maseni udio (%)**
Slana otopina	Voda	14,52
	Natrijev nitrat	10,88
	Amonijev nitrat (AN)	65,31
Emulgator	Lubrizol 2724	1,50
Uljna faza	Whiterex E 309	4,51
Stakleni mikrobaloni	3M K20[3)]	3,28

Tablica 6-4: Nazivni podaci za ANFO eksploziv (Anolit) (Arvantidis et al., 2004)

Eksploziv	Proizvođač	Nazivna gustoća (kg/m^3)	Energija eksplozije E_0 (MJ/kg)	Volumen plinova NTP (dm^3/kg)	Brzina det. Čelična cijev (m/s)
Anolit	Dyno Nobel	850	4,0	970	2200

Tablica 6-5: Nazivni podaci za čistu emulziju E682 i emulziju E682 s 20% ANFO (Anolita) (Arvantidis et al., 2004)

E682	Gustoća (kg/m^3)	Energija eksplozije (MJ/kg)	Volumen plinova (l/kg) NTP	Brzina det. (m/s)
Čista E682	1150	3,07	905	5475
20% Anolit	1200	3,21	918	5885

Bakrene cijevi su napunjene eksplozivom i inicirane odozgo. Sam proces punjenja odrađen je uz pomoć stvaranja vakuuma na jednom kraju cijevi i istodobnog uranjanja drugog kraja u emulziju. Gustoće punjenja su provjeravane kako bi se izbjegli zračni džepovi unutar cijevi. Iniciranje glavnog naboja u cijevi izvršeno je pomoću pojačnika. Istodobno je mjerena ekspanzija stijenke cijevi i brzina detonacije (Arvantidis et al., 2004).

Ionizacijske igle koje su korištene (CA 1041-C) spajane su na pulsnu kutiju koja šalje 7-voltni impuls svaki put kada se na kontaktnoj igli pojavi kratki spoj. Skup od 10 igli montiran je u PVC bloku na radijalnoj udaljenosti od 5.0 do 9.4 ± 0.05 mm između vrhova igli (Arvantidisetal., 2004).

U tablici 6-6 prikazani su osnovni podaci eksplozivnih punjenja za testne uzorke 139-150.

Tablica 6-6: Osnovni podaci naboja za ispitivanje u bakrenoj cijevi (Arvantidis et al., 2004)

Test	ANFO %	Promjer naboja (mm)	Gustoća naboja (kg/m^3)	M/C ($m_{Cu}/m_{expl.}$)	Brzina detonacije (m/s)
139	0	80	1148	1,63	5699
140	0	100	1130	1,66	-
141	0	60	1120	1,67	5609
142	0	80	1140	1,64	-
143	0	60	1137	1,65	5670
144	0	40	1120	1,67	5675
145	0	60	1130	1,66	5700
146	20	100	1203	1,56	5617
147	20	60	1195	1,57	5369
148	20	40	1200	1,56	5254
149	20	100	1207	1,55	5523
150	20	60	1195	1,57	-

U naredne dvije tablice prikazan je odnos vremena i ekspanzije stijenke cilindra. Za uzorke 139-150 analizirana je ekspanzija vanjske stijenke cilindra (Tablica 6-7, 6-8, 6-9)Uzorak 146 u prikazanoj tablici jedini čini smjesu E682 i 20 % ANFO. Grafički prikaz obrađenih rezultata iz spomenutih tablica prikazan je na slici 6-1 (uzorci bez primjese ANFO) te na slici 6-2 (uzorci s primjesom ANFO).

