

**Dr Mirjana Anđelković-**  
**-Lukić, dipl. inž.**  
Tehnički opitni centar KoV,  
Beograd

## UTICAJ FLEGMATIZATORA NA BRZINU DETONACIJE OKTOGENA

UDC: 662.215.4/.5:66.022.3

### Rezime:

*Dodavanje određenih flegmatizatora granulisanim eksplozivima u završnoj fazi postupka dobijanja smanjuje njihovu osetljivost na mehaničke uticaje (udar i trenje) i omogućava lakšu dalju preradu. Flegmatizatori mogu biti inertni (prirodni-montan vosak i sintetski-polietilenski) i aktivni (eksplozivi TNT i FEFO). U radu je prikazan uticaj različitih flegmatizatora na fizičke i detonacione karakteristike granulisanog (flegmatizovanog) visokoengetskog eksploziva oktogena. Flegmatizovanost je određena preko stepena prekrivenosti površine kristala oktogena, pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM). To je mera adhezivnosti flegmatizatora na granulama kristalnog eksploziva i predstavlja značajnu karakteristiku u tehnologiji flegmatizacije.*

*Ključne reči: granulisani eksploziv, oktogen, flegmatizatori, adhezija, prekrivenost.*

---

## EFFECT OF BINDERS ON OCTOGEN DETONATION VELOCITY

### Summary:

*By the addition of different binders to explosives in the last phase of the production technology, octogen decreases sensibility to mechanical influences – impact and friction. They also make further alteration of grained explosives easier. Binders could be inert or active. Inert binders are natural waxes (montan) and synthetic (polyethylene type). Active binders are less sensible explosives (TNT or FEFO) than octogen. The research showed that the applied explosive binders have different effects on the performances of granular coated octogen. Sensibility, density, grain size, compressibility and detonation velocity are determined by considered methods. Wax coating of explosives is determined through the level of octogen crystal surface coverage by scanning electron microscopy (SEM). The degree of wax coverage may be considered as the measure of adhesion of explosive binders applied to explosive grains.*

*Key words: granular explosive, octogen, binders, adhesion, coating.*

---

### Uvod

Eksplozivi su hemijski stabilna jedinjenja, ali osetljiva na mehaničke uticaje, usled kojih dolazi do stanja burne reakcije sa krajnjim efektom eksplozije. U najopštijem slučaju, kada molekul eksploziva sadrži ugljenik, vodonik, kiseonik i azot, pri eksploziji nastaju reakcije oksidacije

ugljenika, vodonika i azota uz nastajanje produkata koji nisu eksplozivni.

Po usvojenoj definiciji, eksplozivi su hemijska jedinjenja koja u ekstremno kratkom vremenu oslobađaju veliku količinu gasova i, za razliku od ostalih (pneumatskih, električnih, nuklearnih) eksplozija, njihovo razlaganje se svrstava u hemijske eksplozije. Kako, shodno oslo-

bođenoj energiji, oslobođeni gasovi (gasoviti produkti detonacije) imaju visoku temperaturu, Sorrau je [1] definisao eksploziv kao „svako ono jedinjenje (ili smeša jedinjenja) koje je sposobno da se u veoma kratkom vremenu transformiše u vrele gasovite produkte“. Eksplozija je, dakle, proces veoma brzog stvaranja toplotne energije, praćen pojavom velike količine gasova pod pritiskom znatno većim od pritiska sredine u kojoj je nastala eksplozija.

Većina eksploziva, koji se koriste kao konvencionalni, spada u kristalna jedinjenja. Kako je njihova osetljivost na mehaničke uticaje, udar i trenje, velika, u naknadnoj tehnološkoj preradi dodaju im se flegmatizatori koji smanjuju njihovu osetljivost, a ne umanjuju krajnja dejstva. Kao flegmatizatori koriste se inertni materijali, voskovi i polimeri, i aktivni materijali – eksploziv trotil (trinitrotoluen, TNT) i jedinjenja tipa nitroformala u čijoj je strukturi vodonik zamenjen fluorom.

### **Uticaj flegmatizatora na karakteristike eksploziva**

Po svojoj prirodi flegmatizatori mogu da budu inertni i aktivni, mada podela nije stroga, naročito u odnosu na proces detonacije.

