

Eksplozivi i razvoj društva

Izv. Prof. dr. sc. **Mario Dobrilović**, član suradnik HATZ-a,
Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, mario.dobrilovic@rgn.hr

doc. dr. sc. **Vječislav Bohanek**, dipl. ing.,
Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, vjecislav.bohanek@rgn.hr

doc. dr. sc. **Vinko Škrlec**, dipl. ing.,
Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, vinko.skrlec@rgn.hr

***Sažetak:** Rudarstvo je jedna od najstarijih ljudskih organiziranih djelatnosti. Rudarenje uz pomoć eksploziva omogućilo je dostupnost energije i materijala. Eksplozivi su materijali koji se primjenjuju, osim u rudarstvu i vojnom području, te u nizu tehnika i različitih primjena. Prikazan je razvoj i značaj eksploziva u napretku civilizacije te je dan pregled značajnijih načina njihove upotrebe.*

***Cljučne riječi:** eksplozije, eksplozivi, tehnologije, rudarstvo, miniranje*

1. Uvod

Svijet današnjeg čovjeka ispunjen je stvarima i proizvodima koji u originalnom ili prerađenom te doradenom stanju dolaze iz rudarske proizvodnje. To je slučaj sa svime u našoj okolini s iznimkom materijala i proizvoda biljnog i životinjskog porijekla. Metali, građevinski materijali, kruta, tekuća i plinovita goriva, različite vrste plastika dobivene su neposredno ili preradom rovnih materijala dobivenih rudarenjem. Čvrste mineralne sirovine pridobivaju se u velikoj mjeri primjenom energije eksploziva odnosno miniranjem. Eksplozivi se u civilnom području upotrebe koriste za mnoštvo različitih namjena bez čijih učinaka i proizvoda današnji tehnički stupanj razvoja te dostupnost materijala i energije ne bi bili mogući. Rudarska proizvodnja svake zajednice, države i društva čini osnovu i izvor sirovina, materijala i energije, bazu razvoja proizvodnje te ekonomskog i civilizacijskog razvoja. Značaj rudarenja i rudarstva izuzetno duboko i slikovito opisuje Mijo Kišpatić još 1878 godine, u duhu toga vremena u uvodu knjige “Slike iz rudstva” na slijedeći način:

“Broj ruda, što ih je čovjek do danas na zemlji upoznao, nije velik. Biti će svega skupa oko tisuću vrsti. Broj je taj zbilja premalen, ako ga prispodobimo sa brojem

poznatih bilina i životinja, gdje ih na stotine tisuća vrsti poznamo. Pa ipak je ovaj maleni broj raznovrstnih ruda od ogromne važnosti po celokupni život naše Zemlje. Rude tvore središte i površinu Zemlje; one daju biljci sjedište, u kom ona svoje korenje širi i iz koga ona hranu izvlači, a sam čovjek je u rudstvu našao obilne koristi i pomoći, čovjek ima razmjerno po broju više korisnih ruda nego životinja i bilina; može se skoro reći, da je veoma malo ruda, koje nebi ma u čem čovjeku koristile i služile. Kao redovita hrana služi čovjeku medju rudami jedino voda i sol, ali za to pozna liečničtvo veliki broj ruda, koje su u mnogih bolestih izvrstnim liekom. Ali sva ova korist izčezava prama onoj, što ju čovjek ima od ruda u svom društvenom životu. Sav obrt, promet i trgovina imadu svoj temelj u rudstvu. Snaga i duševni razvoj čovječji našao je u rudstvu najsnažniju podporu. Sa gdje kojimi rudami su upravo uzko spleteni pojedini odsjeci čovječje prošlosti i njegova razvoja. Kako silan upliv su imale pojedine rude na razvoj društvenih odnošaja, to ješto bi želio razjasniti i predočiti sa ovo nekoliko slika iz rudstva. Izabrao sam samo nekoliko i to najvažnijih ruda, ali neka nitko nemisli, da je to sve, što je čovjek umio iz rudstva na svoju korist obratiti. Ni iz daleka! stotine ima jošte ruda, koje čovjeku na korist služe, ako im i nije korist tako obćenita i tako poznata. Kada je ruda od tolike važnosti po čovjeka, to nas nesmije iznenaditi, ako nas tko upita, što je ruda? pa u čem je taj stvor različan od biljke i životinje?” [1].

