

TEORIJE LOMA STIJENE EKSPLOZIVOM

THEORIES OF ROCK BREAKAGE WITH EXPLOSIVES

VINKO ŠKRLEC, MARIO DOBRILLOVIĆ, VJEČISLAV BOHANEK

Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, p.p. 390, 10000 Zagreb.

Ključne riječi: miniranje, teorija loma stijene, zone oštećenja

Key words: blasting, rock breakage theory, damaged zones

Sažetak

Promatranje i predviđanje prirode i veličine zona oštećenja u stjennoj masi okolnoj minskoj bušotini kao i razumijevanje mehanizama frakturiranja i drobljenja stjenne mase jedan je od najvažnijih parametara potrebnih pri projektiranju miniranja radi dobivanja željene granulacije odminirane stjenne mase i smanjenja potencijalno štetnih utjecaja miniranja na okoliš. U radu je prikazan pregled objavljenih teorija drobljenja i loma stijene detonacijom oslobođene energije eksploziva.

Abstract

The prediction and observation of the nature and dimensions of damaged zones in the surrounding rock mass and understanding the mechanisms of fracturing and crushing of the rock mass with explosives is one of the most important parameters in blasting design in order to obtain preferred granulation and reduce damaging effects of blasting on the environment. An overview of existing rock breakage theories with the energy released by the detonation of explosives is given in this paper.

1. Uvod

Miniranje je postupak dobivanja mineralne sirovine korištenjem energije eksploziva. Pritom dolazi do složenog fizičko – mehaničkog procesa u kojem se u kratkom vremenu odvijaju brojni kemijski, termodinamički, hidrodinamički i fizikalni procesi.

Na osnovi dosadašnjih spoznaja o eksplozivnim tvarima i količini ostvarive energije pri detonaciji eksplozivnog punjenja u bušotini, te na osnovi spoznaja o djelovanju ostvarene energije u okolini minske bušotine postavljeno je više teorija kojima se opisuje proces miniranja odnosno proces lomljenja stijene.

Teorije miniranja opisuju djelovanje detonacijom oslobođene energije eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini na prostor koji se minira. Najzastupljenije od njih su:

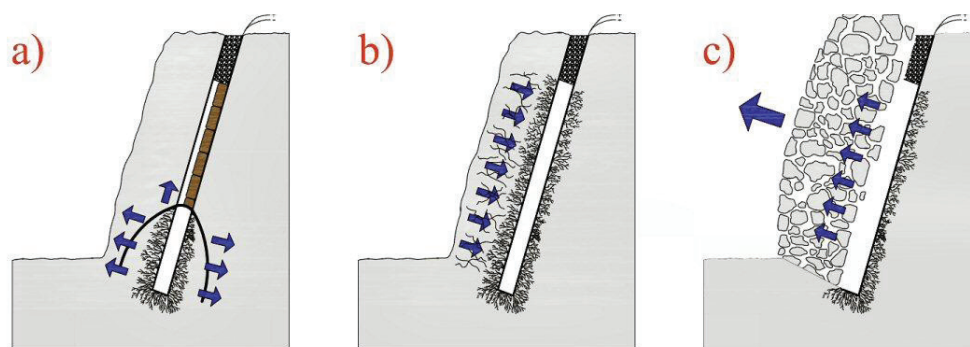
1. teorija refleksije valova naprezanja,
2. teorija ekspanzije plinova,
3. teorija međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala,
4. teorija loma savijanjem,
5. teorija valova naprezanja i ekspanzije plinova,

6. kombinirana teorija koja uključuje valove naprezanja, ekspanziju plinova, pukotine i refleksiju,
7. teorija jezgre ili valova naprezanja i pukotina i
8. teorija dinamičkih i statičkih tlakova.

Sve teorije miniranja pretpostavljaju dinamičko djelovanje miniranja, unutar četiri međusobno uvjetovana razdoblja miniranja (slika 1):

1. detonacija eksploziva u minskoj bušotini,
2. djelovanje tlačnog i vlačnog udarnog vala,
3. tlak plinovitih produkata i
4. pokretanje izlomljene mase.

Unutar tih faza stijena se nalazi u stanju značajnih naprezanja koja dovode do oštećenja stijene. Oštećenost stjenne mase se mijenja s povećanjem udaljenosti od minske bušotine koja je detonirala. Razlikuje se nekoliko zona u kojima se može odrediti karakter stupnja oštećenja i loma stijene.



Slika 1. Djelovanje detoniranog eksplozivnog punjenja u bušotini

Figure 1. The effect of a detonated explosive charge in the hole

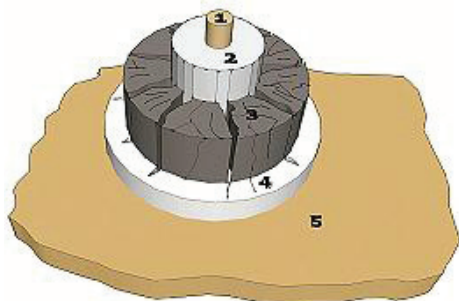
Kazalo:

- djelovanje tlačnog udarnog vala, u smjeru strelica, na okolinu minske bušotine nakon detonacije eksplozivnog punjenja u bušotini,
- djelovanje vlačnog udarnog vala, u smjeru strelica, na okolinu minske bušotine nastalih refleksijom tlačnih udarnih valova od slobodne površine i
- djelovanje tlaka plinovitih produkata, u smjeru malih strelica, na stjensku masu i pokretanje izlomljene stjenske mase u smjeru velike strelice.

2. Zone oštećenja stjenske mase miniranjem

Prilikom detonacije eksplozivno punjenje u minskoj bušotini prelazi iz čvrstog u plinovito stanje, pri čemu se oslobađa toplinska energija. Takva reakcija u zatvorenom i ograničenom prostoru, preko stlačenih plinova detonacije, izaziva naprezanja koja prelaze dinamičku tlačnu čvrstoću stijene. Posljedica toga je drobljenje i sitnjenje stijene u blizini minske bušotine te nastajanje frakturirane i oštećene zone u stijeni. Visoki tlakovi koji djeluju na stjenku bušotine drobe i sitne okolnu stijenu te uzrokuju intenzivna oštećenja oko minske bušotine. Oštećenost stjenske mase se smanjuje udaljavanjem od minske bušotine. Taj proces je toliko složen da je skoro nemoguće dati točan matematički opis (Hustrulid 1999).

Stupanj izdrobljenosti, oštećenja i frakturiranja oko minske bušotine može se podijeliti u pet područja po fazama odvijanja procesa. Područja djelovanja eksplozivnoga naboja u stjenskoj masi su prikazane na slici 2.



Slika 2. Područja djelovanja eksplozivnog punjenja minske bušotine (Dobrilović i Bohanek 2013)

Figure 2. Areas of influence of the borehole charge (Dobrilović & Bohanek 2013)

Kazalo:

- minska bušotina,
- područje drobljenja,
- frakturirano područje,
- malo frakturirano područje i
- neporemećena stijena.