Teorijski, inertan flegmatizator je supstanca koja u zoni hemijske reakcije tokom detonacije i u toku pada pritiska koji prati detonaciju ne trpi nikakve promene, odnosno zadržava svoje fizičke karakteristike. Flegmatizator treba da zadrži svoj hemijski identitet, da ne menja stanje niti da apsorbuje energiju u vidu toplote. Takav flegmatizator ne postoji, jer čak i da je hemijski izuzetno stabilan,

neisparljiv i nezapaljiv, on se neizbežno zagreva u zoni hemijske reakcije [2, 3].

Eksplozivima se, zavisno od name, dodaju i razni oksidansi i metali, najčešće aluminijum [4], koji reaguju sa produktima detonacije, povećavajući unutrašnju energiju eksploziva [5, 6].

U aktivne flegmatizatore spadaju pojedini eksplozivi čija je osetljivost na mehaničke uticaje mnogo manja, te se mogu koristiti kao sredstva za smanjenje osetljivosti na mehanička dejstva, odnosno kao flegmatizatori za glavni eksploziv. Dodatak ovakvih aktivnih flegmatizatora ne umanjuje znatno energetski sadržaj eksploziva kome je dodat, već naprotiv, može da doprinese povećanju unutrašnje energije, kao pri primeni bis (fluoro-2,2,-dinitroetil)formala (FEFO) [7]. Zamena vodonika fluorom u molekulu doprinosi povećanju energetskih svojstava polaznog jedinjenja (eksploziva), dovodi do povećanja gustine i do smanjenja čvrste faze – ugljenika u produktima detonacije, odnosno doprinosi potpunijoj oksidaciji.

Svi materijali koji mogu da se koriste kao flegmatizatori eksploziva, pogodnim tehnološkim postupkom (mikrokapsulacija) raspodeljuju se u vidu filma na kristale osetljivog brizantnog eksploziva [8].

Flegmatizovani eksplozivi koriste se u punjenjima koja su izložena povišenim temperaturama (punjenja za rakete ispod krila supersoničnih aviona, punjenja za duboke naftne bušotine), pa je poželjno da flegmatizator, pored ostalih zahtevanih karakteristika, ima temperaturu topljenja iznad 100°C.

Od aktuelnih flegmatizatora zahteva se da uz minimalan sadržaj obezbede kompaktnost punjenja, poboljšaju mehaničke karakteristike otpreska i smanje

osetljivost na mehaničke uticaje (udar i trenje) eksploziva u kome se primenjuju.

Mehanizam lepljenja flegmatizatora na površinu granula eksploziva zasnovan je na silama adhezije koje su rezultat međusobnog neposrednog kontakta filma flegmatizatora sa čvrstom površinom eksploziva.

Cilj postupka flegmatizacije jeste da se adhezija ostvari na što je moguće većoj površini eksploziva, odnosno da se filmom flegmatizatora obuhvati maksimalan broj granula eksploziva. Pri kontaktu filma sa čvrstom površinom nastaju veze fizičke ili hemijske prirode.

U slučaju kada je adheziv (flegmatizator) nanet na granule supstrata (eksploziv), određivanje adhezije može se izvršiti posredno, merenjem odnosa flegmatizatorom zaposednute površine granula eksploziva prema ukupnoj površini neprekrivenih granula:

$$\theta = St/S_o \cdot 100\%$$

gde je:

$\theta$  – stepen prekrivenosti granula (%),

$St$  – površina zaposednuta flegmatizatorom ( $\text{cm}^2$ ),

$S_o$  – ukupna površina neprekrivenih granula eksploziva ( $\text{cm}^2$ ).

S obzirom na to da je procenat prekrivenosti eksploziva flegmatizatorom u neposrednoj vezi sa adhezivnošću flegmatizatora, proizilazi da je stepen prekrivenosti kvantitativni pokazatelj adhezije.