Tablica 6-7: Prikaz odnosa vremena i radijalne ekspanzije vanjske stijenke cijevi punjene emulzijom E682 (Arvantidis et al., 2004)

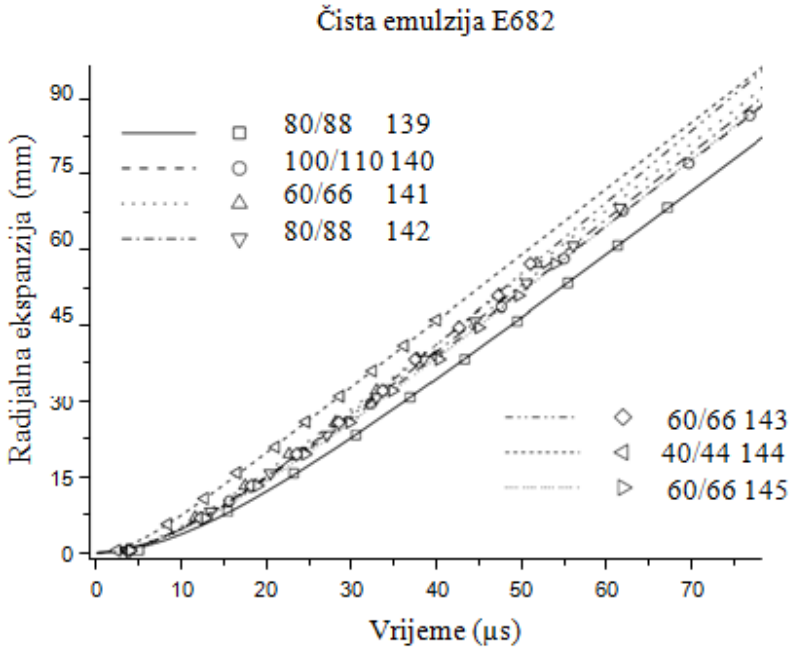
139∅80/88 VOD = 5699m/s (VOD= brzina detonacije)		140 ∅100/110 VOD = - (VOD= brzina detonacije)		141∅60/66 VOD =5609m/s(VOD= brzina detonacije)		142∅80/88 VOD = - (VOD= brzina detonacije)	
T (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)
-1,10	0,5	-1,16	0,5	-1,16	0,5	-1,85	0,5
9,38	7,9	10,7	9,9	6,80	6,7	8,04	7,9
17,2	15,3	19,4	19,3	12,7	12,9	15,1	15,3
24,5	22,7	27,4	28,7	17,8	19,1	21,8	22,7
30,8	30,1	35,0	38,1	23,3	25,3	27,6	30,1
37,1	37,5	42,6	47,5	28,2	31,5	33,1	37,5
43,3	44,9	50,0	56,9	32,9	37,7	39,1	44,9
49,3	52,3	56,9	66,3	37,7	43,9	45,1	52,3
55,1	59,7	64,7	75,7	42,4	50,1	50,6	59,7
61,0	67,1	71,9	85,1	46,9	56,3	56,1	67,1

Tablica 6-8: Prikaz odnosa vremena i radijalne ekspanzije unutarnje stijenke cijevi punjene emulzijom E682 (Arvantidis et al., 2004)

