

Eksplozivi smanjene gustoće za primjenu u gospodarskim miniranjima

Mario Dobrilović¹, Vinko Škrlec¹, Ivana Dobrilović¹

¹Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak: Emulzijski eksplozivi su eksplozivne smjese za gospodarsku upotrebu. Gospodarski eksplozivi još se nazivaju i rudarski, odnosno civilni eksplozivi. Oni se načelno sastoje od vodene faze i uljne faze (emulzijske matrice) i plinske faze. Emulzijski eksplozivi smanjene gustoće su, u osnovi, smjese emulzijske matrice i određene, povećane količine plinske faze s ulogom toplih točaka. Primjenom plinske senzibilizacije matrice granulama ekspandiranog polistirena, postiže se smanjenje vršne vrijednosti i impulsa djelujućeg tlaka plinova detonacije u miniranoj stijenskoj masi odnosno drugome sredstvu. Na taj način, kako se smanjuju i naprezanja u sredstvu, tako se reducira širina zone drobljenja izvan rubnih područja morskog polja. Učinak smanjenja oštećene zone stijene kod podzemnih i površinskih miniranja je značajan, jer se posredno ostvaruju uštede, kako na troškovima izvođenja miniranja tako i na troškovima poboljšanja svojstava stijene nakon miniranja. Eksplozivi smanjene gustoće imaju i manju volumnu koncentraciju energije što omogućuje optimalan učinak za potrebno frakturiranje i fragmentiranje stijene čime se smanjuje udio izrazito sitnih frakcija odminiranog materijala u granulometrijskom sastavu. Pri tome se uočava i pozitivan utjecaj na intenzitet seizmičkog utjecaja miniranja u odnosu na uobičajene eksplozive za gospodarska miniranja putem smanjenja izazvanih brzina oscilacija stijene.

Gljučne riječi: miniranje, eksplozivi smanjene gustoće, radna sposobnost eksploziva, seizmički utjecaj miniranja

1. Uvod

Miniranje se klasično, kao tehnološki postupak primjene energije eksploziva, u rudarstvu i građevinarstvu uglavnom koristi za drobljenje stijene ili rudnog tijela (masovna miniranja zbog rudarenja korisne mineralne sirovine), za izradu podzemnog prostora

ili prostora na površini (podzemne prostorije, tuneli, usjeci i zasjeci, temeljenje i sl.) te za rušenje objekata i različite druge tehnološke primjene (rezanje, perforiranje, kompaktiranje, oblikovanje).

Kod miniranja sa svrhom rudarenja mineralne sirovine nastoji se dobiti veća količina stijene uz manje jedinične troškove eksploatacije i postizanje odgovarajućeg granulometrijskog sastava. Prilikom iskopa podzemnog prostora ili prostora na površini teži se minimalnom oštećenju stijenske mase u okolini iskopa kako bi početna fizičko – mehanička svojstva stijenske mase bila očuvana u svrhu osiguranja dugotrajne ili trajne stabilnosti.

Prilikom djelovanja eksplozije kod miniranja, kemijska energija, odnosno detonacijom oslobođena toplina djeluje prvotno na sredinu u kojoj se minira putem udarnog djelovanja ekspanzijom stlačenih plinova detonacije. Udarne energija pridonosi primarnom lomu stijene kod miniranja. Daljnjom ekspanzijom, plinovi ulaze u nastale i proširene pukotine, nadalje drobe i fragmentiraju stijenu te je pomiču iz prvotnog položaja što se opisuje kao sekundarno djelovanje odnosno plinsko ili potisno djelovanje. Kada plinovi u ekspanziji prodru do atmosfere, njihov se tlak izjednačuje s iznosom atmosferskog tlaka.

Djelovanje eksplozivnog naboja na stijensku masu optimalno je u slučaju potpune iskorištenosti oslobođene energije za drobljenje stijene. U tom su slučaju, neželjeni gubici manifestirani u obliku seizmičkog djelovanja, u okolini minskog polja kao i razbacivanje materijala najmanji.

Gospodarska miniranja uobičajeno se u današnje vrijeme izvode gospodarskim eksplozivima koji su u osnovi smjese eksplozivnih i neeksplozivnih komponenata (amonij nitratni praškasti eksplozivi, želatinozni eksplozivi te vodeni gelovi) te smjese samostalno neeksplozivnih komponenata (ANFO eksplozivi i emulzijski eksplozivi). Kod gospodarskih eksploziva odnosno smjesa, jedna komponenta ima ulogu goriva, druga komponenta ima ulogu nositelja kisika, a senzibilizator, treća komponenta može biti goriva, eksplozivna ili inertna. Gospodarski eksplozivi imaju gustoće u granicama od 0,8 do 1,5 kg/dm³, a detonacijska te minersko tehnička svojstva im ovise o kemijskom sastavu i stupnju neidealnosti detonacijskog procesa. Poznata su istraživanja u kojima su konvencionalnim eksplozivima i eksplozivnim smjesama dodavani različiti materijali kako bi se naglasilo pojedino, traženo svojstvo. Kod istraživanja eksploziva smanjene gustoće tražena su slijedeća svojstva:

- smanjenje gustoće u odnosu na standardne mješavine,
- stabilnost detonacijskog procesa tako dobivenih mješavina,
- smanjenje, odnosno optimizacija jedinične energije koja se dobije detonacijom,

- korištenje dostupnih, po mogućnosti otpadnih materijala,
- stabilnost i inertnost mješavine u normalnim okolišnim uvjetima.

Osnovni princip izvedbe eksploziva smanjene gustoće je to da se dodaju materijali koji imaju znatno manju gustoću od eksploziva i mogu se razvrstati u dvije skupine:

1. aktivni – materijali s mogućnošću gorenja (polistiren, poliuretan, razne vrste komercijalnih plastičnih materijala, ulja, piljevina, sijeno, papir, drveno brašno i sl.)
2. inertni – materijali koji nisu podložni fizičkim, kemijskim ili biološkim promjenama te nemaju ulogu goriva u eksplozivu (staklene i plastične mikrokuglice, staklo, perlit i sl.)

Eksplozivi smanjene gustoće (engl. *Low Density Explosives*, LDE) uobičajeno imaju gustoću manju od $0,80 \text{ g/cm}^3$, a eksplozivi kojima je gustoća smanjena ispod $0,20 \text{ g/cm}^3$ nazivaju se eksplozivima jako smanjene gustoće (engl. *Ultralow Density Explosives*, ULDE) [1].

