

BRZINA DETONACIJE EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE

VELOCITY OF DETONATION OF LOW DENSITY EMULSION EXPLOSIVES

¹⁾VINKO ŠKRLEC, ²⁾VJEČISLAV BOHANEK, ³⁾ZVONIMIR DEKOVIĆ

¹⁾²⁾ Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska
³⁾Autocesta Zagreb – Macelj d.o.o., Velika Ves bb, 49224 Lepajci, Hrvatska

Ključne riječi: eksplozivi smanjene gustoće, emulzijski eksplozivi, gustoća eksploziva, brzina detonacije

Key words title: low density explosives, emulsion explosives, density of explosives, velocity of detonation

Sažetak

Izvođenje miniranja u izgrađenim područjima na malim udaljenostima od objekata postavlja nove zahtjeve za tehnologiju miniranja te svojstva gospodarskih eksploziva, sa svrhom smanjenja seizmičkog utjecaja miniranja. Gospodarski eksplozivi su smjese različitoga kemijskog sastava eksplozivnih i/ili neeksplozivnih tvari. Kemijska i fizikalna obilježja, uz načine iniciranja, okolinu i uvjete primjene, određuju detonacijska i minerska svojstva pojedine vrste gospodarskih eksploziva. Brzina detonacije je jedno od najvažnijih mjerljivih detonacijskih svojstava, koje posredno daje informaciju o oslobođenoj energiji, kvaliteti i primjenjivosti eksploziva za određene namjene. O brzini detonacije ovisi i udio udarnoga djelovanja detoniranoga naboja na stijenu, a time i razina seizmičkoga djelovanja u okolini. Budući da je brzina detonacije proporcionalna gustoći eksploziva, opisana istraživanja provedena su sa svrhom određivanja granične gustoće smjese emulzijskog eksploziva i ekspanziranoga polistirena uz postizanje stabilne detonacije te određivanja zavisnosti brzine detonacije od gustoće smjese.

Abstract

Blasting operations in built-up areas, at short distances from structures, impose new requirements on blasting techniques and properties of explosives in order to mitigate seismic effect of blasting. Explosives for civil uses are mixtures of different chemical composition of explosive and/or non-explosive substances. Chemical and physical properties, along with means of initiation, environment and the terms of application define detonation and blasting parameters of a particular type of the explosive for civil uses. Velocity of detonation is one of the most important measurable characteristics of detonation parameters which indirectly provide information about the liberated energy, quality of explosives and applicability for certain purposes. The level of shock effect of detonated charge on the rock, and therefore the level of seismic effect in the area, depends on the velocity of detonation. Since the velocity of detonation is proportional to the density of an explosive, the described research is carried out in order to determine the borderline density of the mixture of an emulsion explosive with expanded polystyrene while achieving stable detonation, and to determine the dependency between the velocity of detonation and the density of mixture.

1. Uvod

Civilna je primjena eksploziva, odnosno eksplozivnih tvari, mnogostruka. Koriste se za miniranja u rudarstvu i građevinarstvu, eksploataciji nafte i plina, geološkim istražnim radovima, strojarstvu i brodogradnji, svemirskoj tehnologiji, automobilskoj industriji, poljoprivredi, medicini, u razminiranju, filmskoj umjetnosti i vatrometima.

Rudarski (gospodarski, civilni, privredni) eksplozivi su energetski materijali koji eksplozivnom pretvorbom mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju udarnih valova i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije. Djelovanjem udarnih valova i ekspanzijom plinova one se u obliku mehaničkoga rada troše na drobljenje, pomicanje i odlamanje stjenske mase.

Prilikom detonacije eksplozivnih punjenja minskih bušotina dio energije koji nije utrošen za korisni rad drobljenja stijene djeluje na okolinu u obliku seizmičkoga utjecaja, odnosno potresnog djelovanja, zračnog udarnog vala i odbacivanja odminiranoga materijala.

Širenjem urbanih područja i izgradnjom prometne infrastrukture dolazi do sve veće potrebe za opreznim miniranjima, odnosno miniranjima koja svojim djelovanjem s jedne strane, moraju razlomiti stijenu, a s druge strane, što manje oštetiti stjensku masu u kojoj se izvodi miniranje, u svrhu očuvanja fizičko-mehaničkih svojstava te iste stjenske mase i proizvesti što manje štetnih utjecaja na okoliš.

U tu se svrhu nastoji proizvesti eksploziv koji bi imao takva detonacijska svojstva tj. minersko-tehnička obilježja koja bi omogućila primjenu na opreznim miniranjima.

Tražena svojstva nalaze se u eksplozivima smanjene gustoće. Osnovno načelo njihovog djelovanja proizlazi iz ovisnosti tlaka detonacije o produktu gustoće i brzine detonacije iskazane u postavkama hidrodinamičke, Chapman Jouget-ove teorije detonacije. S druge strane, smanjenjem gustoće eksploziva smanjuje se specifična masa punjenja iskazana po jedinici volumena minirane stijene. Na taj način smanjena je i količina oslobođene energije koja djeluje na jedinični volumen stijene čime su manja i izazvana naprezanja.