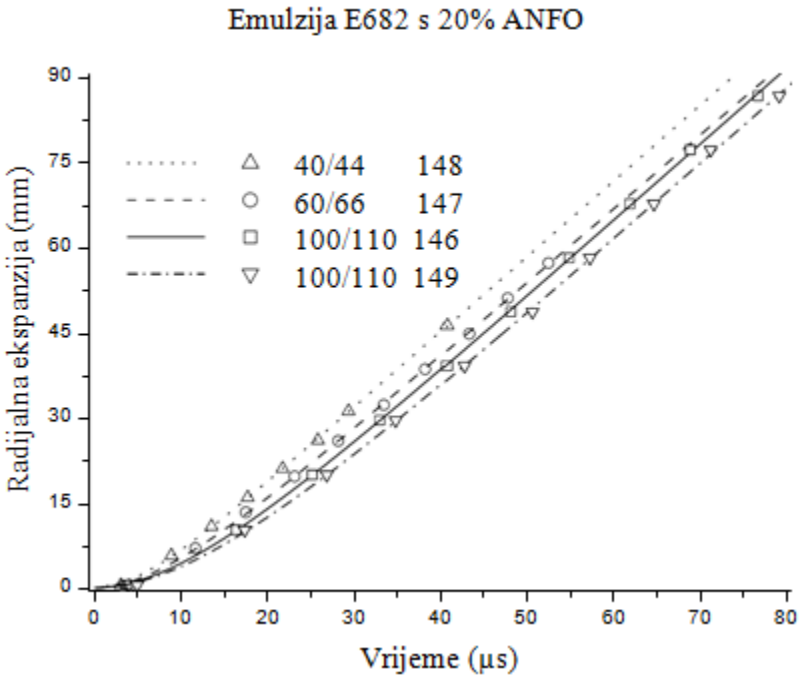
143 ∅60/66 0% ANFO VOD (VOD= brzina detonacije)= 5670 m/s		144 ∅40/44 0% ANFO VOD (VOD= brzina detonacije)= 5675 m/s		145 ∅60/66 0% ANFO VOD (VOD= brzina detonacije)= 5700 m/s		146 ∅100/110 20% ANFO VOD (VOD= brzina detonacije) = 5617 m/s	
t (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)
-1,82	0,45	-1,83	0,5	-1,82	0,45	-1,85	0,45
6,49	6,65	4,17	5,5	7,02	6,65	10,9	9,85
12,5	12,85	8,52	10,5	13,1	12,85	19,7	19,25
17,8	19,05	12,3	15,5	18,8	19,05	27,5	28,65
22,8	25,25	16,9	20,5	24,0	25,25	35,3	38,05
27,9	31,45	20,5	25,5	29,0	31,45	42,6	47,45
(31,7)	37,65	24,5	30,5	34,4	37,65	49,3	56,85
36,8	43,85	28,3	35,5	39,1	43,85	56,3	66,25
41,4	50,05	32,0	40,5	43,8	50,05	63,3	75,65
(45,2)	56,25	35,7	45,5	48,0	56,25	71,2	85,05

Tablica 6-9: Prikaz odnosa vremena i radijalne ekspanzije unutarnje stijenke cijevi punjene emulzijom E682 (Arvantidis et al., 2004)

147 ∅60/66 VOD (VOD= brzina detonacije)= 5369 m/s		148 ∅40/44 VOD (VOD= brzina detonacije)= 5254 m/s		149 ∅100/110 VOD (VOD= brzina detonacije)= 5523 m/s		150 ∅60/66 VOD (VOD= brzina detonacije) = -	
t (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)	t (μs)	Δr_y (mm)
-1,82	0,5	-1,83	0,5	-0,99	0,45	-0,95	0,5
6,49	6,7	4,02	5,5	12,4	9,85	6,61	6,7
12,5	12,9	8,66	10,5	21,9	19,25	12,7	12,9
17,8	19,1	12,9	15,5	29,9	28,65	(13,5)	19,1
22,8	25,3	16,9	20,5	37,8	38,05	-	25,3
27,9	31,5	21,0	25,5	45,6	47,45	27,1	31,5
31,7	37,7	24,5	30,5	52,3	56,85	31,5	37,7
36,8	43,9	-	35,5	59,7	66,25	-	43,9
41,4	50,1	-	40,5	66,2	75,65	41,7	50,1
45,2	56,3	35,9	45,5	74,2	85,05	46,9	56,3