U području drobljenja (područje 2), tlakovi djeluju na stjenku bušotine, intenzivno drobe i usitnjavaju stijenu neposredno oko minske bušotine. Pored zdrobljenog područja je značajno frakturirano područje 3. U tom području plastično deformiranje se javlja u obliku drobljenja, preko djelomičnog frakturiranja i odvajanja segmenata do radijalnih pukotina. Daljnje proširenje pukotina i njihovo napredovanje stijenom, u smjeru suprotnom minskoj bušotini, nastavlja se na pukotinama formiranim djelovanjem udarnoga vala i pospješuje se prodiranjem i ekspanzijom plinova detonacije. U sljedećem području (područje 4) vlačni lomovi i proširenje pukotina su manji jer se amplituda naprezanja značajno prigušila. Budući da je vlačna čvrstoća stijene približno desetina tlačne čvrstoće stijene, prisutna naprezanja dovoljnog su iznosa da uzrokuju stvaranje manjih radijalnih pukotina i širenje prije nastalih pukotina. Ulaskom valnoga poremećaja u peto područje, pojedinačne čestice medija, odnosno stijene osciliraju oko svog ravnotežnog položaja unutar elastične granice stijene, i u njoj ne nastaju trajna oštećenja. To je područje u kojoj seizmički valovi prelaze značajne udaljenosti i uzrokuju oscilacije tla te mogu pobuditi objekte na osciliranje, posebice u blizini minske polja (Dobrilović i Bohanek 2013).

Pojedini autori su opisivali zone oštećenja te su odredili radijuse udaljenosti pojedinih zona od minske bušotine.

Autori Prasad i Ozkahraman prikazuju veličine zona oštećenja samo za zonu drobljenja i zonu loma. Prema njima zona drobljenja ne prelazi područje izvan 4 radijusa minske bušotine. Dalje se nalazi područje loma koje se nalazi na 5 do 10 radijusa minske bušotine. Zonu pukotina definiraju kao seizmičku zonu ali je ne definiraju veličinom (Ozkahraman 2008).

Bhandari navodi da tlak detonacije slabi s udaljenošću od minske bušotine pa je veličina zone drobljenja ograničena na 2 do 4 radijusa minske

bušotine, a područje zone loma se nalazi na 20 do 50 radijusa minske bušotine (Bhandari 1997).

Hustrild je dao veličine zone drobljenja i granica loma za različite materijale (tablica 1). Veličine pojedinih zona izražene su u odnosu prema radijusu punjenja minske bušotine (Hustrild 1999).

Tablica 1. Veličine zona drobljenja i granica loma (Hustrild 1999)

Table 1. The sizes of crushed zones and fractured zones boundaries (Hustrild 1999)

Materijal / Material	Veličina zone drobljenja / The size of a crushed zone	Veličina granice loma / The size of a fractured zone boundary
Beton / Concrete	10 - 12,8	51,6
Granit / Granite	11 - 14	53,5 - 68,5
Vapnenac / Limestone	8 - 12	26,8 - 48,4

Djordjevic je 1999. godine predložio slijedeći izraz za izračun zone drobljenja (Esen et al 2003):

$$r_c = \frac{r_0}{\sqrt{24\sigma_t/p_b}} \quad (1)$$

gdje je:

- r_c – radijus zone drobljenja (m),
- r_0 – radijus minske bušotine (m),
- σ_t – vlačna čvrstoća stijene (Pa) i
- p_b – tlak koji djeluje na stjenku bušotine (Pa).

Općenito gledajući, smatra se da tlak koji djeluje na stjenku bušotine, p_b , ima vrijednost polovice vrijednosti tlaka detonacije te se može prikazati slijedećim obrascem (Persson et al 1993):

$$p_b = \frac{1}{2} p_d \quad (2)$$

gdje je:

p_d – tlak detonacije (Pa).

Odnosno:

$$p_b = \frac{\rho v_d^2}{8} \quad (3)$$

gdje je:

- ρ – gustoća eksplozivne tvari (kg/m^3) i
- v_d – brzina detonacije (m/s).

Kanchibotla et al su 1999. godine predložili slijedeći izraz za izračun zone drobljenja i to u funkciji radijusa minske bušotine, tlaka detonacije i tlačne čvrstoće stijene (Esen et al 2003):

$$r_c = r_0 \sqrt{\frac{P_d}{\sigma_c}} \quad (4)$$

Zagreba smatra da se veličina zone drobljenja kreće od 3 do 5 radijusa minske bušotine. Veličina zone loma je definirana kao zona izvan područja detonacijom nastalih radijalnih pukotina unutar kojih nastaje vrlo komplicirana struktura pukotina pa je eksperimentalno

vrlo teško odrediti veličinu zone loma, a granica zone loma se nalazi na udaljenosti od 40 do 50 radijusa minske bušotine od središta detonacije (Zagreba 2003).

Esen et al su predstavili novi model za predviđanje zone drobljenja i to na osnovu ispitivanja u betonskim blokovima. Zaključili su da je omjer radijusa zone drobljenja i radijusa minske bušotine (r_c/r_0) u funkciji vrste eksploziva, svojstava stijene i radijusa minske bušotine (Esen et al 2003).

Dessureault na osnovu detoniranja ANFO-eksploziva u minskoj bušotini navodi veličine pojedinih zona oštećenja, a koje su prikazane u tablici 2 (Dessureault 2004).

Tablica 2. Veličine zona oštećenja (Dessureault 2004)

Table 2. Sizes of damaged zones (Dessureault 2004)

Zona oštećenja / Damaged zone	Veličina zone oštećenja / The size of a damaged zone
Zona drobljenja / Crashed zone	4 – 6 radijusa minske bušotine / borhole radius
Zona loma / Fractured zone	12 – 15 radijusa minske bušotine / borhole radius
Zona pukotina / Cracked zone	50 – 60 radijusa minske bušotine / borhole radius

Li Chun-ru i daje 2009. godine izraze po kojima se mogu izračunati veličine pojedinih zona oštećenja (Li Chun-ru 2009).

Li Chun-ru za radijus I. zone (zona drobljenja) smatra da je nekoliko puta manji od radijusa eksplozivnog punjenja minske bušotine, a izrazi za izračun veličine zone drobljenja su (Li Chun-ru 2009):

$$r_c = \left(0,2 \rho_s \frac{c_p^2}{\sigma_c}\right) R_b \quad (5)$$

$$R_b = \sqrt[4]{\frac{p_b}{\sigma_0 r_b}} \quad (6)$$

$$\sigma_0 = \sigma_c \sqrt[4]{\rho_s \frac{c_p}{\sigma_c}} \quad (7)$$

gdje je:

- ρ_s – gustoća stijene (kg/m^3),
- c_p – brzina zvučnog vala u stijeni (m/s),
- R_b – radijus pukotina nastalih detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini (m),
- σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća stijene (Pa) i
- σ_0 – troosna čvrstoća stijene (Pa).

Prema njemu, radijus II. zone (zona loma) moguće je izračunati primjenom teorije elastičnosti i kriterija za procjenu čvrstoće stjenke uz pretpostavku da je kvazi-statički tlak koji djeluje na stjenke bušotine posljedica tlaka ekspanzije plinova (Li Chun-ru 2009).

Izrazi za izračun veličine zone loma su u tom slučaju:

$$R_p = \sqrt{\frac{p_j}{\sigma_t}} r_b \quad (8)$$

$$p_j = \frac{1}{8} \rho_s v_d^2 \left(\frac{r_c}{r_b}\right)^6 \quad (9)$$

gdje je:

R_p – radijus zone loma (m),

p_j – kvazi-statički tlak (tlak nastao uslijed ekspanzije plinova) koji djeluje na stjenke bušotine (Pa),
 σ_t – vlačna čvrstoća stijene (Pa),
 r_b – radijus minske bušotine (m) i
 r_c – radijus eksplozivnog punjenja minske bušotine(m).