Smanjenje gustoće eksploziva postiže se dodavanjem materijala eksplozivima koji imaju značajno manju gustoću od eksploziva samih. Materijali koji se dodaju eksplozivima mogu se svrstati u dvije grupe: inertni materijali (perliti, vermakuliti, staklene mikrokuglice i sl.) i materijali koji imaju mogućnost sagorijevanja, odnosno mogućnost sudjelovanja u kemijskoj reakciji oksidacije (polistiren, ekspanzirani polistiren, poliuretanska pjena, ugljena prašina, drvena piljevina, otpaci proizvodnje šecera, ljske kikirikija, žitarice i sl.).

Količina oslobođene energije pri miniranju ovisi o masi i vrsti korištenog eksploziva. Detonacijom eksplozivnog punjenja dio ukupne energije utroši se na korisni mehanički rad. Raspoloživa kemijska energija eksplozivnog punjenja troši se na izmjenu topline s okolinom i obavljanje rada nad okolinom prema postavkama prvog glavnog zakona termodinamike.

Energija koja se oslobađa prilikom detonacije eksploziva pojavljuje se u dva osnovna oblika. Kao posljedica visokog tlaka na detonacijskoj fronti javlja se udarna energija. Ona primarno lomi stijenu pri miniranju budući da su tlakovi u fronti udarnog vala mnogostruko veći od dinamičke čvrstoće okolne stijene.

Tlak detonacije, koji je idealno tlak izreagiranih produkata detonacije, može se približno izraziti se prema obrascu 1:

$$p_d = \frac{\rho \cdot v_d^2}{4} \quad (1)$$

gdje je:

p_d - tlak detonacije (Pa),

ρ - gustoća eksploziva (kg/m^3),

v_d - brzina detonacije (m/s).

Za potpuno napunjene minske bušotine pokazalo se da je tlak koji djeluje na stjenku bušotine polovica detonacijskog tlaka odnosno (Persson et al. 1994):

$$p_b = \frac{\rho \cdot v_d^2}{8} \quad (2)$$

gdje je:

p_b - tlak koji djeluje na stjenku bušotine (Pa).

Iz obrasca 2 vidljivo je da tlak koji djeluje na stjenku bušotine te izazvana naprezanja u stijeni ovise i o brzini detonacije eksploziva i njegovoj gustoći.

Ovisnost brzine detonacije o gustoći može se izraziti eksperimentalno dokazanom vezom prema obrascu 3 (Silva, 2007).

$$v_d = x + y \cdot \rho \quad (3)$$

gdje su:

x, y - eksperimentalno određene konstante za eksplozivnu tvar.

Kako se udarni val udaljava od središta eksplozije, tako se njegova amplituda tlaka i energija smanjuju, a udarni val prelazi u elastični val. Drugi oblik energije je energija ekspanzije plinova detonacije koji uzrokuju naprezanja u stijeni frakturiranoj djelovanjem udarnog vala. Daljnja ekspanzija omogućuje pokretanje i neželjeno odbacivanje miniranoga materijala. Ekspanzija traje do izjednačavanja tlaka s tlakom okolnog zraka.

Smanjenje gustoće i brzine detonacije te udjela udarnog djelovanja izvodi se smjesama sastava baziranog na postojećim gospodarskim eksplozivima uz dodatak polistirena i ekspanziranog polistirena.

Između postojećih gospodarskih eksploziva za sniženje gustoće odabran je emulzijski eksploziv. Emulzijski eksplozivi, uz ANFO-eksplozive, imaju mogućnost velikoga sniženja gustoće i, za razliku od ANFO-eksploziva, vodootporni pa su zato pogodni za miniranja u uvjetima kad je voda prisutna u bušotinama.

Emulzijski eksplozivi su koloidne smjese nitrata otopljenih u vodi, disperziranih u uljnoj fazi. Senzibiliziraju se mjehurićima zraka u obliku staklenih mikrokuglica, granuliranog amonijevog nitrata ili glinenih kuglica – perlita. U sastavu nemaju samostalno eksplozivnih sastojaka. Emulzijski eksplozivi su vodootporni, djelomično osjetljivi na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8.

Općenito, emulzijski eksplozivi su tip emulzije vode u ulju. Emulzijski eksplozivi su mješavina dviju otopina. Uljna faza je kontinuirana, a vodena je faza (otopina anorganskih soli) dispergirana. Da bi se osigurala stabilnost, dodaje se emulgator u količini od 1% do 3% (Ester, 2005).

U radu je prikazan način smanjenja gustoće emulzijskih eksploziva ekspanziranim polistirenom te je dan pregled mjerenja brzine detonacije i prikazana je ovisnost brzine detonacije o gustoći eksploziva smanjene gustoće.