2. Prethodna istraživanja

Prva istraživanja na razvoju eksploziva smanjene gustoće počela su 60-ih godina prošlog stoljeća. Temeljena su na smanjenju gustoće ANFO-eksploziva, koji je smatran idealnim za smanjenje gustoće, dodavanjem raznih materijala manje gustoće. Istraživanja su bila usmjerena na razvoj eksploziva koji bi se mogao jednostavno pripremiti na mjestu upotrebe i koji bi bio komercijalno isplativ [1,2].

U Norveškoj je početkom 60-ih godina prošlog stoljeća prvi put zabilježena upotreba eksploziva smanjene gustoće. Upotrijebljena je mješavina ANFO-eksploziva i piljevine u volumnom omjeru 50:50 za izvođenje miniranja [3]. Du Pont (1969) spominje upotrebu eksploziva smanjene gustoće Nilite ND s rasponom gustoća od $0,45 \text{ g/cm}^3$ do $0,55 \text{ g/cm}^3$ [2,4]. Austing i Tulis (1970) su ispitivali mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće, gustoća jednakih ili manjih od $0,25 \text{ g/cm}^3$, na bazi PETN-a, nitroceluloze i nitroglicerina [5,6]. Baranov i suradnici (1976) su prvi u tadašnjem Sovjetskom Savezu koristili ekspanzirani polistiren (EPS) za razvoj eksploziva smanjene gustoće. EPS su miješali s gospodarskim eksplozivima u različitim omjerima u svrhu očuvanja stabilnosti konturne površine [1].

Početkom 70-ih godina prošlog stoljeća počela su u Norveškoj istraživanja eksploziva smanjene gustoće na bazi ANFO-eksploziva i EPS-a. Ta istraživanja su dovela do prvog komercijalnog eksploziva smanjene gustoće. Korporacija IRECO (danas Dyno Nobel) je u Australiji 1975. godine stavila na tržište Isanol [3,7,8]. Greeff (1977) je

zamijenio ANFO-eksploziv sa smjesom ANFO/polistiren u volumnom omjeru 50/50 pri miniranjima u suhim uvjetima za poboljšanje fragmentacije mekših stijena [9]. Hagan (1979) je za smanjenje prekoprofilnog iskopa koristio smjese ANFO eksploziva i neekspandiranog polistirena u volumnim omjerima 20:80, 25:75 i 50:50 [1,9]. Heltzen i Kure (1979) su provodili daljnja istraživanja s Isanolom te su dokazali mogućnost detonacije smjese ANFO-eksploziva i ekspandiranog polistirena (EPS) u volumnom omjeru 5:95 %, gustoće $0,18 \text{ g/cm}^3$, pri čemu je izmjerena brzina detonacije od 1600 m/s . Za konturna miniranja su koristili smjesu ANFO-eksploziva i granula EPS-a u volumnom omjeru 10:90 sa stabilnom brzinom detonacije oko 1750 m/s . Isanol, gustoće $0,18 \text{ g/cm}^3$, ubraja se u eksplozive jako smanjene gustoće [3, 10, 11].

Tulis i suradnici (1982) su ispitivali mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće na osnovi PETN-a i staklene vune/etilne celuloze. Udio PETN-a je iznosio 50 % – 60 % volumno, a gustoća takvih smjesa približno $0,10 \text{ g/cm}^3$ – $0,90 \text{ g/cm}^3$. Nije zabilježena stabilna detonacija [5]. Shvedov (1985) je analizirao mogućnost primjene eksploziva smanjene gustoće za održanje stabilne detonacije pri velikim promjerima punjenja. Korištena je smjesa granula amonij nitrata (AN) i zrnaca EPS-a, presvučenih tankim slojem soli. Takva smjesa je imala gustoću $0,20 \text{ g/cm}^3$ [1,11]. Xeuguo (1986) je ispitivao mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće na bazi PETN-a i poliuretanske pjene. Udio PETN-a je iznosio 40 % – 50 % maseno, a gustoće su bile u rasponu od $0,30 \text{ g/cm}^3$ do $0,90 \text{ g/cm}^3$. Minimalna gustoća kod koje je ostvarena stabilna detonacija iznosila je $0,27 \text{ g/cm}^3$ [5,6].

Solov'ev i suradnici (1986) su ispitivali mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće izvedenog od heksogena i mikroporozne gume koja se sastoji od smole pre-mazane urea – formaldehidom. Uspješno su detonirali smjese gustoća od $0,20 \text{ g/cm}^3$ do $0,80 \text{ g/cm}^3$ [12].

Baranov i suradnici (1988) su određivali radnu sposobnost eksploziva smanjene gustoće prema Trauzlu. Koristili su smjesu Gramonita 79/21 (smjesa trotila i amonijevog nitrata u omjeru 79:21) i EPS-a u različitim volumnim omjerima (od 20 % do 80 % EPS-a) s rasponom gustoća od $0,23 \text{ g/cm}^3$ do $0,78 \text{ g/cm}^3$ [1].

Wilson i Moxon (1989) su smanjivali gustoću ANFO-eksploziva polistirenom, otpacima iz proizvodnje šećera i piljevinom [2,13].

Anderson i suradnici (1989) su ispitivali detonabilnost poliuretanske pjene miješajući je s PETN-om i detonabilnost nitrometanske pjene dobivene iz tekućeg nitrometana. PETN je dispergirani u matricu poliuretanske pjene različitih gustoća ($0,10 \text{ g/cm}^3$ – $0,70 \text{ g/cm}^3$) u masenom omjeru 60:40, a gustoće smjese PETN/poliuretanska pjene su bile u rasponu od $0,15 \text{ g/cm}^3$ do $0,70 \text{ g/cm}^3$. Gustoće nitrometanske pjene bile su u rasponu od $0,07 \text{ g/cm}^3$ do $0,70 \text{ g/cm}^3$ [14].