III. zona je područje nezahvaćeno pukotinama jer s udaljenošću tlakovi udarnog vala i ekspandirajućih plinova previše oslabe da bi mogli prouzročiti bilo kakvo oštećenje stjenske mase nego samo uzrokuju vibracije (Li Chun-ruí 2009).

Izraz za izračun veličine III. zone glasi:

$$R_s = (1,5 \sim 2,0) \cdot \sqrt[3]{q} \quad (10)$$

gdje je:

R_s – radijus zone vibracija (m) i

q – specifična potrošnja eksploziva (kg/m^3).

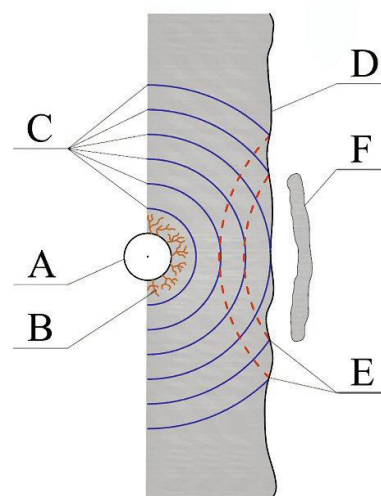
3. Teorije miniranja – modeli loma stijene energijom eksploziva

Teorije miniranja prezentirane su zajedno s faktorima koji utječu na lom, frakturiranje, fragmentaciju i općenite kriterije projektiranja miniranja. Teorije miniranja formulirane su na iskustveno ustanovljenim pretpostavkama i na laboratorijskim ispitivanjima, istraživanjima na terenu te ostalim, poznatim matematičkim i fizikalnim modelima.

3.1. Teorija refleksije (reflektirani valovi naprezanja)

Stariji autori Obert i Duvall, Hino i Duvall i Atchison su 50-ih godina prošlog stoljeća analitički pokušali objasniti mehanizam loma stijene prilikom detonacije eksplozivnog punjenja u minske bušotine blizu slobodne površine. S obzirom da je stijena manje otporna na vlačna naprezanja odnosno vlačna čvrstoća je manja od tlačne čvrstoće stijene, isticali su dominantnu ulogu vlačnih valova nastalih refleksijom od slobodne površine tlačnih udarnih valova u procesu miniranja. Prema njima ekspanzijski rad plinova s visokom temperaturom i pod visokim tlakom neznatno utječe na rezultate miniranja. Tlak plinova djeluje na stjenku minske bušotine i stvara tlačni udarni val s visokom amplitudom tlaka koji drobi stijenu u neposrednoj okolini bušotine. S obzirom da takav tlačni udarni val izaziva naprezanja i deformacije u stjenskoj masi naziva se još i tlačni deformacijski val odnosno val naprezanja. Veličina zone drobljenja stijene oko bušotine je relativno mala. Val napreduje radijalno u svim smjerovima brzinama koje su veće od brzine zvuka u mediju kojim val prolazi. Refleksijom tlačnog udarnog vala od slobodne površine nastaje vlačni udarni val koji se vraća nazad prema mjestu detonacije. Obzirom da je vlačna čvrstoća stijene mala u odnosu na tlačnu čvrstoću, kombiniranim djelovanjem vlačnih i tlačnih valova dolazi do odlamanja segmenata stijene na slobodnoj površini (Antičević 2011; Ester 1996; Hino, 1956).

Osnovni koncept loma refleksijom prikazan je na slici 3.



Slika 3. Osnovni koncept teorije refleksije (Antičević 2011; Ester 1996)

Figure 3. The basic concept of the theory of reflection (Antičević 2011; Ester 1996)

Kazalo:

- A – minska bušotina – detonacija eksplozivnog punjenja,
- B – zona drobljenja zidova bušotine,
- C – propagiranje tlačnog deformacijskog vala u svim smjerovima od minske bušotine,
- D – slobodna površina,
- E – dio tlačnog deformacijskog vala putuje prema van, a dio se reflektira od slobodne površine kao vlačni val, dolazak drugog tlačnog vala do slobodne površine (ponavlja se postupak odvajanja segmenata slobodne površine) i
- F – odlom segmenata slobodne površine (ljudskanje stijene).

3.2. Teorija ekspanzije plinova

Ovu teoriju zastupaju Persson et al. i Johansson i Persson, koji tvrde da se radijalne pukotine formirane udarnim valom, šire i produljuju zajedničkim radom reflektiranog vlačnog vala i plinovima pod visokim tlakom koji ekspandiraju u novonastalim pukotinama (Ester 1996; Persson et al 1970).

Ustanovili su da se na udaljenosti od približno 2 radijusa od stjenke minske bušotine formiraju radijalne pukotine koje se nastavljaju širiti kroz stijenu prema slobodnoj površini i natrag prema bušotini. Najveći broj radijalnih pukotina formira se odmah do stjenke bušotine, a u manjem broju nastaju i dalje od bušotine. Do odlamanja stijene doći će tek kad te pukotine stignu do slobodne površine (Ester 1996).

Porter i Fairhaust te Langefors i Kihlstrom tvrde da je tlak plinova dovoljno visok za proširenje radijalnih pukotina dok Kutter i Fairhurst tvrde da ovaj tlak ima utjecaj samo na izdizanje stjenskog materijala. Snimke miniranja snimljene brzim kamerama pokazuju da dolazi do dodatne fragmentacije tijekom ekspanzije plinova koji dižu stjensku masu i odbacuju je s etaže (Antičević 2011; Ester 1996).

Coursen, Britton et al i Brinkman navode tlak ekspandirajućih plinova kao glavni mehanizam loma stijene eksplozivom. Za ostale mehanizme loma tvrde da ne pridonose u značajnijoj mjeri lomu stijene (Coursen 1980; Britton et al 1984; Brinkman 1987).

Osnovne karakteristike teorije ekspanzije plinova su:

- radijalne pukotine ne nastaju neposredno uz bušotinu nego na udaljenosti od približno dva radijusa bušotine i protežu se od bušotine prema slobodnoj površini i
- pomak stijene ne događa se sve dok radijalne pukotine pod tlakom ekspandirajućih plinova ne dođu do slobodne površine. (Antičević 2011)

3.3. Teorija međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala

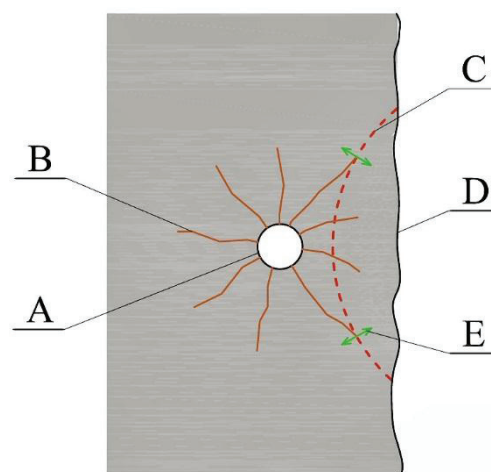
Slično teoriji ekspanzije plinova, autori Field i Ladeguaard-Pedersen su istraživali međusobni odnos između radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog tlačnog vala. Istraživanja su provedena u laboratoriju na modelima od pleksistakla. **Pleksistaklo** ili akrilno staklo, kao produkt poliakrilnih smola, vrlo je tvrd, teško lomljiv i otporan materijal te kao takav pogodan je za istraživanja učinka eksploziva u laboratorijskim uvjetima. Istraživanja su pokazala važnost interakcije širenja radijalnih pukotina i vlačnog vala koji nastaje na slobodnoj površini uslijed refleksije početnog udarnog ili tlačnog vala (Antičević 2011; Ester 1996).

Detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini tlačni udarni val putuje sferično u svim smjerovima od mjesta pobude, te na svom putu stvara radijalne pukotine. Dolaskom do slobodne površine tlačni val se reflektira i vraća u obliku vlačnog vala. Interakcija između reflektiranog vala i radijalnih pukotina dovodi do povećanja brzine širenja pukotina koje su skoro paralelne s frontom reflektiranog vlačnog vala (Antičević 2011; Ester 1996).

Vlačni valovi povećavaju vlačna naprezanja na vrhu tih pukotina koje su paralelne zakrivljenoj fronti vlačnog vala. Uslijed toga se pukotine razvijaju u smjeru pod kutom od $45^\circ - 80^\circ$ od okomice na slobodnu površinu. Takve pukotine će se širiti većom brzinom od ostalih pukotina, a relaksacijom okolnog materijala njihova brzina svesti će se na brzinu ostalih pukotina (Antičević 2011; Ester 1996).

Ova teorija potvrdila je ranije rezultate istraživanja od strane istraživača Persson, Ladegaard-Pedersen i Kihlström.

Interakcija između radijalnih pukotina i reflektiranog vlačnog vala prikazana je na slici 4.



Slika 4. Interakcija između radijalnih pukotina i reflektiranog vlačnog vala (Ester 1996)

Figure 4. The interaction between radial cracks and reflected tensile wave (Ester 1996)

Kazalo:

- A – minska bušotina – detonacija eksplozivnog punjenja,
- B – radijalne pukotine,
- C – vlačni val reflektiran od slobodne površine,
- D – slobodna površina,
- E – vlačna naprezanja.

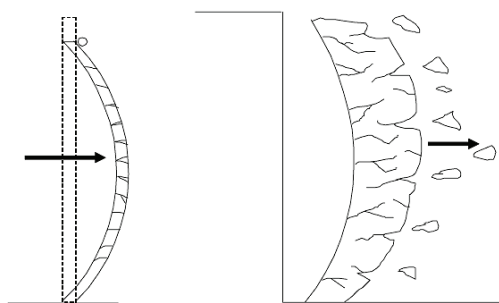
3.4. Teorija ekspanzije plinova – lom savijanjem

U ovoj teoriji, kao i u prethodne dvije, tlak plinova se smatra glavnim uzrokom loma stijene. Autor Ash smatra da tlak plinova uzrokuje lom stijene i to u iznosu od 90 % energije potrebne za lom stijene savijanjem, dok tlak detonacije sudjeluje sa samo 10 % energije (Ash 1973).

Tlak detonacije djeluje trenutno prema bilo kojem dijelu stijenke minske bušotine, dok se tlak plinova duže zadržava, sve dok se ne formira proširena šupljina (Ash 1973).

Formiranje radijalnih pukotina je samo na ravninama paralelnim s osi bušotine, ali pod uvjetom direktnog kontakta s eksplozivnim punjenjem, odnosno u neposrednoj blizini stijenke bušotine, gdje se stvaraju tangencijalna naprezanja. Lom refleksijom tlačnog vala od slobodne površine je zanemariv. Tlak plinova uzrokuje radijalne pukotine koje napreduju izbojnicom do slobodne površine i dovodi do pomaka stijene pomoću savijanja u smjeru najmanjeg otpora (Haghighi et al 1985).

Lom stijene savijanjem je analogan savijanju i lomu grede kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5. Model savijanja i loma grede poslije detonacije (Antičević 2011; Atlas Powder Company 1987)

Figure 5. The model of bending and breaking beams after detonation (Antičević 2011; Atlas Powder Company 1987)

3.5. Teorija valova naprežanja i ekspanzije plinova

Na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja na homogenom materijalu od pleksistakla i na modelima stijena postavljen je koncept teorije loma stijene valovima naprežanja i ekspanzije plinova. Teorija, koju su iznijeli autori Kutter i Fairhurst, kao glavne mehanizme loma stijene navodi valove naprežanja i tlak nastao ekspanzijom plinova (Antičević 2011).

Udio energije udarnog vala je manji dio ukupno oslobođene energije eksplozivnog naboja, međutim dovoljnog je iznosa da uzrokuje ekstenzivan lom u blizini bušotine. Mjerenja u granitu su pokazala da taj udio iznosi 10 % – 18 %, dok je u soli samo 2 % – 4 %. Ostatak energije otpada na tlak plinova (Ester 1996).

Zona radijalnih pukotina je prvi sistem pukotina koji se razvija oko proširene bušotine, te odmah do nje nastaje prsten radijalnih pukotina koje su međusobno na većem razmaku. Po ovoj teoriji širina zone radijalnih pukotina ovisi o:

- vlačnoj čvrstoći stijene,
- brzini prostiranja valova u stijeni,
- tlaku ostvarenom detonacijom eksplozivnog punjenja,
- svojstvima korištenog eksploziva i
- količini apsorpcije energije od strane stjenke mase (Dowding i Aimone 1992).

Prema istraživanjima autora promjer frakturirane zone za koncentrirana punjenja ili naboje iznosi približno 6 promjera bušotine i 9 promjera za izdužene naboje (Antičević 2011; Ester 1996).

Kao glavni zaključak ove teorije navodi se da valovi naprežanja i plinovi pod visokim tlakom nisu zasebno nego isključivo zajednički odgovorni za lom i frakturiranje stijene (Dowding i Aimone 1992).

3.6. Kombinirana teorija koja uključuje ekspanziju plinova, valove naprežanja, pukotine i refleksiju

Ovu teoriju su razvili Lang i Favreau, a proširili su je Hagan, Persson i Oriard. Mehanizam loma stijene je podijeljen u tri faze.

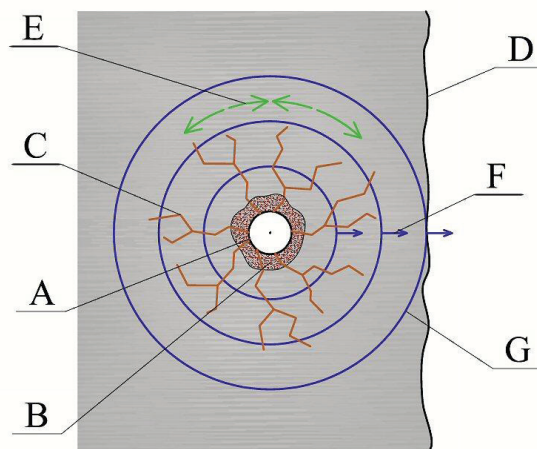
U prvoj fazi, detonacijom eksplozivnog naboja, u nekoliko milisekundi stvara se visoka temperatura i plinovi pod visokim tlakom. Kada detonacijski val, koji putuje brzinom od 2000 m/s do 6000 m/s, uđe u stijenu, udarni tlačni val drobi stjenku masu oko bušotine na udaljenosti od 1 do 2 promjera eksploziva (Ester 1996).