2. Pregled dosadašnjih istraživanja eksploziva smanjene gustoće i mogućnosti primjene

Prva istraživanja na razvoju eksploziva smanjene gustoće počela su 70-ih godina 20-og stoljeća u Rusiji. Ta su se rana istraživanja temeljila na smanjenju gustoće ANFO-eksploziva dodavanjem raznih materijala manje gustoće. Smatralo se je da je ANFO-eksploziv, s obzirom da ima najmanju gustoću, idealan za pripremu eksploziva smanjene gustoće. Istraživanja su usmjerena na razvoj ek-

sploziva koji bi se mogao jednostavno pripremiti na mjestu upotrebe i koji bi bio komercijalno isplativ (Rock et al., 2005, Baranov et al., 1996).

Heltzen & Kure (1980) dodavali su ekspanzirani polistiren ANFO-eksploziv u različitim volumnim omjerima. Dokazao je mogućnost detonacije smjese ANFO/ekspanzirani polistiren (EPS) u volumnom omjeru 5:95%, gustoće 0,18 g/cm³, pri čemu je izmjerena brzina detonacije od 1600 m/s. Ispitivanja su provedena u čeličnim cijevima promjera Ø 35 mm, a eksploziv je iniciran detonatorom. Rezultat njegovih istraživanja je novi eksploziv komercijalnog imena Isanol. Isanol je smjesa ANFO-eksploziva i granula EPS-a u volumnom omjeru 10:90 sa stabilnom brzinom detonacije oko 1750 m/s.

Armstrong & Moxon (1991) miješali su tri vrste matrice emulzijskoga eksploziva s neekspanziranim polistirenom ili s perlitom. Mješavine matrice i polistirena gustoće 0,80 g/cm³ postizale su brzine detonacije od 3300 m/s do 3900 m/s, a mješavine matrice i perlita gustoće od 0,80 g/cm³ postizale su brzine detonacije od 3000 m/s do 3300 m/s za uzorke promjera Ø 100 mm.

Jackson (1993) je miješao granule amonij-nitrata i kuglice EPS-a s vodenim gelovima (vodena otopina nitrata senzibilizirana nitroderivatima) u različitim volumnim omjerima i na taj način smanjio gustoću eksploziva s početnih 1,35 g/cm³ na gustoće od 0,4 g/cm³ do 0,7 g/cm³. Mjerenja brzine detonacije provedena su u PVC-cijevima promjera Ø 100 mm i Ø 200 mm. Izmjerene brzine detonacije kretale su se od 2400 m/s do 3000 m/s. Takav eksploziv smanjene gustoće nazvao je *vodeni gel male snage* (engl. *Low Strength Watter Gel Explosive*).

Beach et al. (2004) ispitivali su mješavine ANFO-eksploziva s ljuskama pšenice gustoće 0,56 g/cm³ mjerenjem brzine detonacije u bušotinama u stijeni sa sljedećim rezultatima:

- 2700 m/s - 3200 m/s za promjer bušotine Ø 200 mm,
- 2800 m/s - 3400 m/s za promjer bušotine Ø 311 mm.

Rock (2004) je proizveo i patentirao eksploziv smanjene gustoće, koji je nazvao SoftLOAD. U različitim volumnim omjerima je smiješao *Heavy*-ANFO s ljuskama riže, te je dobio eksploziv s rasponom gustoća od 0,45 g/cm³ do 1,25 g/cm³. Eksploziv za tržište proizvodi „LD Corporation“.

Silva (2007) je kao sredstvo za smanjenje gustoće eksploziva koristio kuglice EPS-a koje su obložene tankim slojem amonij-nitrata te ih je nazvao LDRA (engl. *Low Density Reactive Agent*) i pod tim ih nazivom patentirao. Njih je miješao s ANFO-eksplozivom u različitim omjerima i takav eksploziv je koristio za smanjenje oštećenja konturne površine nakon otpucavanja eksplozivnoga punjenja konturnih bušotina. Mješavina je primijenjena u rudniku Chuquicamata prilikom konturnih miniranja te se je, mjereći brzinu seizmičkih valova i pregledavajući završnu kosinu nakon miniranja, došlo do zaključka da

dolazi do manjega oštećenja u podnožju kosine u odnosu na konturna miniranja konvencionalnim gospodarskim eksplozivima. Mjerio je brzinu detonacije LDRA, smjese LDRA i ANFO-eksploziva u volumnim omjerima 50:50% i 70:30%, smjese LDRA i perlita u volumnim omjerima 50:50% i 60:40%. Za promjer bušotine Ø 311 mm dobio je rezultate koji su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati mjerenja (Silva, 2007)

Table 1. Measurement results (Silva 2007)

Vrsta eksplozivne tvari/Type of Explosive Materials	Brzina detonacije/ Velocity of Detonation, v_1 (m/s)	Gustoća/ Density, ρ (g/cm ³)
LDRA	2400	0,20
LDRA:ANFO 50:50	3500	0,49
LDRA:ANFO 70:30	3200	0,37
LDRA:perlit 50:50	1580	0,13
LDRA:perlit 40:60	1215	0,11

3. Mjerenja brzine detonacije emulzijskih eksploziva smanjene gustoće

Zahtjevi norme HRN EN 13631-14:2004: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi.14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)* primijenjeni su kao osnova za mjerenje brzine detonacije.