Armstrong i Moxon (1990) su smanjili gustoću emulzijskih eksploziva miješajući tri vrste matrice emulzijskoga eksploziva, uz dodatak 1,5 % masenog udjela staklenih mikrokuglica, s neekspandiranim polistirenom, perlitom ili piljevinom. Za mješavine emulzijskog eksploziva i polistirena, gustoće $0,80 \text{ g/cm}^3$, izmjerene su brzine detonacije od 3300 m/s do 3900 m/s. Za mješavine emulzijskog eksploziva i perlita, gustoće $0,80 \text{ g/cm}^3$, izmjerene su brzine detonacije od 3000 m/s do 3300 m/s. Za mješavine emulzijskog eksploziva s piljevinom, gustoće $1,05 \text{ g/cm}^3$, izmjerena je brzina detonacije 5100 m/s. Za mješavine emulzijskog eksploziva s piljevinom, gustoće $0,80 \text{ g/cm}^3$ nije zabilježena detonacija. Cilj istraživanja je bio razvoj vodootpornog eksploziva smanjene gustoće koji bi imao primjenu za poboljšanje fragmentacije uz smanjenje troškova miniranja. Odustalo se je od smjesa s dodatkom piljevine jer su takve smjese pokazale slabu vodootpornost i imale velika rasipanja u izmjerenim brzinama detonacije što objašnjavaju nestabilnom detonacijom. Daljnji rad je nastavljen smjesama emulzijskog eksploziva s polistirenom odnosno s perlitom kod kojih su se pojavili problemi prilikom punjenja bušotina zbog povećanja viskoznosti takvih smjesa [14].

Katsabanis i suradnici (1992) su se nadovezali na rad Anderson i suradnika (1989) mjereći brzinu detonacije i tlak detonacije smjese PETN/poliuretanska pjena gustoće od $0,55 \text{ g/cm}^3$ do $0,60 \text{ g/cm}^3$ [15].

Tapia (1992) je smanjio gustoću ANFO eksploziva na $0,45 \text{ g/cm}^3$ dodajući mu kuglice perlita [11].

Nifad'ev i Kalinina (1992) su dokazali mogućnost sagorijevanja ekspaniranog polistirena, odnosno mogućnost sudjelovanja u kemijskoj reakciji oksidacije, uz dodatak eksplozivima za smanjenje gustoće [16,17].

Hunter i suradnici (1993) su smanjili gustoću ANFO-eksploziva polistirenom te su ga koristili pri miniranjima u svrhu očuvanja stabilnosti konturne površine kao zamjenu za standardna konturna miniranja. Zaključili su da miniranje eksplozivom smanjene gustoće rezultira smanjenim seizmičkim utjecajem na stijenu iza konturne površine u odnosu na standardna konturna miniranja. Takvi eksplozivi su imali raspon gustoća od $0,31 \text{ g/cm}^3$ do $0,53 \text{ g/cm}^3$ i izmjerena im je brzina detonacije u rasponu od 2300 m/s do 2700 m/s [18].

Harries i Gribble (1993) su smanjivali gustoću ANFO-eksploziva dodajući mu gumu u granulama različitih veličina s ciljem smanjenja udarne energije. Takav eksploziv su nazvali Anrub. Gumu su dodavali ANFO-eksplozivu u slijedećim volumnim omjerima: 3,25 %, 6,5 %, 9,75 % i 13 %. Nisu naveli niti gustoću gume niti gustoće mješavina ANFO-eksploziva s gumom. Kao rezultat miniranja s Anrubom navode smanjene brzine detonacije, smanjenje seizmičkog utjecaja i smanjenje razbacivanja adminiranog materijala u odnosu na miniranja s ANFO-eksplozivom [19].

Jackson (1993) je smanjio gustoću vodenih gelova granulama amonij-nitrata i kuglicama EPS-a s ciljem razvoja novog eksploziva smanjene gustoće u svrhu očuvanja stabilnosti konturne površine. Eksploziv smanjene gustoće nazvao je vodeni gel male snage (engl. *Low Strength Water Gel Explosive*). Izmjerio je brzine detonacije u rasponu od 2400 m/s do 3000 m/s za gustoće od 0,40 g/cm³ do 0,70 g/cm³ [20].

Grouhel i Hunsaker (1995) su koristili novi eksploziv Dynolite, smjesu ANFO-eksploziva i vodene otopine anorganskih soli uz dodatak sredstva za zgušnjavanje i diesel goriva, za korištenje u suhim bušotinama pri površinskim miniranjima. Gustoća Dynolite-a je u rasponu od 0,40 g/cm³ do 0,70 g/cm³. Koristili su Dynolite gustoće 0,50 g/cm³. Mjerali su brzinu detonacije u PVC cijevima promjera Ø 127 mm (2500 m/s) i u bušotinama Ø 251 mm (3500 m/s) te su zaključili da Dynolite ima približno 1000 m/s manju brzinu detonacije u istim uvjetima od ANFO-eksploziva [21].

Stachura i Cumerlato (1995) su uspješno smanjili gustoću vodoplastičnom eksplozivu na 0,50 g/cm³ i koristili ga za konturna miniranja u bušotinama Ø 270 mm. Ne navode koje su sredstvo koristili za smanjenje gustoće. Rezultate miniranja takvim eksplozivom su usporedili s rezultatima miniranja s Havey-ANFO i s ANFO-eksplozivom koristeći kao mjeru "faktor otiska polovice bušotine" (engl. *half cast factor* ili *half barrel factor*). Dobili su manje oštećenje stjenske mase i viši "čimbenik otiska polovice bušotine" kao rezultat miniranja s eksplozivom smanjene gustoće u odnosu na miniranja s konvencionalnim eksplozivima [22].

Curtis (1997) je smanjivao gustoću ANFO-eksploziva s ciljem smanjenja brzine detonacije dodajući mu ugljen, kukuruz i pepeo u omjerima 10:90 i 20:80. Najveće sniženje brzine detonacije ostvareno je sa smjesom pepela i ANFO-eksploziva uz napomenu da je takva smjesa imala nešto niže vrijednosti energija dobivenih podvodnim testom. Niže vrijednosti energija su pripisane inertnosti pepela, dok ostali materijali imaju djelomično i ulogu goriva.

Johnson (1996) je miješao ANFO-eksploziv s drvenom piljevinom i primijenio je takav eksploziv za miniranja u mekšim stijenama. Cilj mu je bio smanjenje troškova miniranja u odnosu na miniranja s ANFO-eksplozivom te navodi da je ostvario značajne uštede [2,23].

Forsyth suradnici (1997) su miješali kuglice perlita s ANFO-eksplozivom te su takav eksploziv smanjene gustoće uspješno primijenili za podzemna miniranja umjesto ANFO-eksploziva [11].