### Flegmatizacija oktogena

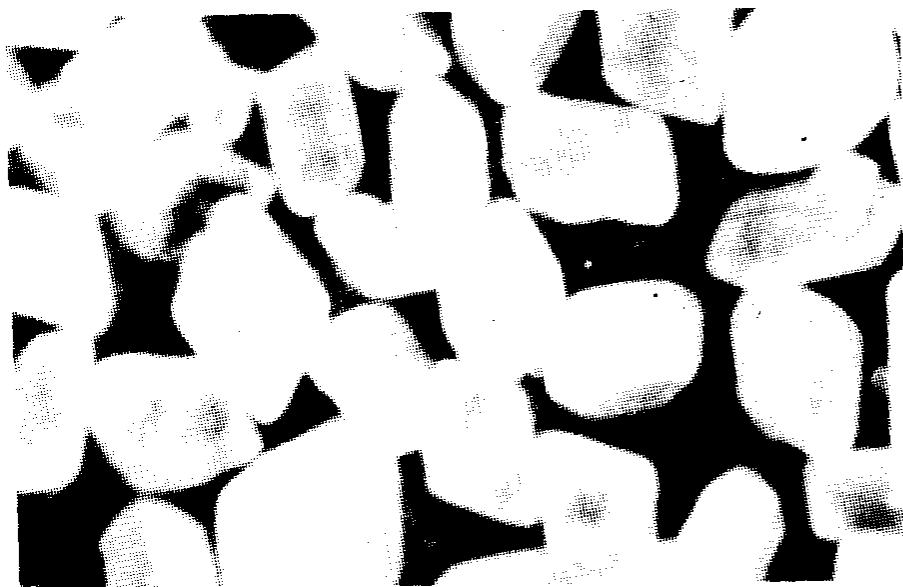
Visokobrizantni eksplozivi, u koje spada oktogen, flegmatizuju se voskova ili polimerima čiji je sadržaj ispod 10%. Ovakvi eksplozivi su u granulisa-

nom obliku i presuju se, bilo direktno u košuljicu bojne glave, bilo u posebno profilisanim alatima iz kojih se montiraju u bojne glave.

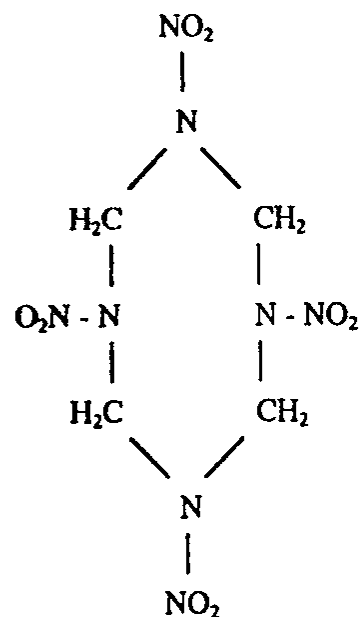
Oktogen je ciklični nitramin (ciklotetrametilentetranitramin, 1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazaciklooktan, HMX), postoji u četiri kristalne modifikacije, od kojih je samo jedna, beta-modifikacija stabilna (slika 1) [1].

Oktogen je prvi put izdvojen kao primesa eksploziva heksogena, pri sintezi sa anhidridom sirćetne kiseline. Sadržaj oktogena u tako dobijenom heksogenu iznosi oko 10%. Prisustvo oktogena u heksogenu doprinosilo je većoj osetljivosti heksogena, te je kao primesa bio nepoželjan. Kasnije je ovaj uticaj oktogena razjašnjen postojanjem nestabilnih kristalnih modifikacija oktogena.

Izdvajanjem oktogena kao primese iz heksogena, i ispitivanjem njegovih karakteristika, videlo se da je to eksploziv sa veoma dobrim energetskim karakteristikama. Njegova stabilna beta-modifikacija predstavlja termički veoma stabilan eksploziv (do  $200^\circ\text{C}$ ) i ima veliku gustinu koja mu daje odgovarajuće osobine. Termostabilnost oktogena omogućava primenu ovog eksploziva u punjenjima izloženim visokim temperaturama, u punjenjima kumulativne municije, u bojnim glavama raketa koje nose avioni nadzvučnih brzina, kao i za eksplozivna punjenja namenjena za miniranja u dubokim naftnim bušotinama. Oktogen spada u eksplozive veoma osetljive na mehanička dejstva, pa je neophodna njegova dopunska prerada – flegmatizacija. Kao flegmatizatori koriste se voskovi i polimeri. Polimeri se, s obzirom na visoku temperaturu topljenja, koriste u eksplozivnim sastavima koji su izloženi povišenim radnim temperaturama.