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, akreditiranom prema normi HRN EN ISO/IEC 17025:2007.

3.1. Lambrex 1

Lambrex 1 je emulzijski eksploziv proizvođača Austin Powder GmbH iz Republike Austrije. Pakira se u patronama promjera Ø 35 mm, Ø 55 mm i Ø 65 mm. Osjetljiv je na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8. Minersko-tehnički podaci prema specifikaciji proizvođača prikazani su u tablici 2.

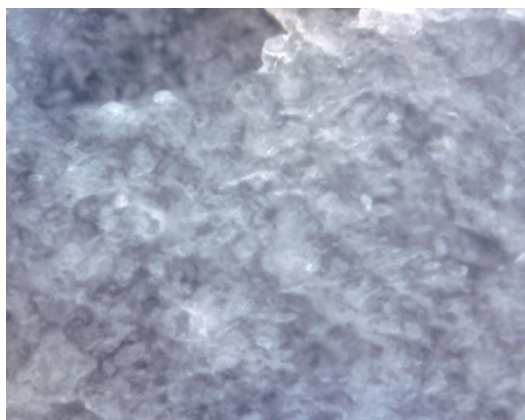
Tablica 2. Minersko-tehnički podaci za Lambrex 1 prema specifikaciji proizvođača

Table 2. Technical specifications according to manufacturer for Lambrex 1

Lambrex 1	
gustoća patroniranja	1,2 g/cm ³
bilanca kisika	+2,3 % O ₂
specifična energija	765 kJ/kg
brzina detonacije (Ø 65 mm)	5500 m/s
volumen plinova	910 L/kg

Gustoća Lambrexa 1 je određena eksperimentalno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)* i iznosi $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Struktura emulzijskoga eksploziva Lambrex 1, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 500 puta, prikazana je na slici 1.



Slika 1. Struktura Lambrexa 1 (500×)
Figure 1. Structure of Lambrex 1 (500×)

3.2. Ekspandirani polistiren (EPS)

Za smanjenje gustoće emulzijskih eksploziva korišten je ekspandirani polistiren (EPS) u granulama i mehanički usitnjen, koji je proizvelo tehnologijom suspenzijske polimerizacije poduzeće DIOKI.

Veličina zrnaca EPS-a u granulama je 1,5 mm do 3,5 mm, a gustoća mu je $0,019 \text{ g/m}^3$.

EPS je mehanički usitnjen mlinom za rezanje RETSCH SM200 te je prosijan na sitima od 0,5 mm, 0,25 mm, 0,18 mm i 0,1 mm, a gustoća EPS-a je eksperimentalno određena na isti način kao i gustoća eksploziva.

Gustoće za pojedinu veličinu zrnaca su prikazane u tablici tablici 3.

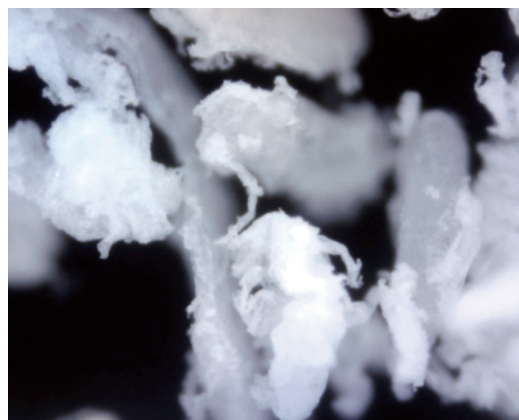
Zrnca granuliranog EPS-a, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 50 puta, prikazana su na slici slici 2, a zrnca mehanički usitjenog EPS-a veličine od 0,25 mm do 0,18 mm, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 500 puta, prikazana su na slici slici 3.

Tablica 3. Gustoća EPS-a
Table 3. Density of EPS

Veličina zrnaca (mm)	Gustoća EPS-a (g/cm^3)
+0,5	0,103
0,5-0,25	0,109
0,25-0,18	0,110
0,18-0,1	0,120
-0,1	0,151



Slika 2. Zrnca granuliranog EPS-a (1,5 mm - 3,5 mm, 50×)
Figure 2. Grains of granulated EPS-a (1,5 mm - 3,5 mm, 50×)



Slika 3. Zrnca granuliranog EPS-a (0,25 mm - 0,18 mm, 500×)
Figure 3. Grains of mechanically chopped EPS-a (0,25 mm - 0,18 mm, 500×)