Brent i Armstrong (1998) su ispitivali mogućnost primjene eksploziva smanjene gustoće za konturna miniranja. Koristili su eksploziv jako smanjene gustoće, 0,20 g/cm³ s izmjerenom prosječnom brzinom detonacije 2200 m/s. Ne navode kojem su eksplozivu smanjili gustoću i koje su sredstvo za smanjenje gustoće koristili. Rezul-

tate pokusnih miniranja takvim eksplozivom su usporedili s rezultatima miniranja emulzijskim eksplozivom koristeći kao mjeru “*čimbenika otiska polovice bušotine*” koji je iznosio 32 % za emulzijski eksploziv odnosno 62 % za eksploziv jako smanjene gustoće [11,22,23].

Sheahan i suradnici (1998) su koristili mješavinu ANFO-eksploziva i polistirena, gustoće $0,28 \text{ g/cm}^3$, za miniranja u granitima [11].

Sudweeks (2000) je miješao EPS i ANFO-eksploziv u omjeru 50:50, gustoće $0,50 \text{ g/cm}^3$ i u omjeru 70:30, gustoće $0,44 \text{ g/cm}^3$ [11].

Rowe i suradnici (2001) su proizveli Novalite, eksploziv smanjene gustoće, kao zamjenu za ANFO-eksploziv i Heavy-ANFO-eksploziv, za miniranja u mekšim stijena, za očuvanje stabilnosti konturne površine u rudnicima ugljena i za smanjenje seizmičkog utjecaja miniranja. Izmjerali su brzine detonacije u rasponu od 2000 m/s do 4500 m/s za gustoće od $0,30 \text{ g/cm}^3$ do $1,10 \text{ g/cm}^3$ [11,23,24].

Golubev i Medvedkin (2001) su primijenili eksploziv smanjene gustoće za rastavljanje bojeve municije. Koristili su trakice poliuretanske pjene, debljine 10 mm, koje su ispunili pentritom ili heksogenom. Eksplozive su nazvali NIL-1 (punjenje pentritom) i NIL-2 (punjenje heksogenom), a gustoća im je bila u rasponu od $0,10 \text{ g/cm}^3$ do $0,30 \text{ g/cm}^3$ [25,26].

Maranada i Cudzilo (2001) su istraživali mogućnost zavarivanja eksplozivom smanjene gustoće. Ispitali su smjese amonijevog nitrata s aluminijem i s kuglicama smole premazane urea-formaldehidom te smjese amonijevog nitrata s aluminijem i s silicijevim dioksidom. Kombinirajući različite volumne udjele pojedinih komponenti u smjesi dobili su eksplozive različitih gustoća kojima su izmjerili brzinu detonacije te odredili kritični promjer [27].

Pal Roy i Mohatny (2002) su smanjili gustoću ANFO-eksplozivu dodajući mu piljevinu u masenom omjeru od 10 % (volumno 32 %) te su dobili eksploziv smanjene gustoće s početnih $0,85 \text{ g/cm}^3$ na $0,645 \text{ g/cm}^3$ [13].

Akbari Mousavi i suradnici (2004) su smanjili gustoću ANFO-eksploziva dodajući im perlit u masenom omjeru 60:40, izmjerenim brzinama detonacije oko 2300 m/s , s uspješnom primjenom eksploziva smanjene gustoće za zavarivanje eksplozivom [28].

Beach i suradnici (2004) su smanjili gustoću ANFO-eksploziva s ljuskama pšenice te su mješavinu koristili za uspješno miniranje stijena manje čvrstoće. Eksploziv smanjene gustoće su nazvali BlastLite. BlastLite ima gustoću $0,48 \text{ g/cm}^3$ do $0,57 \text{ g/cm}^3$, a vrijednosti brzine detonacije su u rasponu od 2000 m/s do 3500 m/s [24].

Rock (2004) je proizveo i patentirao eksploziv smanjene gustoće na osnovi Heavy-ANFO-eksploziva miješajući ga s ljuskama riže. Eksploziv, s rasponom gustoća od $0,45 \text{ g/cm}^3$ do $1,25 \text{ g/cm}^3$, dostupan je na tržištu pod nazivom SoftLOAD [8].

Akbari Mousavi i suradnici (2005) su smanjili gustoću ANFO-eksploziva dodajući im perlit u masenom omjeru 77:23, izmjerenih brzina detonacije u rasponu od 1800 m/s do 2600 m/s, s uspješnom primjenom eksploziva smanjene gustoće za zavarivanje eksplozivom [28].

Silva (2007) je kao sredstvo za smanjenje gustoće eksploziva koristio kuglice EPS-a obložene tankim slojem amonijevog nitrata. Nazvao ih je LDRA (engl. *Low Density Reactive Agent*) i pod tim ih nazivom patentirao. Gustoća LDRA iznosi od $0,15 \text{ g/cm}^3$ do $0,20 \text{ g/cm}^3$. Osim kao sredstvo za smanjenje gustoće eksploziva, LDRA je moguće koristiti i kao eksploziv. LDRA gustoće $0,20 \text{ g/cm}^3$ ima brzinu detonacije 2400 m/s. Kuglice LDRA je miješao s ANFO-eksplozivom i s perlitom u različitim volumnim omjerima i takve eksplozive je koristio u opreznim miniranjima za smanjenje oštećenja konturne površine. 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 % u bušotinama promjera $\varnothing 311 \text{ mm}$. Mjereći seizmički utjecaj miniranja takvim eksplozivom i pregledavajući završnu kosinu nakon miniranja, došao je do zaključka da dolazi do smanjenog oštećenja u podnožju kosine u odnosu na konturna miniranja konvencionalnim gospodarskim eksplozivima [11].

Sil'vestrov i suradnici (2010) su smanjili gustoću emulzijskih eksploziva s ciljem korištenja eksploziva smanjene gustoće za eksplozivno zavarivanje. Gustoću su smanjivali na način da su povećali maseni udio staklenih mikrokuglica. Smiješali su eksploziv gustoće $0,50 \text{ g/cm}^3$, s brzinama detonacije od 1800 m/s do 2100 m/s, koji su uspješno primijenili za eksplozivno zavarivanje [29].

Cordova i suradnici (2012) su patentirali emulzijski eksploziv smanjene gustoće izveden od emulzijske matrice senzibilizirane mjehurićima dušika s rasponom gustoća od $0,50 \text{ g/cm}^3$ do $0,90 \text{ g/cm}^3$ [30].