Sl. 1 – Beta-modifikacija kristalnog oktogena



Postupak flegmatizacije oktogena polimerima je [8]:

- polimeri se rastvaraju u rastvaraču koji je, u zavisnosti od prirode polimera, uglavnom nepolaran;
- rastvor se dodaje vodenoj suspenziji eksploziva;
- taloženje polimera na granule eksploziva može se izvesti destilacijom rastvarača pod smanjenim pritiskom i dodavanjem nerastvarača polimera (etilalkohola) usled čega dolazi do izdvajanja polimera iz sistema na granule eksploziva.

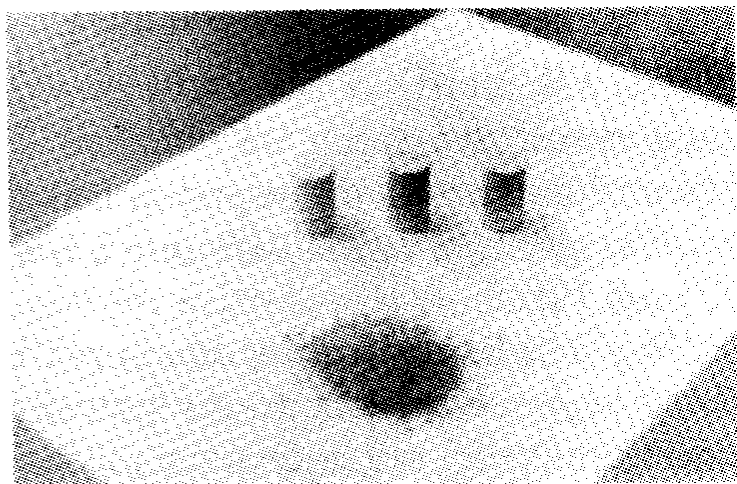
U oba slučaja nastaje granulisan flegmatizovani eksploziv.

Postupak flegmatizacije oktogena voskovima je jednostavniji. Prekrivanje se obavlja u vrućoj vodenoj suspenziji zagrejanoj do temperature ključanja vode, uz dodavanje voskova čija je temperatura topljenja niža od temperature ključanja vode. Pogodnim mešanjem i hlađenjem sistema dobija se granulisani proizvod. Najčešće korišćeni voskovi su montan (MV) i specijal (SP) koji se dobijaju rafinacijom mrkog uglja. Ovaj način flegmatizacije primenjuje se za flegmatizaciju oktogena trotilom, s obzirom na to da je temperatura topljenja trotila oko 80°C.

### Karakteristike flegmatizovanog oktogena

Flegmatizovani eksploziv je granulisani proizvod koji se primenjuje za presovana eksplozivna punjenja različitih kalibara municije. Uglavnom se koristi za kumulativnu municiju, zbog visokih energetske karakteristika i mogućnosti presovanja u tačno definisane dimenzije. Na slici 2 prikazan je izgled flegmatizovanog oktogena u rasutom stanju pre presovanja i u valjkastom obliku posle presovanja.

Pre nego što se primeni u sredstvu, svaki novi sastav flegmatizovanog eksploziva mora da ima sledeće definisane karakteristike: sadržaj flegmatizatora, gra-



Sl. 2 – Flegmatizovani oktogen u rasutom i presovanom stanju

nulometrijski sastav, nasipnu masu, osetljivost na mehaničke uticaje, kompresibilnost i brzinu detonacije. Pored ovih karakteristika, granulirani eksploziv mora da ima dobru pokretljivost granula, kako bi se bez teškoća mogao unositi u alat za presovanje. Takođe, veoma je bitno da tokom flegmatizacije ne dođe do stvaranja velikih granula (prečnik iznad 1000  $\mu\text{m}$ ), aglomerata sitnih granula eksploziva i flegmatizatora. U unutrašnjosti ovakvih granula mogu da postoje šupljine sa zarobljenim vazduhom. Na slici 3 prikazana je granula flegmatizovanog eksploziva u čijoj je unutrašnjosti vidljiva šupljina. U uslovima presovanja ove šupljine se ponašaju kao vruće tačke i mogu da izazovu inicijaciju detonacije eksploziva pri presovanju.



Sl. 3 – Šupljina u granuli flegmatizovanog okto-gena

Granulometrijski sastav flegmatizovanog eksploziva treba da obezbedi što veću nasipnu masu i da ne sadrži frakcije prečnika granula ispod 100  $\mu\text{m}$  i iznad 1000  $\mu\text{m}$  [9].