3.3. Postav mjerenja

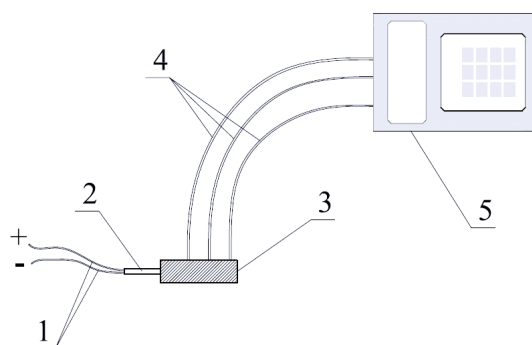
Brzina detonacije eksplozivnoga punjenja izrađenih mješavina mjerena je elektrooptičkom metodom elektroničkim satom Explomet-Fo-2000. Uređaj ima mogućnost mjerenja brzine detonacije na pet segmenata. Metodom se mjeri vrijeme između dvije točke koje je potrebno fronti detonacijskoga vala da prijeđe udaljenost između njih. Na osnovi izmjerenoga vremena i poznate udaljenosti izračunava se brzina. Točnost mjerenja vremena iznosi $\pm 0,1 \mu\text{s}$ na ukupno trajanje do 10 000 μs .

Eksplozivno punjenje je bilo postavljeno u čelične cijevi unutarnjeg promjera $\varnothing 16 \text{ mm}$ i $\varnothing 20 \text{ mm}$ i duljine 100 mm. Brzina detonacije mjerena je na 2 segmenta s po 3 osjetila koja su bila na jednakim udaljenostima od 30 mm. Shematski prikaz postava mjerenja prikazan je na slici 4, a fotografija na slici 5.

Izmjerena je brzina detonacije na 10 uzoraka eksploziva u čeličnim cijevima unutarnjega promjera $\varnothing 16 \text{ mm}$ i 10 uzoraka eksploziva u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera $\varnothing 20 \text{ mm}$.

Gustoća eksploziva je smanjena na način da se je eksploziv dodavao EPS, granulirani i mehanički usitnjen, u različitim volumnim omjerima. Volumni omjeri su 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 i 5:95, pri čemu prvi broj predstavlja postotak volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a.

Za svaku mješavinu ispitano je po 5 uzoraka za svaki omjer eksploziv : EPS u oba promjera cijevi.

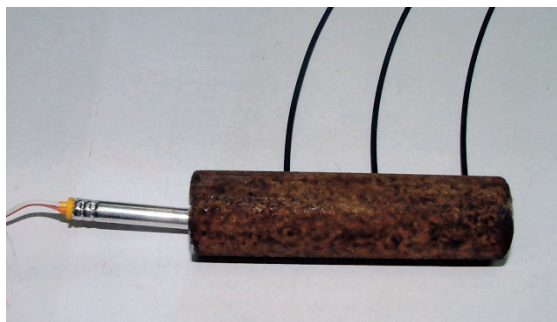


Slika 4. Shematski prikaz postava mjerenja

Figure 4. Measurement scheme

Kazalo:

- 1 – električni vodiči,
- 2 – električni detonator,
- 3 – čelična cijev s eksplozivnom tvari,
- 4 – osjetila (svjetlovedi),
- 5 – elektronički sat.



Slika 5. Fotografija postava mjerenja

Figure 5. Photography of a measurement scheme

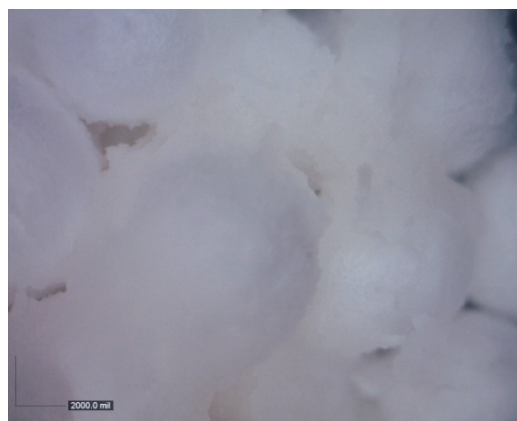
3.4. Rezultati mjerenja

Srednje vrijednosti mjerenja brzina detonacije za eksploziv sam i za svaki volumni omjer smjese eksploziva i EPS-a dane su u tablici 4.

Ovisnost brzine detonacije o gustoći eksplozivnoga punjenja čelične cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 16 mm za svako pojedino mjerenje prikazana je dijagramom na slici 8, a dijagramom na slici 9 za mjerenja u čeličnim cijevima unutarnjega promjera \varnothing 20 mm.

S obzirom da je došlo do većega rasipanja rezultata mjerenja na prvom segmentu, a što se može pripisati blizini mjesta iniciranja, odnosno utjecaju inicijalnoga sredstva na brzinu detonacije eksplozivne tvari, ti rezultati nisu dani u tablici i nisu prikazani dijagramima. Rezultati mjerenja brzine detonacije na drugom segmentu su ujednačeni i smatraju se relevantnima za iskazivanje ovisnosti brzine detonacije o gustoći eksplozivnoga punjenja te su dani u tablici 4 i prikazani dijagramima na slikama 8 i 9.