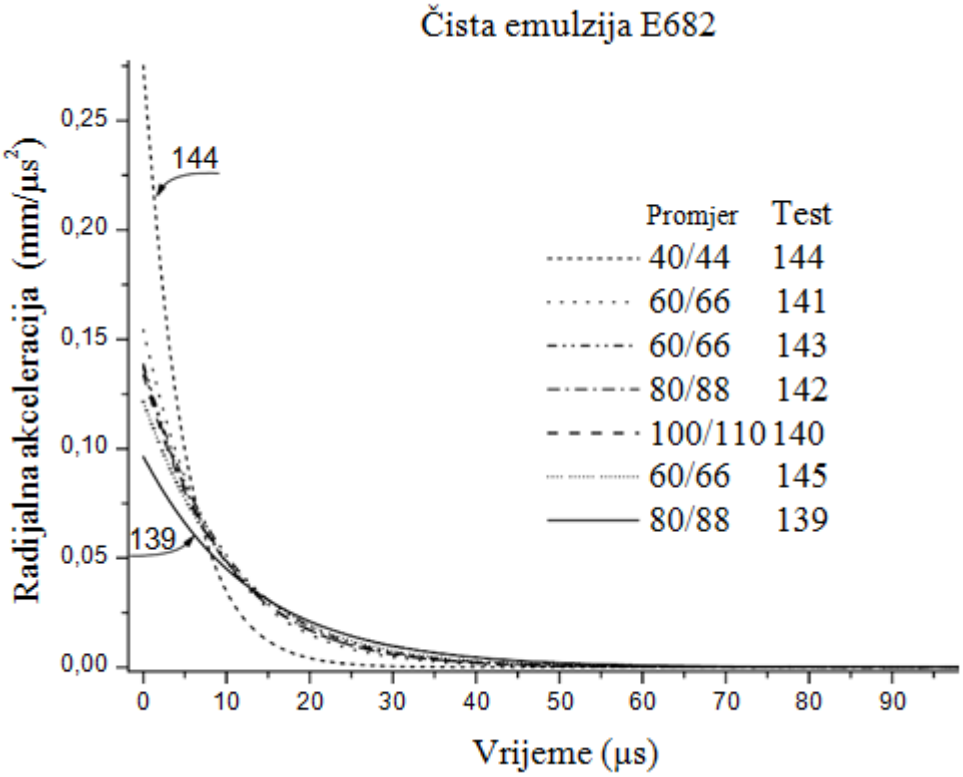


Slika 6-1: Grafički prikaz dobivenih rezultata ispitivanja (x-t graf) emulzijom E682 (Arvantidis et al., 2004)

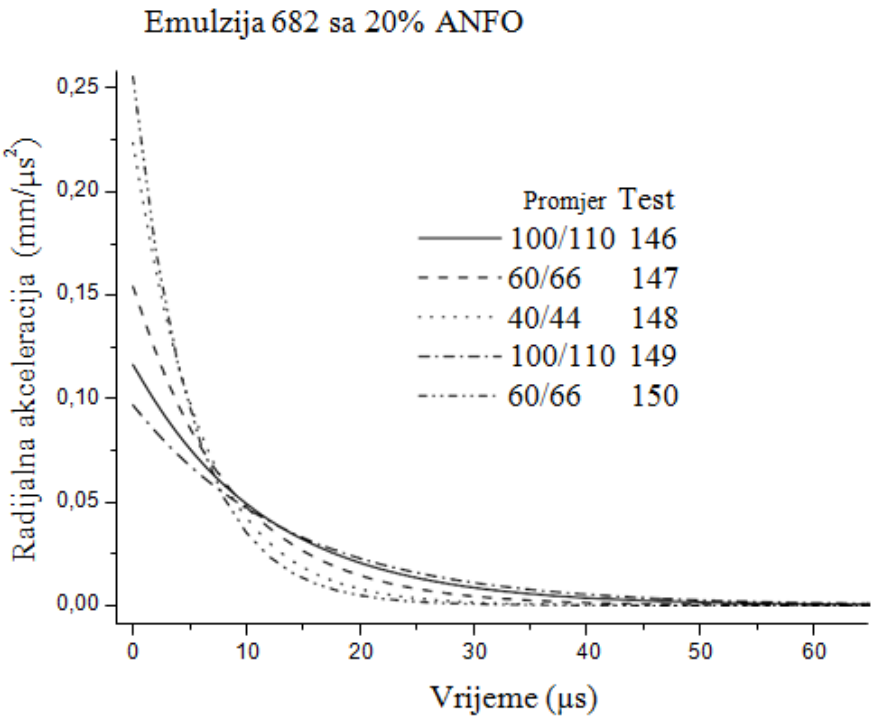


Slika 6-2: Grafički prikaz dobivenih rezultata ispitivanja (x-t graf) emulzijom E682 s 20 % ANFO (Arvantidis et al., 2004)