Fronta tlačnog vala se širi, razina naprežanja brzo opada ispod vrijednosti dinamičke tlačne čvrstoće stijene, zdrobljena zona dolazi pod utjecaj intenzivne radijalne kompresije, koja uzrokuje tangencijalna vlačna naprežanja. Kada ta naprežanja prijeđu dinamičku vlačnu čvrstoću stijene stvaraju se radijalne pukotine (Dowding i Aimone 1992).

Dubina prodiranja radijalnih pukotina ovisi o energiji eksploziva i parametrima čvrstoće stijene, i može iznositi 40 do 50 puta više od promjera bušotine.

Prilikom prolaska tlačnog vala kroz stijenu, koncentrične pukotine radijalno ekspandiraju, što rezultira rasterećenjem naprežanja u pukotinama u neposrednoj blizini bušotine. Te koncentrične pukotine nastaju iza cilindričnih površina i postupno se formiraju sve bliže slobodnoj površini (Ester 1996).

Prva faza mehanizma loma stijene prikazana je na slici 6.



Slika 6. Prva faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996)

Figure 6. The first stage of the rock breaking mechanism according to the combined theory (Antičević 2011; Ester 1996)

Kazalo:

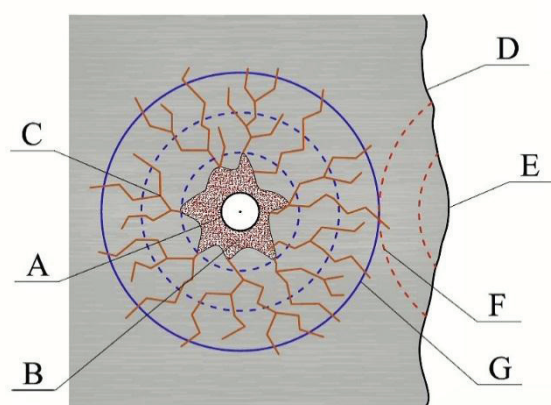
- A – miska bušotina,
- B – zdrobljena zona,
- C – radijalne pukotine,
- D – slobodna površina,
- E – tangencijalna naprežanja,
- F – fronte tlačnih valova i
- G – tlačni udarni valovi.

U drugoj fazi, kada udarni val dođe do slobodne površine, reflektira se na način da tlak naglo padne na negativnu vrijednost te se formira vlačni val. Vlačni val vraća se nazad u stijenu, a s obzirom da materijal pruža manji otpor na vlak nego na tlak, nastaju primarne pukotine sloma zbog premašivanja vlačne čvrstoće stijene. Ako su ta vlačna naprežanja dovoljno velika, ona mogu uzrokovati ljuštenje (odlamanje) slobodne površine. U lomu stijene, čini se da je efekt ljuštenja od

sekundarnog značenja. Autori ove teorije navode da naprezanja u stjenjnoj masi, nastala djelovanjem eksploziva, moraju biti reda veličine 8 puta veća od normalnih naprezanja da bi uzrokovala slom stjenjske mase djelovanjem isključivo (samo) reflektiranog udarnog vala (Antičević 2011; Hartman 1992)

U prvoj i drugoj fazi djelovanje energije udarnog vala priprema stijenu na način da inducira brojne male pukotine. Mišljenje autora je da energija udarnog vala u većini slučajeva iznosi samo 5 % do 15% ukupne energije eksploziva. To ukazuje da udarni val nije direktno jedino odgovoran za lom stjenjske mase, ali priprema uvjete za daljnje faze procesa loma (Antičević 2011; Dowding i Aimone 1992).

Druga faza mehanizma loma stijene prikazana je na slici 7.



Slika 7. Druga faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996)

Figure 7. The second stage of the rock breaking mechanism according to the combined theory (Antičević 2011; Ester 1996)

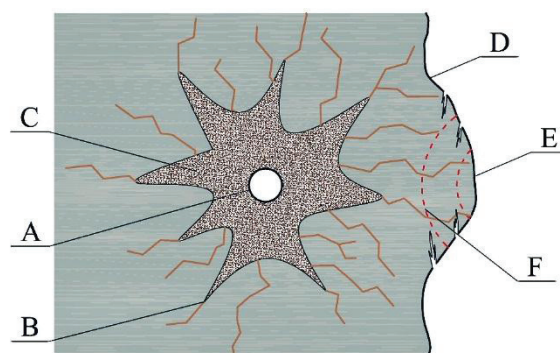
Kazalo:

- A – minska bušotina,
- B – proširenje zdrobljene zone,
- C – proširenje radijalnih pukotina,
- D – slobodna površina,
- E – početak ljuštenja,
- F – reflektirani vlačni valovi i
- G – tlačni udarni valovi.

U trećoj fazi dolazi do rasterećenja stijene uslijed radijalne ekspanzije i refleksije tlačnog vala te je plinovima omogućena ekspanzija i time otvaranje pukotina nastalih udarnim valom i početak izbacivanja stijene u smjeru slobodne površine (Hartman 1992).

Tu fazu karakterizira stvaranje „kupole“ oko bušotine. Kako se taj proces odvija uslijed efekta ekspandirajućih plinova, tako nastaje značajan broj novih pukotina zbog posmičnog loma stjenjske mase prilikom ljuštenja (ljučenja) stijene u smjeru slobodne površine (Antičević 2011).

Treća faza mehanizma loma stijene prikazana je na slici 8.



Slika 8. Treća faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996)

Figure 8. The third stage of the rock breaking mechanism according to the combined theory (Antičević 2011; Ester 1996)

Kazalo:

- A – minska bušotina,
- B – nastavak proširenja radijalnih pukotina,
- C – ekspanzija plinova pod visokim tlakom,
- D – slobodna površina,
- E – odbacivanje materijala i
- F – reflektirani vlačni valovi.

3.7. Teorija jezgre ili valova naprezanja i pukotina

Na sveučilištu Maryland 70-ih godina 20. st. razvijena je i definirana tada nova teorija, pri čemu su laboratorijska ispitivanja provedena na modelima od homelita-100 i to najprije u homogenim modelima, a kasnije dodavanjem pukotina koje su simulirale geološke diskontinuitete sa svrhom približavanja modela stvarnim uvjetima na terenu. Istraživanju i razvijanju ove teorije pridonijeli su brojni autori Forney, Dally, Rossmannith i Forney, Forney i Barker (Antičević 2011; Ester 1996; Perrson et al 1993).