Mješavina emulzijskoga eksploziva s EPS-om u granulama u volumnom omjeru 40 % eksploziva i 60% EPS-a, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 50 puta, prikazana je na slici 6, a mješavina emulzijskoga eksploziva s mehanički usitnjenim EPS-om u volumnom omjeru 40 % eksploziva i 60% EPS-a, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 500 puta, prikazana je na slici 7.



Slika 6. Eksploziv/EPS (1,5 mm - 3,5 mm) 40/60, 50×

Figure 6. Explosive/EPS (1,5 mm - 3,5 mm) 40/60, 50×



Slika 7. Eksploziv/EPS (0,25 mm - 0,18 mm) 40/60, 500×

Figure 7. Explosive/EPS (0,25 mm - 0,18 mm) 40/60, 500×

Tablica 4. Rezultati mjerenja

Table 4. Measurement results

Vrsta eksplozivne tvari/Type of Explosive Materials	Vrijeme/ Time, t_1 (μ s)	Brzina detonacije/ Velocity of Detonation, v_1 (m/s)	Gustoća/ Density, ρ (g/cm ³)	Vrijeme/ Time, t_2 (μ s)	Brzina detonacije/ Velocity of Detonation, v_2 (m/s)	Gustoća/ Density, ρ (g/cm ³)
Lambrex 1	8,9	3366	1,250	8,7	3491	1,250
Lambrex 1 + EPS 1,5-3,5 mm 50/50	13,3	2275	0,640	11,6	2646	0,642
Lambrex 1 + EPS 1,5-3,5 mm 40/60	14,1	2155	0,521	12,3	2319	0,520
Lambrex 1 + EPS 1,5-3,5 mm 30/70	15,1	2022	0,398	14,0	2175	0,399
Lambrex 1 + EPS 1,5-3,5 mm 20/80	15,6	1878	0,277	15,9	1915	0,277
Lambrex 1 + EPS 1,5-3,5 mm 10/90	21,3	1398	0,155	21,5	1430	0,156
Lambrex 1 + EPS -0,1 mm 50/50	9,1	3258	0,769	9,3	3243	0,771
Lambrex 1 + EPS -0,1 mm 40/60	10,3	2906	0,675	10,3	2911	0,675
Lambrex 1 + EPS -0,1 mm 30/70	13,1	2270	0,579	-	-	-
Lambrex 1 + EPS 0,18-0,1 mm 50/50	10,4	2892	0,793	9,7	3086	0,792
Lambrex 1 + EPS 0,18-0,1 mm 40/60	11,4	2616	0,701	10,6	2816	0,701
Lambrex 1 + EPS 0,18-0,1 mm 30/70	13,6	2202	0,609	-	-	-
Lambrex 1 + EPS 0,25-0,18 mm 50/50	10,1	3023	0,803	9,7	3142	0,802
Lambrex 1 + EPS 0,25-0,18 mm 40/60	10,9	2750	0,713	-	-	-
Lambrex 1 + EPS 0,5-0,25 mm 50/50	10,4	2925	0,793	10,0	3049	0,792
Lambrex 1 + EPS 0,5-0,25 mm 40/60	12,3	2519	0,701	12,1	2480	0,701
Lambrex 1 + EPS +0,5 mm 60/40	-	-	-	10,8	2834	0,916