Pal Roy i suradnici (2012) su proizveli eksploziv smanjene gustoće na način da su pomiješali amonijev nitrat i piljevinu te su takvoj smjesi dodali mineralno i korišteno ulje (motorno ulje, hidrauličko ulje, ulje iz mjenjača). Miješali su 800 kg AN-a, 20 kg piljevine, 32 dm^3 mineralnog ulja i 24 dm^3 korištenog ulja. Eksploziv smanjene gustoće su patronirali u patrone promjera $\varnothing 75 \text{ mm}$, duljine 1 m, mase 1 kg i gustoće $0,23 \text{ g/cm}^3$ te ih stavljali u bušotine koje su na dnu imale drveni odstojnik visine 1 m [13].

Silva i Orlandi (2013) su proizveli novi eksploziv smanjene gustoće koji su nazvali PANFO. Eksploziv se sastoji od ekspaniranog perlita obloženog tankim slojem

amonijeva nitrata uz dodatak goriva. Gustoća takvog eksploziva je od $0,40 \text{ g/cm}^3$ do $0,45 \text{ g/cm}^3$, s brzinama detonacije od 1800 m/s do 2000 m/s [31].

Singh i suradnici (2013) su tražili zamjenu za ANFO-eksploziv za miniranja vapnenca i ugljena ali i za miniranja kod kojih se eksploziv nalazi u bušotinama ispunjenim vodom. Zamjenu su našli u eksplozivu smanjene gustoće na bazi emulzijskog eksploziva. Gustoću emulzijskog eksploziva su smanjili s inicijalnih $1,10 \text{ g/cm}^3$ na $0,65 \text{ g/cm}^3$ s dodavanjem sredstva za smanjenje gustoće, ne navodeći koje sredstvo su koristili [13].

Maranda i suradnici (2014) su smanjivali gustoću emulzijskih eksploziva na način da su emulzijskoj matrici dodavali različite masene udjele plastičnih mikrokuglica. Mjerili su brzinu detonacije i tlak zračnog udarnog vala. Zaključili su da sniženje gustoće značajnije ne utječe na tlak zračnog udarnog vala. Rezultate mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće su usporedili s rezultatima mjerenja brzine detonacije emulzijskih eksploziva s različitim masenim udjelom staklenih mikrokuglica [32].

Kumar i suradnici (2017) su koristili Flexigel, emulzijski eksploziv smanjene gustoće u tekućem stanju, s rasponom gustoća od $0,8 \text{ g/cm}^3$ do $1,1 \text{ g/cm}^3$ i pripadajućim brzinama detonacije od 2000 m/s do 4200 m/s za smanjenje prekoprofilnih miniranja i seizmičkih efekata miniranja [33].

Ershov i Rubtsov (2019) su istraživali mogućnost detoniranja na bazi PETN, RDX i HMX s gustoćama bliskim njihovim nasipnim gustoćama [34].

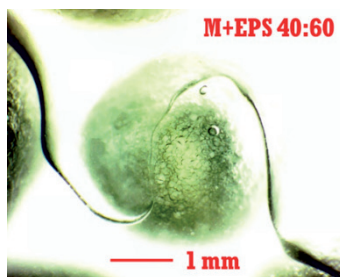
Kumar i Mishra (2020) su istraživali mogućnost smanjenja seizmičkih efekata miniranja eksploziva smanjene gustoće u odnosu na emulzijski eksploziv. Koristili su eksploziv gustoće $0,8 \text{ g/cm}^3$ [35].

3. Mjerenja brzina detonacije

U daljnjim poglavljima su prikazana mjerenja brzine detonacije pojedinih mješavina eksploziva smanjene gustoće.

3.1 Mjerenja brzina detonacije za mješavine emulzijske matrice i ekspaniranog polistirena

Na Slici 1 prikazana je struktura LDE snimljena mikroskopom s povećanjem $40\times$, a u Tablici 1 su dane vrijednosti gustoća emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.



Slika 1: Mješavina emulzijske matrice i EPS-a u volumnom omjeru 40:60 (uvećanje 40×, mikroskop BIM 313T)

Tablica 1: Gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a

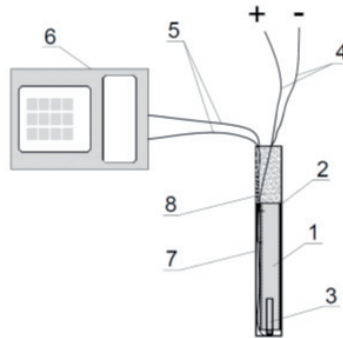
Vrsta eksploziva (veličina granula EPS-a)	Omjer emulzijska matrica: EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)
Matrica / EPS	50:50	0,627
Matrica / EPS	40:60	0,437
Matrica / EPS	30:70	0,302
Matrica / EPS	20:80	0,218
Matrica / EPS	10:90	0,085

3.2 Određivanje radne sposobnosti

Brzina detonacije je mjerena pri otpucavanju u čeličnim cijevima promjera 25 mm u svrhu određivanja referentnih vrijednosti za referentne eksplozive i eksploziv smanjene gustoće. Brzine mjerene u bušotinama promjera 32 mm u stijeni predstavljaju relevantne rezultate u stvarnim uvjetima stijene te daju relativnu mjeru učinka uspoređivanih eksploziva.

Brzina detonacije je u bušotinama mjerena prilikom otpucavanja pet uzoraka pentrita, emulzijskog eksploziva i ANFO eksploziva kao referentnih eksploziva odnosno za svaku pojedinu mješavinu ispitivanih eksploziva smanjene gustoće. Mjerenja su izvedena elektrooptičkom metodom. Distribucija brzina detonacije za navedene eksplozive je mjerena na 9 segmenata u čeličnim cijevima na uzorcima duljine 1000 mm.

Postav mjerenja u bušotini je prikazan na Slici 2, a fotografija uzorka mjerenja u čeličnim cijevima na Slici 3.



Slika 2: Postav mjerjenja brzine detonacije u bušotini (1 – eksploziv, 2 – plastična cijev, 3 – električni detonator, 4 – vodiči, 5 – osjetila (svjetlovodi), 6 – elektronički sat, 7 – minska bušotina i 8 – čep od inertnog materijala)



Slika 3: Postav mjerjenja brzine detonacije u čeličnim cijevima.