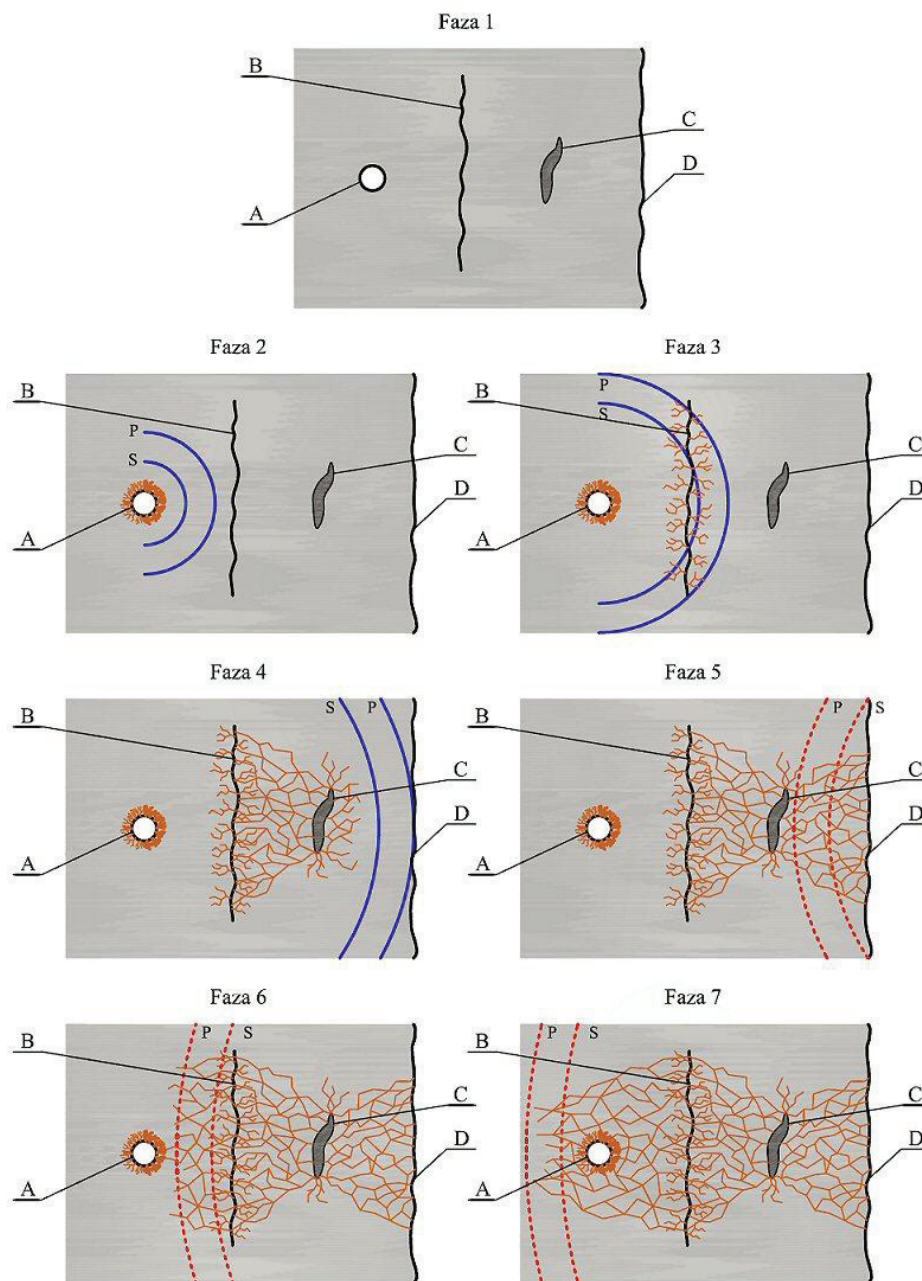
U ovoj teoriji, za razliku od do sada navedenih, autori su pokazali da su valovi naprezanja dominantni i vrlo značajni u procesu fragmentacije i da uzrokuju značajnu količinu pukotina u zonama koje su udaljenije od bušotine. Takve zone su definirane različitim diskontinuitetima i pukotinskim sklopovima koji djeluju kao jezgra ili epicentar za daljnje formiranje, razvoj i ekstenziju pukotina (Scoble 1997; Rossmannith et al 1987).

Prema ovoj teoriji, stvarni mehanizam propagiranja udarnih valova i njihove interakcije u oštećenom mediju vrlo je kompleksan, te uključuje slijedeće faze (Rossmannith 2002):

- detonacija eksplozivnog punjenja u bušotini,
- proširenje pukotina oko bušotine,
- ekstenzija zdrobljene zone,
- dinamička stabilnost pukotina,
- početak nastanka oštećenja,
- brzo propagiranje valova i deformacija stjenjske mase,
- grananje pukotina,
- interakcija pukotina i reflektiranih valova,
- nestabilnost u smjeru pukotine i
- slučajni progresivni lom.

U neoštećenom materijalu samo 8 do 12 dominantnih pukotina uspije prijeći usku zonu oko bušotine i doseći značajne udaljenosti. Te pukotine ne utječu na fragmentaciju materijala. U materijalu koji sadrži pukotine fragmentacija je drugačija. (Ester 1996; Ghosh et al 1995).

Na slici 9. prikazana je simulacija geološkog sklopa stjenke, pri čemu su između minske bušotine i slobodne površine smještene dva diskontinuiteta različitih oblika, vlačna pukotina i malo oštećenje. Osim navedenog, ostale površine u mediju su homogene i nemaju oštećenja.



Slika 9. Shematski prikaz teorije jezgre ili valova naprezanja i pukotina (Antičević 2011; Ester 1996)

Figure 9. The scheme of the stress waves and fracture theory (Antičević 2011; Ester 1996)

Kazalo:

A – minska bušotina,

B – diskontinuitet – vlačna pukotina,

C – diskontinuitet – oštećenje,

D – slobodna površina,

P – elastični longitudinalni val (primarni) i

S – elastični transverzalni val (sekundarni).

Faza 1 na slici 9 predstavlja izgled geološkog sklopa neposredno prije detonacije eksplozivnog punjenja minske bušotine. Detonacijom eksplozivnog punjenja minske bušotine tlačni valovi, P i S, prelaze na stjensku masu i šire se radijalno u svim smjerovima (slika 9, faza 2). Prolaskom P i S valova dolazi do iniciranja i aktivacije frakturiranja na mjestima oštećenja u mediju bez obzira na blizinu i prisutnost slobodne površine (slika 9, faza 3). Kada P val dođe do slobodne površine, (slika 9, faze 4 i 5), reflektira se i putuje natrag kroz medij kao vlačni val. Na povratku susreće se sa S valom i stvara interferencije koje omogućavaju stvaranje novih pukotina ili širenje već postojećih pukotina. Novonastali sistem valova (PP, PS, SP, SS, PP i S, PS, i S) nastaje refleksijom od slobodne površine ili od oštećenja u mediju i pridonosi daljnjem proširenju pukotina (slika 9, faze 6 i 7). Važno je primijetiti da pukotine nastaju na većim udaljenostima od bušotine tako da kombinirano djeluju P i S valovi, s time da kod tog kombiniranog djelovanja od P vala djeluje kraj vala, kod S vala fronta vala (Antičević 2011, Ester 1996).

Ova teorija koja uključuje interakciju valova napreznja i oštećenja u materijalu kao izvor i centar stvaranja i proširenja pukotina postaje sve popularnija, pa se koristi i u računalnim modeliranjima. Postoje razni pristupi ovom modeliranju, ali osnove su iste i to da su udarni i/ili valovi napreznja odgovorni za frakturiranje i fragmentaciju materijala, a tlak plinova zajedno s impulsom koji nastaje detonacijom djeluju u smislu pomicanja razlomljenog materijala i ne pridonose značajno fragmentaciji (Antičević 2011; Forney et al 1974).

Za daljnji razvoj teorije zaslužni su Winzer i Ritter i to na osnovi pokusa koje su izveli u mjerilu 1:1 u stijeni. Njihovi rezultati govore o utjecaju valova napreznja na stvaranje pukotina i diskontinuiteta koji je znatno veći nego što je utvrđeno prethodnim radovima (Winzer i Ritter 1983).