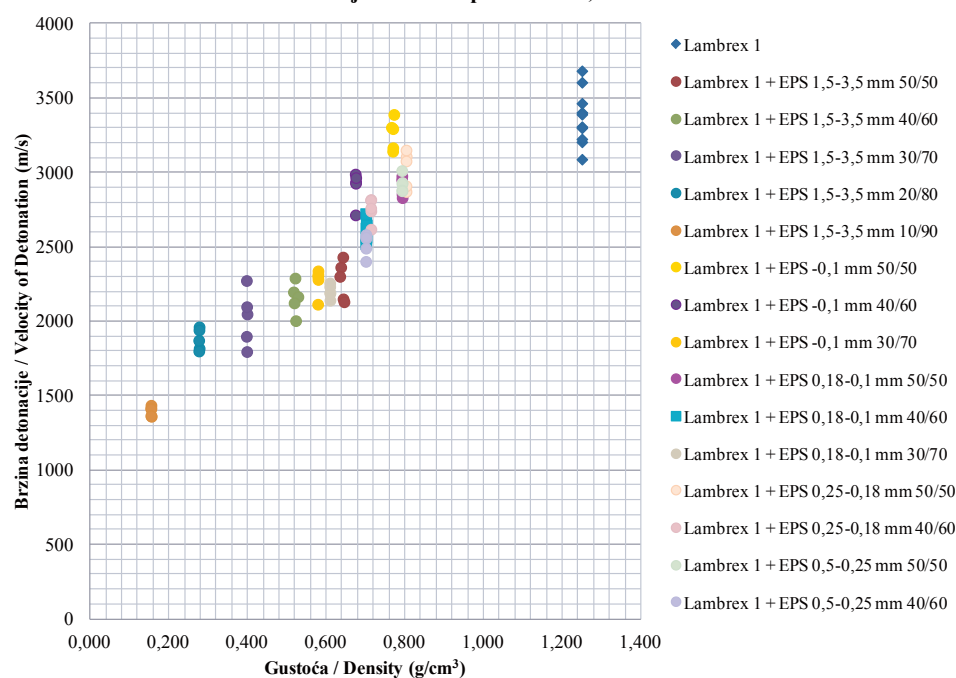
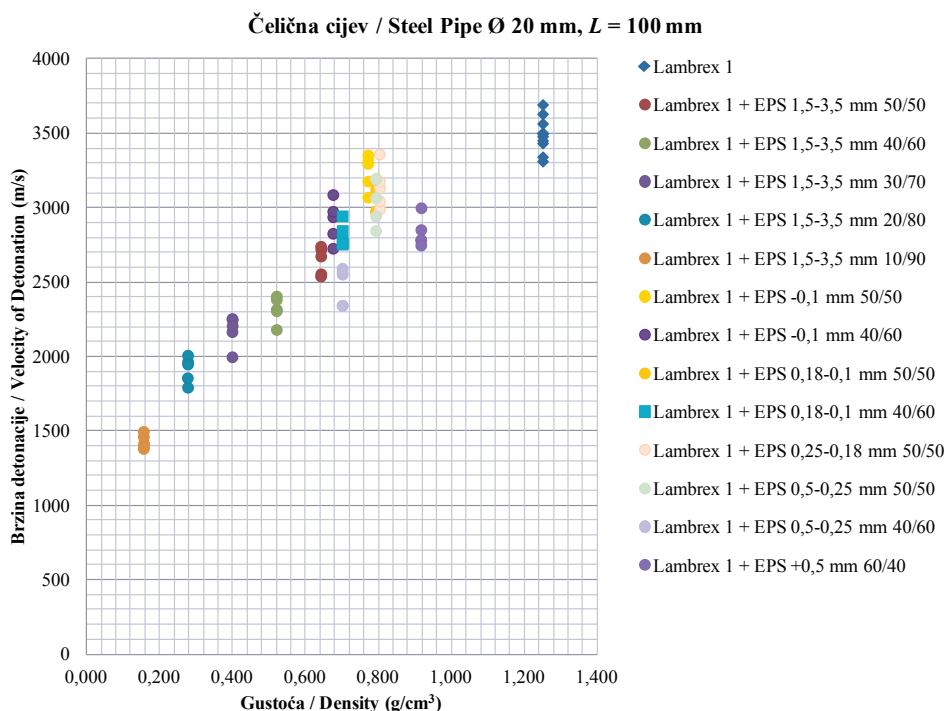
Čelična cijev / Steel Pipe \varnothing 16 mm, $L = 100$ mm

Slika 3. Rezultati mjerenja u čeličnim cijevima unutarnjega promjera \varnothing 16 mm

Figure 3 Measurement results in steel pipe of inner diameter \varnothing 16 mm



Slika 4. Rezultati mjerenja u čeličnim cijevima unutarnjega promjera Ø 20 mm

Figure 4 Measurement results in steel pipe of inner diameter Ø 20 mm

4. Analiza rezultata i zaključak

Iz tablice 4 je vidljivo da najniža gustoća smjese kod koje se postiže stabilna brzina detonacije iznosi 0,155 g/cm³ za uzorke ispitivane u cijevima unutarnjega promjera Ø 16 mm, odnosno 0,156 g/cm³ za uzorke ispitivane u cijevima unutarnjega promjera Ø 22 mm. Takva gustoća je postignuta kod miješanja eksploziva s granuliranim EPS-om veličine zrnaca od 1,5 mm do 3,5 mm. Kod miješanja eksploziva s mehanički usitnjenim EPS-om najniža gustoća kod koje se postiže stabilna brzina detonacije iznosi 0,579 g/cm³ za uzorke ispitivane u cijevima unutarnjega promjera Ø 16 mm, odnosno 0,675 g/cm³ za uzorke ispitivane u cijevima unutarnjega promjera Ø 22 mm. Obje gustoće su postignute prilikom miješanja EPS-a veličine zrnaca ispod 0,1 mm.

Najmanje sniženje gustoće, s početnih 1,25 g/cm³ na krajnjih 0,916 g/cm³, ostvareno je kod mehanički usitnjenoga EPS-a veličine zrnaca iznad 0,5 mm, i to kod volumnoga omjera eksploziv:EPS 50:40.