Iz podataka na slikama 6-1 i 6-2 koji su se odnosili na ekspanzijske pomake, izračunate su i radijalne akceleracije stijenki te prikazane na ekvivalentan način: Slika 6-3 (čista emulzija) te slika 6-4 (emulzija s 20% ANFO).

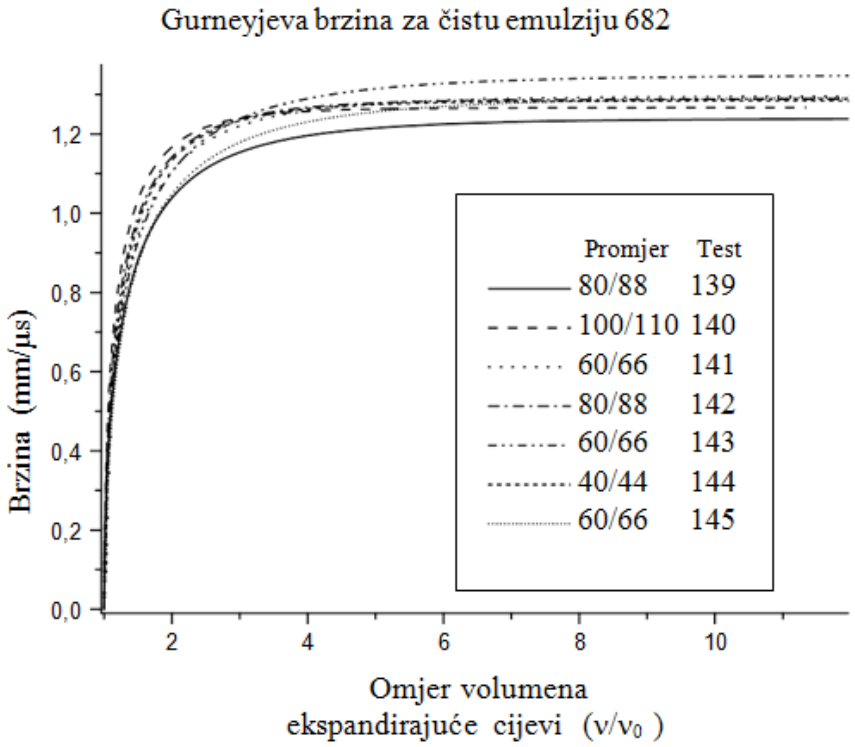


Slika 6-3: Grafički prikaz rezultata ispitivanja (a-t graf) za čistu emulziju E682 (Arvantidis et al., 2004)