Najvažnija zapažanja Winzera i Rittera su:

- primijećeno je formiranje novih pukotina na čelu slobodne površine, za koje je potrebno otprilike dvostruko više vremena u odnosu na vrijeme koje je potrebno P valu da prođe udaljenost do izbojnice,
- stare pukotine su oslabljenja i lokacija za formiranje novih pukotina pri čemu one nastavljaju biti aktivne u vremenu od nekoliko desetina ms nakon detonacije eksploziva
- fragmentacija se nastavlja u blokovima stijene, nakon čega slijedi odvajanje od glavne stjenske mase djelovanjem valova napreznja koji su „zarobljeni“ unutar tih blokova,
- na slobodnoj površini, pukotinski sklop formira se prije dolaska radijalnih pukotina od bušotine,
- ventiliranje plinova događa se relativno kasno u samom procesu i to kroz već otvorene pukotine, što ukazuje da većina pukotina koje su primijećene na slobodnom čelu iskopa nisu pod tlakom plinova,

- u masivnoj stijeni, valovi napreznja propagiraju se većom brzinom uz malo prigušenje, ali ne stvara se puno pukotina jer nema središta za njihovo formiranje,
- veliki fragmenti formirat će se vrlo rano, i kako se pukotine otvaraju, veliki segmenti stjenske mase biti će efektivno izolirani od daljnjeg djelovanja
- u jako raspucaljoj stijeni brzina valova napreznja biti će mala, a prigušenje će biti veće, ali će više pukotina poslužiti kao središta formiranja novih pukotina i
- pukotine se otvaraju sporije, i manje mase stijene su izolirane ranije, tako da valovi napreznja koji pristižu kasnije mogu nastaviti povećanje i širenje pukotina (Antičević 2011; Ester 1996; Winzer i Ritter 1983).

3.8. Teorija dinamičkih i statičkih tlakova

Teorija se temelji na dva različita djelovanja tlaka nastalog detonacijom eksplozivnog punjenja minske bušotine na stjensku masu:

- djelovanje dinamičkog tlaka nastalih udarnim valovima i
- djelovanje statičkog tlaka ekspandirajućih plinova.

Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja u minskim bušotinama, oko bušotine se formira područje djelovanja tlačnih napreznja. Ta tlačna napreznja uzrok su radijalnih pomaka u stjenskoj masi. Mehanizam radijalnog loma iznio je Coates. Autor smatra da će oko bušotine, zbog radijalnih pomaka i zbog utjecaja udarnog tlaka detonacije, nastati vlačna sila koja djeluje tangencijalno na bušotinu, te će doći do deformacija i radijalnog loma u trenutku kada vlačna napreznja premaše vlačnu čvrstoću stijene. (Rathore 2006; Li Chun-ruí 2009).

U početku se mislilo da radijalni lom nastaje na stjenkama bušotina sve do pojave tehnologije superbrzih fotografija. Tada je primijećeno da postojeća oštećenjima u stjenskoj masi predstavljaju mjesta na kojima počinje lom, a zatim postupno prolazi kroz stijenu radijalno od bušotine (Rathore, 2006; Li Chun-ruí 2009). Autori ovaj mehanizam loma nazivaju mehanizmom djelovanja dinamičkog tlaka od udarnih valova.

Nakon udara uzrokovanih visokim dinamičkim tlakovima plinova pri detonaciji na stjenku bušotine, energija detonacije ne prestaje djelovati u potpunosti, plinovi svojom ekspanzijom i dalje djeluju tlačno na već frakturiranu stijenu i imaju glavnu ulogu u lomu stijene. Stijena se drobi djelovanjem dinamičkog tlaka u kojem lom nije u potpunosti dovršen. Veliki tlak prilikom ekspanzije plinova može utjecati na radijalne i sve vrste pukotina intenzivirajući napreznja i proširujući pukotine sve dok se u konačnici pukotine ne spoje te se time dovrši lom (Rathore 2006; Li Chun-ruí 2009). Autori ovaj mehanizam loma nazivaju mehanizmom djelovanja statičkog tlaka od ekspandirajućih plinova.

Kutter i Fairhurst su objasnili ulogu statičkog tlaka stlačenih plinova nastalih detonacijom eksplozivnog punjenja u bušotini uz dinamički tlak. Naglasili su da stlačeni plinovi također mogu formirati „kvazi hidrostatsko polje napreznja“. Hagan ovaj efekt naziva „efekt plinskog klina“ zbog toga što se plinovi nastavljaju širiti u nastale pukotine te ih, poput klina, produljavati sve dok se ne spoje i isprepletu što dovodi do fragmentacije stjenke mase (Li Chun-ruí 2009).

U tablici 3 kronološki su prikazana razmišljanja raznih istraživanja o konceptu teorija miniranja,

odnosno utjecaju i važnosti pojedinih pojava u mehanizmu loma te je prema tome vidljiv smjer razvoja promišljanja počevši od jednostavne teorije refleksije pa sve do kompleksnih teorija poput teorije jezgre ili teorije dinamičkih i statičkih tlakova. Utjecaj i važnost mehanizama loma definiran od strane pojedinih istraživača u tablici 3 je prikazan brojevima od 1 do 4 pri čemu broj 1 predstavlja najvažniji, a broj 4 najmanje važan mehanizam loma.

Tablica 3. Teorije miniranja i mehanizmi loma (Antičević 2011; Atlas Powder Company 1987)

Table 3. Blasting theories and their breakage mechanisms (Antičević 2011; Atlas Powder Company 1987)

Godina / Year	Istraživači / Researchers	Mehanizmi loma / Breakage mechanisms					
		Refleksija valova napreznja / Reflected tensile waves	Tlačni valovi napreznja / Compressional stress waves	Ekspanzija plinova / Gas expansion	Lom savijanjem / Bending fracture	Jezgra – valovi napreznja i pukotine / Nuclei stress flow	Dinamički i statički tlakovi / Dynamic and static pressure
1949	Obert i Duvall	1					
1956	Hino	1					
1957	Duvall i Atchison	1					
1958	Rinehart	1					
1963	Langfors i Kihistrom		2	1			
1966	Starfield	1					
1970	Porter i Fairhurst		2	1			
1970	Persson et al		1				
1971	Kutter i Fairhurst		1	1			
1971	Field i Ladegarrd-Pederson		1	1			
1972	Johansson i Persson	2		1			
1972	Lang i Favreau	4	2	1		3	
1973	Ash			1	1		
1974	Hagen i Just		1				
1974	Forney					1	
1975	Dally					1	
1978	Barker et al					1	
1981	Rossmann i Forney					1	
1983	Winzer et al					1	
1983	Margolin i Adams					1	
1983	Mc Hugh					1	
1984	Britton et al			1			
1985	Coursen			1			
1985	Haghighi et al			1	1		
1987	Brinkmann			1			
1992	Hagan					1	
1993	Persson					1	
1995	Ghosh et al					1	
2002	Oriard					1	
2006	Rathore et al			2			1
2008	Ozkahraman	1	1				
2009	Li Chun-ruí						1

4. Zaključak

Brojni autori su pokušali odrediti i objasniti procese lomljenja stijene eksplozivom te su pritom razvijene brojne teorije loma stijene koje su izvedene na temelju iskustva na terenu i ispitivanja u različitim materijalima kao što su: pleksistaklo, granit, homogena stijena i mnogim drugim materijalima.

Sve teorije iskazuju da u procesu loma stijene eksplozivom djeluju dva mehanizma, mehanizam udarnih valova i mehanizam ekspanzirajućih plinova.