Različiti flegmatizatori imaju različit učinak koji ne zavisi samo od vrste flegmatizatora već i od njegovog masenog udela. Zbog toga je kontrola sadržaja flegmatizatora u flegmatizovanom eks-

plozivu posle proizvodnje neophodna i veoma stroga.

### Određivanje stepena prekrivenosti metodom elektronske mikroskopije

Ispitivanja su pokazala da sadržaj flegmatizatora u flegmatizovanom eksplozivu, utvrđen hemijskom analizom, nije uvek realan pokazatelj da je flegmatizacija uspešno izvršena [8], pa se u nemogućnosti primene neke druge metode proverava i vizuelno, posmatranjem pod mikroskopom. Ukoliko se konstatuje veće prisustvo neprekrivenih kristala eksploziva, smatra se da tehnološki postupak flegmatizacije nije uspešno izvršen. Međutim, u ovoj kvalitativnoj oceni flegmatizovanosti veliki uticaj ima individualni faktor koji se mora svesti na najmanju meru.

Jedan od načina kvantitativnog određivanja prekrivenosti eksploziva flegmatizatorom zasniva se na različitoj brzini rastvaranja flegmatizatora i eksploziva u odabranom rastvaraču, najčešće acetonu. Metoda se zasniva na propuštanju definisane zapremine rastvarača kroz nasut uzorak flegmatizovanog i kristalnog eksploziva. Upoređivanjem gubitka mase flegmatizovanog i kristalnog eksploziva posle kontakta sa rastvaračem za isti interval vremena i za istu količinu rastvarača, stepen prekrivenosti se izračunava preko izraza [10]:

$$\text{Stepen prekrivenosti} = \frac{G_{nf} - G_f}{G_{nf}}$$

gde je:

$G_{nf}$  – gubitak mase kristalnog eksploziva posle rastvaranja (g);

$G_f$  – gubitak mase flegmatizovanog eksploziva posle rastvaranja u istoj zapremini rastvarača (g).

Da bi se odredio stepen prekrivenosti ovom metodom uslov je da vreme kontakta rastvarača sa uzorcima kristalnog i flegmatizovanog eksploziva bude isto.

Prekrivenost se određuje i na drugi način – pomoću metode zasnovane na primeni skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM) [11].

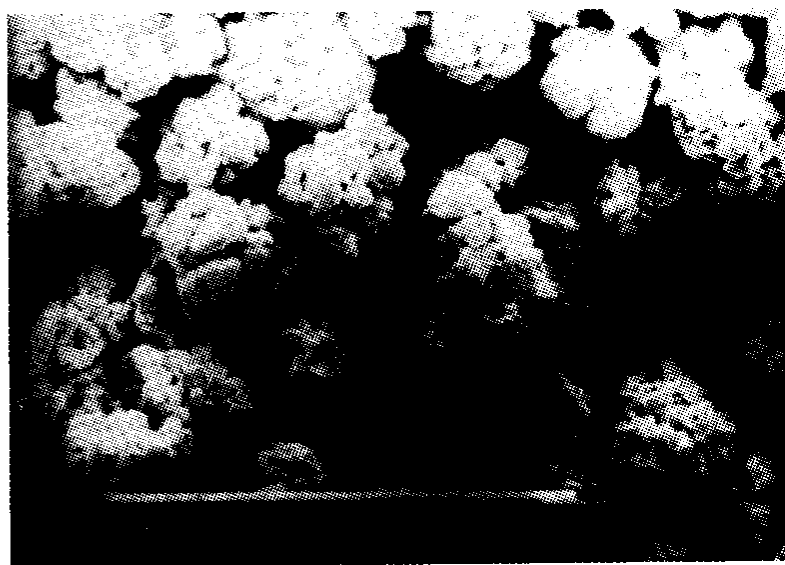
Mikroskopska analiza bilo kog uzorka flegmatizovanog eksploziva svodi se na analizu slike dobijene mikroskopom i vizuelnu konstataciju prekrivenosti. Da bi se dobila tačna informacija sa SEM-a, uzorak eksploziva, kao neprovodnika, mora da se pripremi za ispitivanje tako što se preko njega nanosi tanka elektroprovodna prevlaka koja prati morfologiju uzorka.