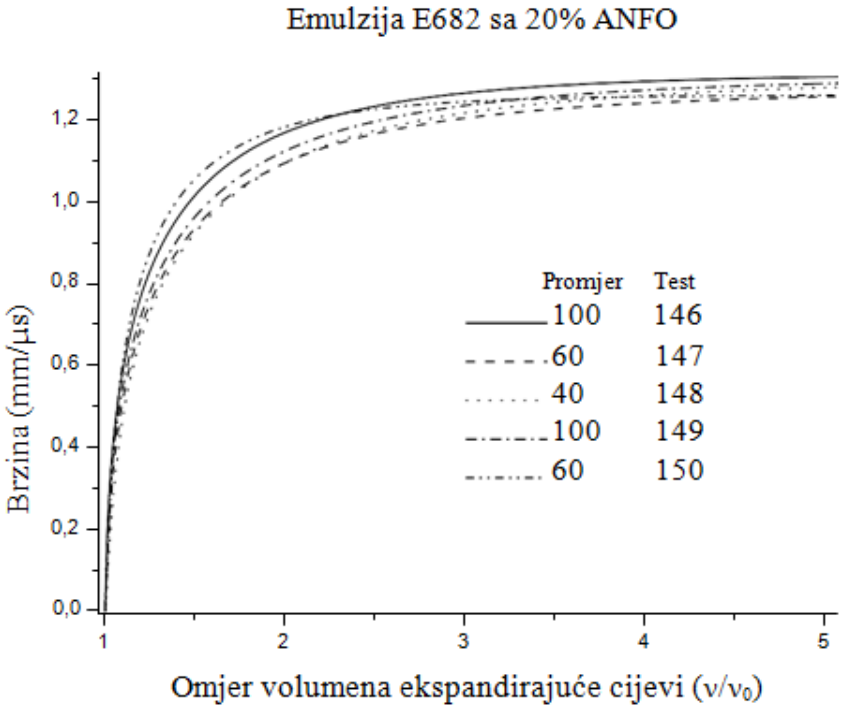


Slika 6-4: Grafički prikaz rezultata ispitivanja (a-t graf) za emulziju E682 s 20 % ANFO (Arvantidis et al., 2004)

Daljnjim proračunom prema jednadžbama za Gurneyjevu brzinu i energiju, koje su opisane u poglavlju 5., dobiveni su grafički podaci na slikama 6-5 (za čistu emulziju) i 6-6 (emulzija s 20% ANFO).



Slika 6-5: Grafički Gurneyjeve brzine za čistu emulziju E682 (Arvantidis et al., 2004)



Slika 6-6: Grafički Gurneyjeve brzine za emulziju E682 s 20 % ANFO (Arvantidis et al., 2004)

U tablici 6-10 prikazani su i iznosi Gurneyjeve energije za svih jedanaest testnih uzoraka (139-150) pri navedenim ekspanzijskim omjerima.

Tablica 6-10: Gurneyjeva energija za ekspanzijske omjere v/v_0 5 i 10 (Arvantidis et al., 2004)

Test	ANFO (%)	Promjer naboja (mm)	% E_G pri v/v_0 = 5	% E_G pri v/v_0 =10	E_G (MJ/kg)
139	0	80	95,2	98,8	1,65
145	0	60	95,5	98,9	1,81
143	0	60	95,9	99,0	(1,96)
148	20	40	96,6	100,0	1,74
141	0	60	96,7	99,4	1,83
149	20	100	97,1	99,4	1,75
147	20	60	97,6	100,0	1,67
142	0	80	98,3	100,0	1,78
144	0	40	98,9	100,0	1,79
146	20	100	98,9	100,0	1,77
140	0	100	99,4	100,0	1,73
150	20	60	100,0	100,0	1,64

Kao krajnji rezultat ispitivanja koji je prikazan tablično (6-11) je odnos Gurneyjeve energije i same energije eksplozije.

Tablica 6-11: Iznosi Gurneyjeve energije, energije eksplozije i njihovog međusobnog omjera (Arvantidis et al., 2004)

Test	ANFO (%) (Anolit)	Promjernaboja (mm)	E_G (MJ/kg)	E_G/E_0	E_G (MJ/dm^3)
139	0	80	1,65	0,54	1,89
140	0	100	1,73	0,56	1,95
141	0	60	1,83	0,60	2,05
142	0	80	1,78	0,58	2,03
143	0	60	(1,96)	(0,64)	(2,23)
144	0	40	1,79	0,58	2,00
145	0	60	1,81	0,59	2,05
146	20	100	1,77	0,55	2,13
147	20	60	1,67	0,52	2,00
148	20	40	1,74	0,54	2,09
149	20	100	1,75	0,55	2,11
150	20	60	1,64	0,51	1,96

Iz dobivenih podataka ispitivanja vidljivo je kako se brzina detonacije za E682 s 20% ANFO smanjuje se s 5620 na 5250 m/s, odnosno, za 7% kada se promjer naboja smanji sa 100 na 40 mm. Brzina detonacije za čisti E682 smanjuje se za manje od 2% za istu promjenu veličine naboja (Arvantidis et al., 2004).