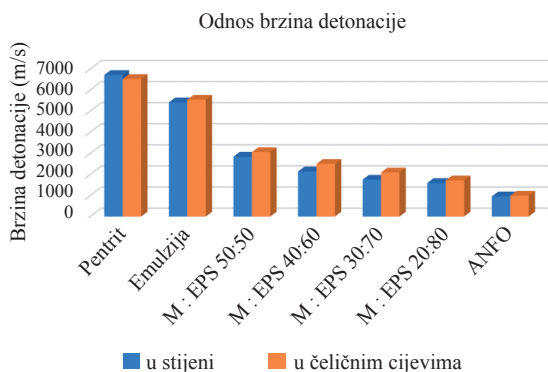
Odnos srednjih vrijednosti izmjerenih brzina detonacije u bušotini i u čeličnim cijevima za pentrit, emulzijski eksploziv, ANFO-eksploziv te za pojedine omjere emulzijske matrice s dodatkom EPS-a prikazan je u Tablici 2. Dijagram odnosa brzina detonacije u stijeni i u čeličnim cijevima prikazan je grafikonom na Slici 4.

Tablica 2: Odnos brzina detonacije u stijeni i u cijevima za korištene eksplozive

Vrsta eksplozivne tvari	Gustoća, ρ (g/cm^3)	Brzina detonacije u stijeni, v_s (m/s)	Brzina detonacije u čeličnim cijevima, v_{cc} (m/s)	Razlika brzina detonacije (m/s)
Pentrit	1,148	6706	6517	189
Emulzija	1,175	5408	5534	126
M : EPS 50:50	0,627	2836	3051	215
M : EPS 40:60	0,437	2136	2491	355

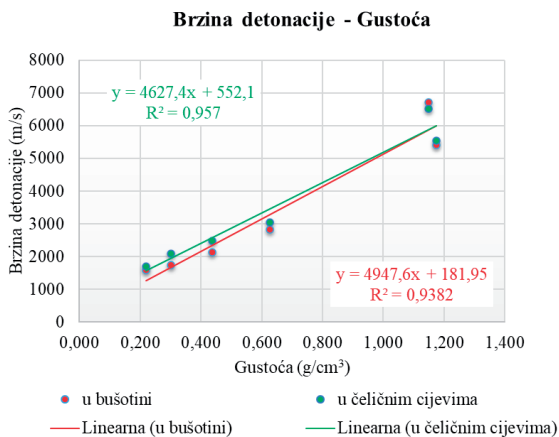
Vrsta eksplozivne tvari	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije u stijeni, v_s (m/s)	Brzina detonacije u čeličnim cijevima, $v_{\text{čc}}$ (m/s)	Razlika brzina detonacije (m/s)
M : EPS 30:70	0,302	1746	2089	343
M : EPS 20:80	0,218	1590	1710	120
ANFO	0,838	952	985	33

Mjerna nesigurnost prilikom određivanja brzine detonacije je iznosila $U = v \pm 75$ (m/s).



Slika 4: Dijagram odnosa brzina detonacije u stijeni i u čeličnim cijevima

Zavisnost brzine detonacije u bušotinama i čeličnim cijevima od gustoće eksploziva je prikazana na grafikonu na Slici 5.



Slika 5: Zavisnost brzine detonacije u bušotini od gustoće eksplozivne tvari.

Iz Tablice 2 i iz dijagrama na Slici 5 je vidljivo da najniža gustoća smjese kod koje se postiže stabilna brzina detonacije u bušotini iznosi $0,218 \text{ g/cm}^3$.

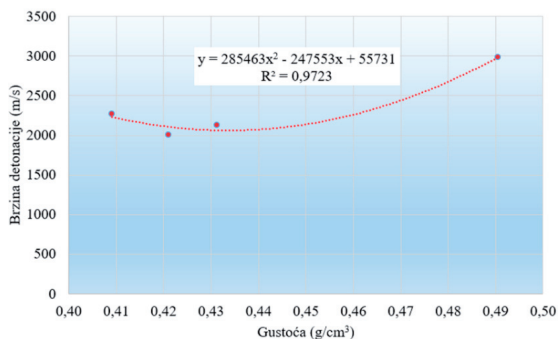
3.3 Emulzijska matrica i ekspanzirani polistiren s dodatkom papira

Eksplozivnoj smjesi matrice i ekspanziranog polistirena dodavan je mljeveni papir te su se mjerile brzine detonacije što je prikazano u Tablici 3

Tablica 3: Brzina detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak mljevenog papira

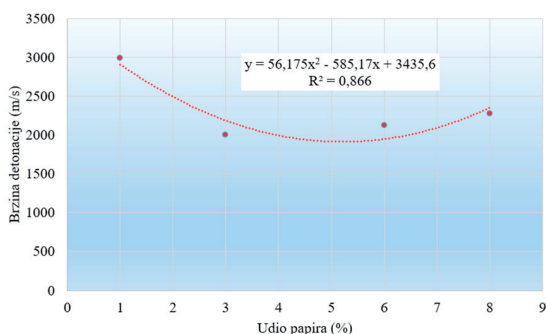
Vrsta eksploziva	Gustoća eksplozivne tvari, $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Srednja vrijednost gustoće, $\rho_{\text{sred}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Masa eksplozivne tvari, $m_{\text{ET}} \text{ (g)}$	Srednja vrijednost mase, $m_{\text{sred}} \text{ (g)}$	Izmjerena brzina detonacije, $v \text{ (m/s)}$	Srednja vrijednost brzine detonacije, $v_{\text{sred}} \text{ (m/s)}$
MEPS3466	0,489	0,49	21,42	21,52	2895	2984
MEPS3466	0,492		21,61		3073	
MEPS3466 + papir mljeveni (99/1)	0,428	0,42	18,87	18,66	2201	2005
MEPS3466 + papir mljeveni (99/1)	0,417		18,58		1921	
MEPS3466 + papir mljeveni (99/1)	0,418		18,54		1893	
MEPS3466 + papir mljeveni (99/2)	0,430	0,43	19,05	18,92	2097	2128
MEPS3466 + papir mljeveni (99/2)	0,433		18,79		2158	
MEPS3466 + papir mljeveni (96/4)	0,415	0,41	18,20	18,06	2318	2272
MEPS3466 + papir mljeveni (96/4)	0,403		17,91		2226	

Brzina detonacije naglo raste povećanjem gustoće od $0,43 \text{ g/cm}^3$ i dostiže najveću brzinu detonacije na $0,49 \text{ g/cm}^3$ od gotovo 3000 m/s dok gustoće manje vrijednosti imaju ujednačene vrijednosti brzine oko 2100 m/s . Zavisnost brzine detonacije eksploziva s dodatkom mljevenog papira o gustoći prikazana je na Slici 6.