Za eksplozive je najbolja prevlaka od legure zlato/molibden, ali može da se koristi i prevlaka od čistog zlata. Naparavanje, odnosno nanošenje prevlaka, vrši se u vakuumu, a materijal od kojeg je izrađena prevlaka zagreva se u posebnim grejačima. Prevlaka od čistog zlata je bezbednija za nanošenje na uzorke, jer se ne nanosi termičkim naparavanjem, već uz pomoć jednosmerne struje.

Ova metoda zasnovana je na prethodnom ispitivanju površine neprekrive-



Sl. 4 – Kristalni oktogen (SEM)



Sl. 5 – Flegmatizovani oktogen (SEM)

nih kristala oktogena (slika 4), a zatim na ispitivanju granula flegmatizovanog oktogena (slika 5).

Uzorak u SEM-u bombarduje se elektronskim mlazom, prečnika 500 nm ili manjim. Mlaz pogađa samo jednu tačku uzorka u odgovarajućem vremenskom intervalu, pa se mlaz mora prevlačiti (skenirati) preko površine uzorka, kako bi se prikupili podaci za što više tačaka. Slika se projektuje na katodnu cev ili TV ekran tako da svaka tačka na ekranu odgovara tački sa uzorka. Intenzitet osvetljenosti tačke zavisi od intenziteta signala sa uzorka, a intenzitet tačke na ekranu od intenziteta signala sa uzorka. Postoje različiti tipovi signala: sekundarno izbijenih i elastično odbijenih elektrona, kao i signal struje uzorka. Za rad su optimalni signali elastično odbijenih elektrona i struje uzorka. Napon primarnog mlaza iznosi do 2 kV.

Stepen prekrivenosti određuje se upoređivanjem odnosa intenziteta signala sa čistog, kristalnog oktogena i flegmatizovanog oktogena. Intenzitet signala sa flegmatizovanog oktogena zavisi od količine flegmatizatora na površini kristala, pa je smanjenje intenziteta signala proporcionalno stepenu prekrivenosti. Re-

Tabela 1

Stepen prekrivenosti flegmatizovanog oktogena (95%)

Tip voska, polimera	Poli- etilen- ski	Mon- tan	Spe- cijal	Pol- lis- tiren	Poli- karbo- nat
Stepen prekrivenosti, %	70	65	58	60	55
Sadržaj flegmatizatora, %	5	5	5	5	5

zultati stepena prekrivenosti prikazani su za različite uzorke u tabeli 1.

Može se uočiti da je različit stepen prekrivenosti koji ostvaruju različiti flegmatizatori (aditivi). Najbolja prekrivenost postignuta je polietilenskim voskom i montan-voskom sadržaja 5%. Ovaj parametar može se smatrati merom adhezivnosti određenog aditiva na kristale primenjenog eksploziva, odnosno pokazateljem uspešnosti flegmatizacije.

### Određivanje brzine detonacije

Proces detonacije je veoma brz proces. Malo prisustvo flegmatizatora ne remeti proces detonacije, jer flegmatizator usled svoje inertnosti praktično ostaje hemijski nepromenjen u toku procesa detonacije. Proces detonacije je suviše kratkotrajan da bi mogao da inicira termičku reakciju razlaganja flegmatizatora, a sadržaj flegmatizatora od 3 i 5% je mali da bi mogao svojom inertnošću bitno da smanji brzinu detonacije. Brzina detonacije je određivana pomoću elektronskog brojača. Rezultati određivanja prikazani su u tabeli 2.

Rezultati brzine detonacije su različiti za uzorke sa istim masenim sadržajem flegmatizatora. Razlog ovoj pojavi je različita poroznost pojedinih presovanih

uzoraka, bez obzira na istu gustinu punjenja.

S obzirom na to da je brzina detonacije direktna funkcija gustine punjenja, eksplozivi iz tabele 2 trebalo bi da imaju iste brzine detonacije, jer im je ista gustina. Neki uzorci sadrže 5% flegmatizatora, inertne komponente, te bi se očekivalo da im brzine detonacije budu nešto niže od uzoraka sa 3% flegmatizatora. Eksperimentalni rezultati ne potvrđuju ova očekivanja. Uzrok ovoj pojavi je poroznost eksplozivnog punjenja. Presovani uzorci eksploziva sa 3% bilo kog flegmatizatora imaju različite poroznosti za iste gustine, što utiče na brzinu detonacije. Uzorak sa većom poroznošću, FO3PE ima manju brzinu detonacije od uzorka FO5PE čija je poroznost manja. Isti uticaj poroznosti vidi se i kod ostalih uzoraka flegmatizovanog oktogena.