Gurneyova brzina ili stvarna konačna brzina bakrenog zida ne pokazuje nikakvo drastično odstupanje s promjenom promjera naboja. Gurneyjeva brzina bakrenog zida iznosi oko 1285 m/s, kako za čisti E682 (0% ANFO), tako i za E682 s 20% ANFO. Standardno odstupanje za 11 ispitivanja je manje od 25 m/s, a raspon 1240-1315 m/s (Arvantidis et al., 2004).

Ubrzanje je veće za tanje cijevi zbog umjerenog pada detonacijskog tlaka uzrokovanog padom brzine detonacije. Raspon vrijednosti je oko 0,1-0,3 mm/μs^2(Arvantidis et al., 2004).

Prema rezultatima, izgledno je kako na Gurneyevu energiju i uporabu energije eksplozije ne utječe promjer naboja u ispitivanom rasponu, 40-100 mm. Vrijednost je 1,74 MJ/kg sa standardnim odstupanjem od oko 0,06 MJ/kg za 11 ispitivanja. Raspon izmjerenih vrijednosti je 1,65-1,83 MJ/kg.

Gurneyeva energija za čisti E682 nešto je viša nego za E682 s 20% ANFO, 1,77 MJ/kg u odnosu na 1,71 MJ/kg. Unutar granica provedenog eksperimenata vidljivo je da se Gurneyjeva energija ne mijenja značajno kada se ANFO doda u emulziju E682.

Omjer iskorištenja energije je vrlo blizak za obje varijante: 0,58 ± 0,03 za čisti E682 i 0,53 ± 0,03 za E682 s 20% ANFO (Arvantidis et al., 2004).

6.3. Osvrt na rezultate laboratorijskih ispitivanja

Prethodno opisana laboratorijska ispitivanja, koja ujedinjuju koncept Gurneyjeve energije i CYLEX testa, potvrđuju kako je na ovaj način moguće vrlo jednostavno uspoređivati svojstva brojnih postojećih eksploziva. Osim takve primjene, istraživanje s emulzijskim eksplozivima pokazuje da je korištenje ovakvog slijeda ispitivanja i proračuna, otvara mogućnosti razvoja i optimizacije brojnih eksplozivnih smjesa.

7. ZAKLJUČAK

Energija oslobođena detonacijom eksploziva može se koristiti za obavljanje mehaničkoga rada, a to djelovanje nastoji se što bolje okarakterizirati raznim veličinama i terminima. Uz brojne metode kojima se djelovanje eksploziva opisuje, definiraju se i razne veličine kao što su radna sposobnost, brizantnost, snaga i energija eksploziva. Svaka od metoda i njoj pripadajućih termina pronalazi svoju primjenu u opisivanju djelovanja eksploziva za različite namjene.

U ovome radu naglasak je na metodi određivanja učinka djelovanja eksplozije putem ekspanzije bakrene cijevi (cilindra). Radi se o jednom od najpopularnijih postupaka karakterizacije adijabatske ekspanzije detonacijskih produkata putem mjerenja pomaka i brzine ekspandirajućeg bakrenog cilindra. Spomenuta metoda najčešće je primjenjivana metoda u ispitivanjima novih vrsta eksploziva. Njene prednosti su brojne, a ističe se jednostavnost izvedbe i relevantnost dobivenih podataka. U usporedbi s ostalim metodama, ekspanzijski test daje najpotpunije informacije u vidu transfera energije s eksplozivnog naboja na susjedni medij (ili okolinu).