Slika 6: Zavisnost brzine detonacije o gustoći eksploziva s dodatkom mljevenog papira

Udio papira u većem postotku utječe na smanjenje brzine detonacije te nakon 30% udjela pa nadalje varira brzinom 2100-2300 m/s. Na Slici 7 je grafički prikazana brzina detonacije ovisna o udjelu papira.



Slika 7: Zavisnost brzine detonacije o udjelu papira

3.4 Emulzijska matrica i ekspanzirani polistiren s dodatkom mljevenog sijena

Nakon mljevenja, sijeno je raspodijeljeno na četiri veličine čestica : >5 mm, 0,5-0,25 mm, 0,25-0,15 mm i <0,15 mm. Eksplozivnoj smjesi dodavani su određeni volumni udjeli pojedinih frakcija mljevenog sijena. Srednja vrijednosti izmjerenih brzina detonacija prikazane su u Tablici 4.

Tablica 4: Srednje vrijednosti mjerenih brzina detonacija

Vrsta eksploziva	Omjer	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v_1 , (m/s)	Standardna devijacija, σ (m/s)
ANFO+M	80:20	0,897	2438	126
M+EPS	60:40	0,461	2373	106
(M + EPS 40/60) + Sijeno (0,5/0,25 mm)	95:5	0,455	2547	119
(M + EPS 40/60) + Sijeno (0,5/0,25 mm)	90:10	0,430	2059	61
(M + EPS 40/60) + Sijeno (0,25/0,15 mm)	95:5	0,469	2123	134
(M + EPS 40/60) + Sijeno (0,25/0,15 mm)	90:10	0,408	1968	75

Prema rezultatima mjerenja razvidno je da se s povećanjem udjela sijena smanjuje brzina detonacije. Utjecaj na smanjenje brzine detonacije dodatno je sa smanjenjem veličine čestica sijena (0,15 mm).

3.5 Emulzijska matrica i ekspanzirani polistiren s dodatkom reciklirane gume

Za ispitivanja je korištena emulzijska matrica senzibilizirana ekspanziranim polistirenom (EPS) u volumnom omjeru 40:60 pri čemu prvi broj predstavlja postotak volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a. Toj mješavini dodavana je reciklirana guma u različitim masenim omjerima te je mjerena brzina detonacije.

Korišteni emulzijski eksploziv smanjene gustoće prikazan je na Slici 8.



Slika 8: Emulzijski eksploziv smanjene gustoće

Za ispitivanja korištena je guma koja se dobiva recikliranjem automobilskih guma. Korištena guma je prikazana na Slici 9. U Tablici 5 prikazane su pojedine klase, mase i postoci ostataka na pojedinim sitima.

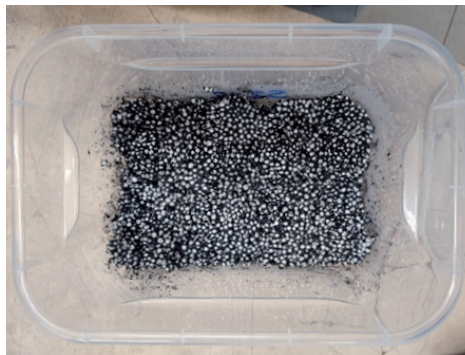


Slika 9: Korištena reciklirana guma

Tablica 5: Granoanaliza korištene reciklirane gume

Klasa	Masa, (g)	Masa, (%)
+1,0	0,13	0,03
1,0/0,5	138,65	27,81
0,5/0,25	231,64	46,46
0,25/0,15	86,26	17,30
0,15/0,106	30,68	6,15
0,106/0,75	9,70	1,95
0,075/0,063	1,06	0,21
-0,063	0,42	0,08
Σ	498,54	100

Na Slici 10 prikazana je fotografija emulzijskog eksploziva smanjene gustoće s dodatkom 10 % reciklirane gume, a u Tablici 6 su dane srednje vrijednosti brzina detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak reciklirane gume.



Slika 10: Fotografija emulzijskog eksploziva smanjene gustoće s dodatkom 10 % reciklirane gume

Tablica 6: Srednje vrijednosti brzina detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak reciklirane gume

Omjer eksploziv/guma	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Izmjerena brzina detonacije, v_{dsred} (m/s)
100:0	0,409	2485
98:2	0,411	2004
96:4	0,416	2183
94:6	0,423	2416
98:2	0,425	2126
90:10	0,445	1704
88:12	0,468	-

4. Zaključak

Prezentirani rezultati istraživanja pokazuju da su mješavine na bazi emulzijske matrice i ekspaniranog polistirena uz moguće dodatke organskih materijala perspektivne za korištenje u gospodarskim miniranjima. Ispitivane mješavine pokazuju značajno smanjenje brzine gustoće uz zadržavanje stabilne detonacije, značajno i u malim promjerima eksplozivnih naboja. Smanjenje gustoće je postignuto do 0,4-0,5 kg/dm³, što predstavlja gotovo dvostruku manju gustoću u odnosu na ANFO eksploziv, koji je najmanje gust u kategoriji gospodarskih eksploziva. Ispitivani eksplozivi smanjenje gustoće zadržavaju zadovoljavajuće brzine detonacije uz smanjenje koje nije proporcionalno smanjenju gustoće. Na taj način osigurava se dovoljan iznos tlaka detonacijskih produkata u minskoj bušotini, a time i dovoljna distribucija kinetičke energije

potrebne za obavljanje rada u sredini koja se minira. Pokazano je da se dodatkom organskih materijala u odnosu na osnovnu mješavinu ekspaniranog polistirena i emulzijske matrice može dodatno regulirati brzina detonacije odnosno podešavati gustoća eksplozivne mješavine. Nadalje, dodatna pozitivna svojstva ispitivanih eksplozivnih smjesa iskazuju se kroz stabilnost tijekom duljeg vremenskog roka što omogućava i dulji period roka upotrebe, kroz značajnu stabilnost i neosjetljivost na iniciranje u normalnim uvjetima proizvodnje, skladištenja, transporta i upotrebe te otpornost na uvjete vlažne i zavodnjene minske bušotine. S obzirom na tehničke, te povoljne ekonomske značajke koje iz toga proizlaze eksplozivi smanjene gustoće na bazi emulzijske matrice, ekspaniranog polistirena i dodataka imaju perspektivu za korištenje u gospodarskim miniranjima.