Iz dijagrama na slici 4 vidljivo je da smjesa eksploziv-EPS (+0,5 mm) u volumnom omjeru 60:40 postiže manju brzinu detonacije u odnosu na ostale smjese, bez obzira što ima veću gustoću od njih. To se može objasniti oblikom i veličinom zrnaca EPS-a. Za razliku od EPS-a u granulama, čija zrnca imaju pravilan oblik kugle, zrnca mehanički usitnjenoga EPS-a su nepravilnih oblika. Kuglasti oblik zrnaca omogućava pravilnije raspoređivanje eksploziva oko samih zrnaca, a time i bolju homogeniza-

ciju smjese. Eksploziv je, u tom slučaju, pravilno raspoređen unutar volumena uzorka.

Iz dijagrama na slikama 3 i 4 vidljivo je da smjese istih ili približno istih gustoća, kada je upotrijebljen mehanički usitnjen EPS za sniženje gustoće, a većih zrnaca, imaju nešto nižu brzinu detonacije. S obzirom na nepravilan oblik zrnaca i distribuciju eksploziva između njih, dolazi prekida kontakta i prekida detonacije.

Granulirani EPS, iako većih zrnaca u odnosu na mehanički usitnjeni EPS, pokazao se kao bolje sredstvo za snižavanje gustoće emulzijskih eksploziva.

U cijevima manjega promjera izmjerena je brzina detonacije kod smjesa manje gustoće nego u cijevima većeg promjera.

Može se zaključiti da s najmanjom postignutom gustoćom smjese emulzijskih eksploziva s ekspanziranom polistirenom od 0,155 g/cm³ se postiže stabilna brzina detonacije za uzorke u cijevima promjera Ø 16 mm i Ø 20 mm duljine 100 mm.

Literatura

Armstrong, L. W., Moxon, N., T. (1990): Low Shock Energy Emulsion Based Wet Hole Explosives; 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. 45-53. Brisbane.

Baranov, E.G., Vedin, A.T., Bondarenko, I.F., (1996). Mining and Industrial Applications of Low – density Explosives. A.A.BALKEMA, 116 pp, Rotterdam.

- Beach, F., Gribble, D., Littlefair, M., Rounsley, R., Testrow, I., Wiggin, M. (2004). Blastlite – The practical Low Density Solution. in Proceedings Explo 2004, 147-151, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
- Ester, Z. (2005): Miniranje I.: eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja. Rudarsko–geološko–naftni fakultet, 176 pp, Zagreb.
- Heltzen, A. M. And Kure, K., (1980). Blasting with ANFO/polystyrene mixtures, in Proceedings ISEE Annual Conference, pp 105-116, Cleveland.
- Jackson, M. M., (1993): Low strength water gel explosive, in Proceedings ISEE Annual Conference, pp 493-499 (The International Society of Explosives Engineers: Cleveland) 493-501.
- Persson, P., Holmberg, R., Lee, J. (1993): Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, Boca Raton, 264
- Rock, J. (2004): Improving blasting outcomes using Softload low-density explosives, in Proceedings Explo 2004, 153-158, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
- Rock, J., Maurer, A., Pereira, N., (2005): Coming of Age for Low-Density Explosives. Coal 2005: Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 175–182. Brisbane.
- Silva G.C.O. (2007): Development, Characterization and Application of a Reactive Bulking Agent for Wall Control. Disertacija. Queen's University Kingston, pp 370, Ontario.

VELOCITY OF DETONATION OF LOW DENSITY EMULSION EXPLOSIVES

Blasting operations in built-up areas, at short distances from structures, impose new requirements on blasting techniques and properties of explosives in order to mitigate seismic effect of blasting. For this purpose there is trying to produce low density explosive with such prop-

erties and blasting-technical characteristics that could be applied for blasting with mitigation of seismic influence. Lowering density of explosives is achieved by adding materials that have a significant lower density than the explosives themselves.

Emulsion explosives are chosen from existing civil explosives for lowering the density. Density of explosives is lowered with adding expanded polystyrene, granular and mechanically chopped on smaller pieces, at different volume ratios. Volume ratios are 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 and 5:95, with the first number represents the percentage of the volume of explosives and the second one represents the percentage of expanded polystyrene.

Explosives for civil uses are mixtures of different chemical composition of explosive and/or non-explosive substances. Chemical and physical properties, along with means of initiation, environment and the terms of application define detonation and blasting parameters of a particular type of the explosive for civil uses. Velocity of detonation is one of the most important measurable characteristics of detonation parameters which indirectly provide information about the liberated energy, quality of explosives and applicability for certain purposes. The level of shock effect of detonated charge on the rock, and therefore the level of seismic effect in the area, depends on the velocity of detonation.

Since the velocity of detonation is proportional to the density of an explosive, the described research is carried out in order to determine the borderline density of the mixture of an emulsion explosive with expanded polystyrene while achieving stable detonation, and to determine the dependency between the velocity of detonation and the density of mixture.