Izlazna vrijednost cilindar testa je funkcijska vrijednost odnosa vremena i brzine detonacije. Pomoću ta dva podatka jednostavno se može doći do iznosa Gurneyjeve energije, odnosno, količine energije koja je iz kemijske energije eksploziva u početnom stanju pretvorena u kinetičku energiju u konačnom stanju. Mogućnost izračuna Gurneyjeve energije putem ekspanzijskog cilindar testa metodi daje veliki značaj i široku primjenu, osobito u razmatranju gospodarskih eksploziva.

Brojna laboratorijska istraživanja dokazuju kako je provođenjem metode ekspanzije metalne cijevi i korištenjem koncepta Gurneyjeve energije moguće vrlo pouzdano uspoređivati djelovanja raznih gospodarskih eksploziva.

8. LITERATURA

1. Altgilbers, L., Baird, J., Freeman, B., Lynch, C., Shkuratov, S. (2011): *Explosive Pulsed Power.* British Library Cataloguing-in-Publication Data. Imperial College Press.
2. Anderson, E. K.,Short, M., Jackson, S.I. (2017): *Cylinder test wall velocity profiles and product energy for anammonium nitrate and aluminum explosive.* AIP Conference Proceedings 1793, 030018 (2017); https://doi.org/10.1063/1.4971476
3. Arvantidis, I., Nyberg, U., Ouchterlony, F. (2004): *The diameter effect on detonation properties of cylinder test experiments with emulsion E682.*SveBeFo Report 66. Stockholm. ISSN1104-1773
4. Balchandra, V.G. (2011). *Rotary drilling and blasting in large surface mines.* London: CRC Press.
5. Bohanek, V. (2013): *Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnoga procesa linearnih eksplozivnih naboja.* Doktorska disertacija. RGN fakultet. Sveučilište u Zagrebu.
6. Brown, G. (2014): *High Explosive Science & Technology at Los Alamos National Laboratory*. NavalAcademy. LA-UR-14-27728
7. Castedo, R., Natale, M., Lopez, L.M., Sanchidrian, J.A. , Santos, A.P. , Navarro, J., Segarra P. (2018): *Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 112 (2018) 290–301
8. Cooper, P.W. (1996): *Basics of Explosives Engineering*. VCH, New York. Google Scholar.
9. Ester, Z. (2005): *Miniranje I.: eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja.*Udžbenik. Zagreb: Rudarsko–geološko–naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
10. Hansson, H. (2009): *Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and numerical simulation.* Swebrec. Luleá University of Technology. ISSN 1653-5006.
11. Harrier, D. (2016): *Cylinder expansion test and gas gun experiment comparison.*Summer Internship Presentation - Hydro Working Group. LA-UR-16-24737

12. Künzel, M., Kucera, J., Pachman, J.(2013): *On the development of cylinder expansion test fixture*. OZM Research s.r.o., Hrochův Týnec, Czech Republic & Institute of Energetic Materials, Faculty of Chemical Technology, University of Pardubice, Czech Republic
13. Mahadevan, G.E. (2012) *Amonium Nitrate Explosives For Civil Applications*. Weinheim: Wiley-VHC.
14. OZM Research (2014): *Balističko njihalo.* URL: http://www.ozm.cz/en/explosives-performance-tests/ballistic-mortar/ (28.8.2014.)
15. Sanchidrián, J.A., Castedo, R., López, L.M., Segarra, P., Santos, A.P. (2015): *Determination of the JWL Constants for ANFO and Emulsion Explosives from Cylinder Test Data*. Universidad Politécnica de Madrid.Central European Journal of Energetic Materials, 12(2)177-194
16. Souers, P.C.& Vitello, P.A. (2015): *Detonation Energy Densities from the Cylinder Test*. Lawrence Livermore National Laboratory. LLNL-TR-666420
17. Sućeska, M. (1995): *Test methods for explosives*, New York: Springer – Verlag.
18. Škrlec, V. (2015): Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja. Doktorska disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.
19. Walters, W.P. & Zukas, J. A. (1989): *Fundamentals of shaped charges.* John Wiley&Sons, New York 1989, ISBN 0-471-62172-2