Razlika pojedinih teorija je u važnosti pojedinih mehanizama loma. Udio pojedinih mehanizama loma u pojedinim teorijama procijenjen je na osnovu mogućnosti istraživanja i promatranja postojećim tehnologijama u vremenu razvoja nastajanja teorija. Razvojem znanosti razvijala se i tehnologija, a samim time i pojedine teorije loma koje su postajale sve kompleksnije.

Nijedna teorija u potpunosti ne daje odgovor i objašnjenje što se događa u procesu razaranja stijene energijom eksploziva u svim uvjetima miniranja i u svim vrstama i kategorijama stjenkog materijala.

Teorije miniranja prezentirane su zajedno s faktorima koji utječu na lom, frakturiranje, zone oštećenja, fragmentaciju i općenite kriterije projektiranja miniranja.

Način na koji se energija eksploziva prenosi u stijenu od izuzetnog je značaja jer utječe na naprezanja i način nastanka deformacija u stijeni te definira iniciranje pukotina i konačno frakturiranje.

Kao primarni mehanizmi loma na kojima se temelje teorije miniranja mogu se izdvojiti djelovanja:

- tlačne i vlačne deformacijske (udarne) energije valova,
- refleksije udarnog vala na slobodnu površinu,
- ekspanzija plinova kroz stjenku masu,
- lom savijanjem,
- posmični valovi,
- rasterećenja stjenke mase,
- stvaranje i razvoj pukotina na diskontinuitetima.

5. Literatura

Antičević, H. (2011): Određivanje zone oštećenja stjenke mase pri iskopu tunela miniranjem. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 265 pp, Zagreb

Ash, R.L. (1973): Flexural Rupture as a Rock Breakage Mechanism in Blasting, Fragmentation by blasting, SEM, 24-29.

Atlas Powder Company, (1987): *Explosives and Rock Blasting*, Dallas: Maple Press.

Bhandari, S., (1997): *Engineering Rock Blasting Operations*, Rotterdam: A.A. Balkema.

Brinkman, J.R. (1987): Separating Shock Wave and Gas Expansion Breakage Mechanisms, Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, 6-15.

Britton, R.R., Konya, C.J., Skidmore, D.R., (1984): Primary Mechanism for Breaking Rock with Explosives, 942-948.

Coursen, D.L. (1980): A Gas Penetration Model of Fragmentation, Proc.Soc.Experimental Stress Analysis, Fall meeting, 24-29.

Dessureault, S., (2004): *Rock excavation course notes: spring 2003*, Arizona: University of Arizona, Mining and geological engineering.

Dobrilović, M., Bohanek, V., (2013): Utjecaj miniranja u cestogradnji na okolne prometnice. Dani prometnica 2013 – Mjerenja, ispitivanja i monitoring na prometnicama. Sveučilište u Zagrebu, Građevinarski fakultet, 313-347.

Dowding, C.H. Aimone, C.T., (1992): *Rock Breakage: Explosives*, Mining Engineering Handbook. Sacramento: CO:Society Mining, Metallurgy and Exploration, 722-760.

Esen, S., Onderra, I., Bilgin, H.A., (2003): Modelling the Size of The Crushed Zone Around a Blasthole, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, Pergamon, 485-495.

Ester, Z. (1996) Utjecaj zaloma na rezultate miniranja podzemnih prostorija. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, pp 109, Zagreb

Fourney, W.L., Holloway, D.C., Wilson, W.H., Barker, D.B., (1979): Mechanism of Fragmentation in a Jointed Formation, University of Md, Report to NFS

Ghosh, A., Daemen, J.J.K. (1995): Rock Fragmentation in Bench Blasting - A Numerical Study, Rock Mechanics, Daemen & Schultz (eds), Balkema, Rotterdam, 553 – 558.

Haghighi, R.H., Konya, C.J., & Lundquist, R.G., (1985): Finite Element Modeling of Rock Breakage Mechanism, 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, SD, pp 651-658.

Hartman, H.L., (1992): *SME Mining Engineering Handbook 2nd edition vol.1*, Littleton, Colorado: Society of mining, metallurgy and exploration Inc.

Hino, K. (1956): Fragmentation of Rock Through Blasting and Shock Wave Theory of Blasting, *Quarterly of the school of mines*, 191-209.

Hustrulid, W., (1999): Blasting Principles for Open Pit Mining: Theoretical Foundations, Volume 2, Balkema, Rotterdam, 980-998.

Li Chun-rui, Kang Li-jun, Qi Qing-xing, Mao De-bing, Liu Quan-ming, Xu Gang, (2009): The Numerical Analysis of Borehole Blasting and Application in Coal Mine Roof-Weaken, The 6th International Conference on Mining Science & Technology, Procedia Earth and Planetary Science 1, 451-459, Beijing, China

Ozkahraman, H. T. (2008): Breakage Mechanisms and an Encouraging Correlation Between the Bond Parameters and the Friability Value, 2008 Conference, held in the UK, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 153-159.

Persson, P., Holmberg, R., Lee, J. (1993): *Rock Blasting and Explosives Engineering*, CRC Press, Boca Raton, pp 264

Perrson, P.A., Lundborg, N., Johansson, C.H. (1970): The Basic Mechanism in Rock Blasting, *Proceedings of the 2nd Congress of the International Society for Rock echanics*, Belgrade, 3-5.

Rathore, S.S., Bhandari, S., (2006): Controlled fracture growth by blasting while protecting damages to remaining rock, Rock mechanics and rock engineering, Springer-Verlag, Netherlands, 317-326.

Rossmannith, H. P., Foruney, W.L., Knasmillner, R.E., (1987): Fracture Initiation by Stress Wave Diffraction at Cracked Interfaces, Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, 172-191.

- Rossmann, H. P., (2002): Advanced Blasting in Jointed and Faulted Rock, Naturwissenschaftlicher Verein für Steiermark, Graz, 39-42
- Scoble M.J., Lizotte Y.C., Paventi, M., Mohanty B.B., (1997): Measurement of Blast Damage, Technical papers on Mining engineering, SME Annual Meeting, Phoenix, 103-108.
- Winzer, S.R., Ritter, A.P. (1983): Role of Stress Waves and Discontinuities in Rock Fragmentation, *Fragmentation by blasting*, SEM, 11-23.
- Zagreba, S. V., (2003): *Fragm: A Blasting Fragmentation Model of Rocks*. Thesis. 175 pp, Morgantown. West Virginia University.

THEORIES OF ROCK BREAKAGE WITH EXPLOSIVES

The prediction and observation of the nature and dimensions of damaged zones in the surrounding rock mass and understanding the mechanisms of fracturing and crushing of the rock mass with explosives is one of the most important parameters in blasting design in order to obtain preferred granulation and reduce damaging effects of blasting on the environment.

Theories of blasting describe the effect of energy released by the detonation of the explosive charge in a borehole in the area that is blasted.

When detonated, an explosive charge in a borehole transforms from the solid to the gas and the thermal energy is released. That reaction in a closed and confined space, through explosion compressed gases, causes strain that surpasses dynamic compressive strength. The consequence is crushing and fragmentation of the rock mass in the immediate vicinity of a borehole and the creation of a fractured and damaged zone in the rock mass. High pressure that affect the borehole wall crush and fragment the surrounding rock mass and cause major damages around the borehole.

The damage of the rock mass depends on the distance from the borehole. There are several zones in which the degree of damage and fractures can be determined.

An overview of existing rock breakage theories with the energy released by the detonation of explosives is given in this paper.