5. Literatura

- [1] Baranov, E. G., Vedin, A. T., Bondarenko, I. F.: *Mining and Industrial Applications of Low – Density Explosives*, A.A.Balkema, (1996)
- [2] Rock, J., Maurer, A., Pereira, N.: Coming of Age for Low-Density Explosives, Proceedings of the 2005 Coal Operators' Conference, (2005) 175-179
- [3] Nielsen, K., Heltzen, A. M.: Recent Norwegian Experience with Polystyrene Diluted ANFO (ISANOL), 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, (1987) 231-238
- [4] Singh, A. K., Pingua, B. M. P., Nabiullah, M. K., Panda, M. K., & Akhtar, S.: Study and performance of low density emulsion explosive, *Performance of Explosives and New Developments*, (2013) 75-79
- [5] Anderson, C.J., Rosen, K.V., Gibb, A.W., Moen, I.O.: Detonation properties of explosive foams, Proc. of the Ninth Symposium (Intern.) on Detonation. Portland, (1989) 601.
- [6] Katsabanis, P.D., Rizk, M.: Underwater performance of polyurethane – PETN explosives. *Journal of Energetic Materials*, Dowden. Brodman & Devine inc., **10** (1992) 97-126
- [7] Heltzen, A.M. and Kure, K.: Blasting with Anfo/Polystyrene Mixtures, in Proceedings ISEE Annual Conference, Cleveland, (1979) 105-116
- [8] Rock, J.: Improving Blasting Outcomes Using SoftLOAD Low-Density Explosives. EXPLO 2004 Conference, (2004), 153-158
- [9] Hagan, T.N: Rock breakage by explosives. *Acta Astronaut*, **6** (1979) 3, 329-340
- [10] Heltzen, A. M., & Kure, K.: Blasting with ANFO/polystyrene mixtures. Annual Conference of International Society of Explosive Engineering, (1980) 105-116
- [11] Silva, G.C.O.: Development, Characterization and Application of a Reactive Bulking Agent for Wall Control, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, (2007).
- [12] Solov'ev, V.S., Attetkov, A.V., Boiko, M.M., Vlasova, L.N., Kramarenko, V.N., Chernov, A.I.: Experimental study of the mechanism of initiation of detonation in low-density explosives, *Combustion, explosion and shock waves*, **22** (1986) 469-472

- [13] Pal Roy, P., Sawmliana, C., Singh, R.K., Chakunde, V.K.: Effective blasting using mixture of ammonium nitrate, fuel oil, sawdust and used oil at limestone mine, *Mining Technology*, **121** (2012) 1, 46-51
- [14] Armstrong, L.W., & Moxon, N.T.: Low Shock Energy Emulsion Based Wet Hole Explosives. 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, (1990) 45-53
- [15] Katsabanis, P.D., Rizk, M.: Underwater performance of polyurethane – PETN explosives. *Journal of Energetic materials*, **10**, (1992) 97-126
- [16] Nifad'ev, V; Kalinina, N.: Gasification of foamed polystyrene during shock loading. *Combustion, Explosion and Shock Waves*; (1992), 630.
- [17] Nifad'ev, V; Kalinina, N.: Detonation mechanism in explosive mixtures containing polystyrene foam. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, (1992) 650
- [18] Hunter, C., Fedak, K., Todoeschuck, J.P.: Development of Low Density Explosives with Wall Control Applications, in Proceedings ISEE Annual Conference, Cleveland, (1993), 549-554
- [19] Harries, G., Gribble, D.P.: The development of a low shock energy explosive - ANRUB. *Rock Fragmentation by Blasting*, (1993) 379-386
- [20] Jackson, M.M.: Low Strength Water Gel Explosive. Annual Conference of International Society of Explosive Engineering, (1993) 493-499
- [21] Grouhel, P.H.J. And Hunsaker, R.D.: An Introduction to A Revolutionary Low Density Bulk Explosive For Surface Blasting Operations, In Proceedings Explo '95, Melbourne, (1995) 67-71
- [22] Brent, G.F., Armstrong L.W.: Large Diameter Presplitting Improved Trough Two Novel Techniques, in Proceedings of the Twenty-Fourth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, 8-11.02. 1998., New Orleans, ISEE, Cleveland, (1998) 511-521
- [23] Singh, A.K., Pingua, B.M.P., Nabiullah, M.K., Panda, M.K., & Akhtar, S.: Study and performance of low density emulsion explosive. *Performance of Explosives and New Developments*, (2013) 75-79
- [24] Beach, F., Gribble, D., Littlefair, M., Roundely, R., Testrow, I., & Wiggin, M.: BlastLite - The Practical Low-Density Solution. EXPLO 2004 Conference, (2004) 147-151
- [25] Golubev, V.K., Medvedkin, V.A.: Loading of obstacles by explosion of a low-density sheet explosive. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, **41** (2000) 3, 416-420
- [26] Golubev, V.K., Medvedkin, V.A.: Application of a low-intensity explosive loading method to ammunition dismantling. *Strength of Materials*, **33** (2001) 6, 605-606
- [27] Maranda, A., Cudzilo, S.: Explosive mixtures detonating at low velocity. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **26** (2001) 165-167
- [28] Akbari Mousavi, A.A., Burley, S.J., Al-Hassani, S.T.S.: Simulation of explosive welding using the Williamsburg equation of state to model low detonation velocity explosives. *International Journal of Impact Engineering*, **31** (2005) 6, 719-734
- [29] Sil'vestrov, V.V., Plastinin, A.V., Rafeichik, S.I., Gulevitch, M.A., Pai, V.V.: Explosive welding using the emulsion explosives. Xth International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (2010).

-
- [30] Perez Cordova, P.F., Cardenas Lopez, L.A.: Low density emulsion explosive. United States Patent, (2012)
- [31] Silva, G.C.O., Orlandi, C.P.: PANFO-A novel low-density dry bulk explosive. In *Performance of Explosives and New Developments* (2012) 81-90
- [32] Maranda, A., Drobysz, B., & Paszula, J.: Research on detonation parameters of low density emulsion explosives modified by microballoons. *Chemik*, **68** (2014) 1, 17-22
- [33] Kumar, S.: Implementation of Flexigel™ Bulk System: A case study of West Bokaro Colliery, Tata Steel Limited. 7th Asian Mining Congress, (2017) 283-290
- [34] Ershov, A.P., Rubtsov, I.A.: Detonation of Low-Density Explosives, *Combust Explos Shock Waves*, **55** (2019) 1, 114-120
- [35] Kumar, S., Kumar Mishra, A.: Reduction of blast-induced ground vibration and utilization of explosive energy using low-density explosives for environmentally sensitive areas, *Arabian Journal of Geosciences*, **13** (2020) 655