Iz priloženih razmatranja se vidi da se, pored gustine punjenja, kao uslova za postizanje određenih brzina detonacije, i poroznost može smatrati jednim od fak-

Tabela 2

### Brzina detonacije

Red. br.	Oktogen + flegmatizator*	Gustina (kg/m <sup>3</sup> )	Poroznost (%)	Brzina detonacije (m/s)
1.	FO3PC	1750	5,63	8375
2.	FO3PS	1750	5,25	8398
3.	FO3PE	1750	5,55	8395
4.	FO3MV	1750	4,85	8484
5.	FO3SP	1750	4,34	8502
6.	FO5PC	1750	4,70	8437
7.	FO5PS	1750	4,58	8470
8.	FO5PE	1750	3,89	8521
9.	FO5MV	1750	4,64	8479
10.	FO5SP	1750	4,71	8419

\* broj 3. i 5. - % flegmatizatora, PC - polikarbonat, PS - polistiren, PE - polietilen, MV - montan vosak, SP - specijal vosak

tora koji utiču na brzinu detonacije presovanog punjenja eksploziva.

## Zaključak

Flegmatizator mora da bude hemijski inertan u odnosu na eksploziv i da omogućava dobru prekrivenost pri što je moguće manjem sadržaju u eksplozivu. Pored toga, neophodno je da smanji osetljivost eksploziva na mehaničke uticaje, kao i da omogući bezbedno presovanje i postizanje velikih brzina detonacije.

Uspešnost flegmatizacije, odnosno prekrivenosti eksploziva flegmatizatorom, kvantitativno se može odrediti pomoću metode selektivne brzine rastvaranja i pomoću metode skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM). Rezultati stepena prekrivenosti mogu se smatrati merom adhezivnosti filma flegmatizatora (polimera ili voska) na granuli kristalnog eksploziva oktogena.

Pored osnovne i prvobitno presudne funkcije smanjenja osetljivosti granulisanog eksploziva na mehaničke uticaje, flegmatizator bitno utiče na fizičke karak-

teristike otpreska – gustinu i poroznost, a samim tim i na brzinu detonacije.

## Literatura:

- [1] Calzia, J.: Les Substances Explosives et leurs Nuisances, Dunod, Paris, 1969.
- [2] Urbanski, T.: Chemistry and Technology of Explosives, volume 4, Pergamon Press, Oxford, 1984.
- [3] Walker, F. E.: A New Kinetics and the Simplicity of Detonation Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol. 19 1994, pp. 315–326.
- [4] Langen, P., Barth, P.: Investigation of the Explosive Properties of HMX/AL 70/30 Propellants and Explosives, vol. 4 1979, pp. 129–131.
- [5] Aljtšiler, L. V.: Osobenosti detonacii flegmatizirovanih VV Detonacia, vipusk II, Černogolovka 1981.
- [6] Keicher, T., Happ, A.: Kretschmer A., Influence of Aluminium / Ammonium Perchlorate on the Performance of Underwater Explosives, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol 24, 1999, br. 3, pp. 140–143.
- [7] Anđelković-Lukić, M.: Tendencije razvoja brizantnih eksploziva/, novembar-decembar 1998, br. 6, str. 681-690.
- [8] Anđelković-Lukić, M.: Flegmatizacija heksogena i oktogena polistirenom i polikarbonatom, magistarski rad, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1983.
- [9] Anđelković-Lukić, M.: Promena gustine presovanog punjenja flegmatizovanog oktogena u funkciji fizičkih osobina kristalnog oktogena, Naučno tehnički pregled vol. XLV, 1995, br. 6–7, str. 3–5.
- [10] Anđelković-Lukić, M., i dr.: Određivanje stepena prekrivenosti flegmatizovanog pentrita metodom početne brzine rastvaranja, Naučno tehnički pregled, vol. XXXV 1985, br. 7–8, str. 36–38.
- [11] Jovanić, P., Anđelković-Lukić, M.: Mogućnosti ispitivanja flegmatizovanih eksploziva skenirajućim elektronskim mikroskopom, JKEM, Lučani, 1988.