I prije, do tada razvojno tehnički najuzbudljivijeg 19. stoljeća, od prapovijesti, preko starog vijeka i drevnih civilizacija, srednjeg i novog vijeka, rudarstvo je bilo uz poljoprivredu jedan od temelja razvoja civilizacija. Još u kamenom dobu ljudi su sakupljali komade kvarca pogodne za izradu alata vršaka oružja i paljenje vatre, a to je bio početak rudarenja. Na lokaciji Grime's Graves pored Brandona u Suffol-



Sl. 1. Motiv iz rudnika kvarca Krzemionki [3]

ku, Engleska, još u neolitiku skupljao se kvarc te se nalaze ostaci podzemnih rudnika kvarca čija se starost procjenjuje na 2 600 godina prije Krista [2]. Isto tako kvarc se rudario na lokaciji Krzemionki u Poljskoj s početkom oko 3 900 godina prije Krista. Na lokaciji se nalazi 4 000 okana dubine oko 9 m. Na slici 1 prikazan je otkop neolitičkog rudnika kvarca na lokaciji Krzemionki.

U današnjoj Hrvatskoj, na lokalitetu Hušnjakovo Dragutin Gorjanović-Kramberger otkrio je kameno oruđe Krapinskog pračovjeka iz pleistocena izrađeno od više vrsta silikatnih stijena, i tufova, krupnozrnatih agregata kvarca, opala i gustog rožnaca. Starost lokaliteta datirana je prije 30 000 godine [4]. Povijesni period početka organiziranog rudarenja svrstava rudarstvo u najranije organizirane djelatnosti kao i poljoprivredu koja se u organiziranom smislu isto pojavljuje u neolitiku. Rudarenje tijekom metalnih (bakarno, brončano i željezno) doba obilježava ta razdoblja što je posredno vidljivo i iz naziva prema metalima dobivenim rudarenjem i metalurškom preradom. Rudari se i u starom i u srednjem vijeku, mehaničkim ručnim radom uz pomoć životinjske radne snage. Prvo kompletno djelo znanstvenog pristupa o rudarstvu i metalurgiji je “*De Re Metallica*” Georgiusa Agricole iz 1556 godine. Slika 2 prikazuje način frakturiranja rude upotrebom vatre iz “*De Re Metallice*”. Takav način drobljenja zadržao se u nekim rudnicima čak do kraja 19 stoljeća, 270 godina nakon prve primjene miniranja u rudarstvu.



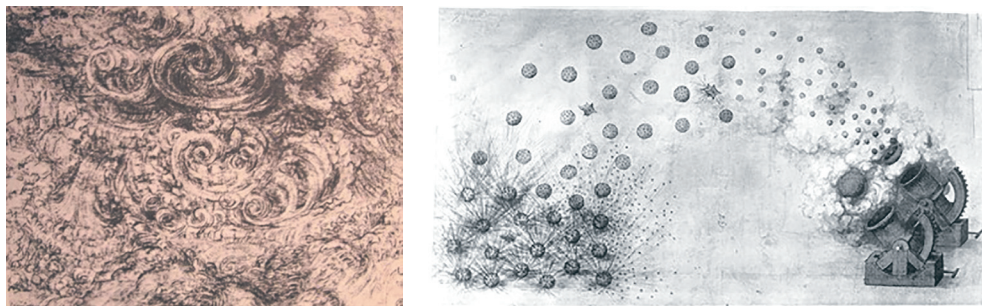
Sl. 2. Drobljenje rude paljenjem vatre [5]

U novom vijeku razvoj rudarstva se nastavlja, a naglo povećanje produktivnosti i ukupne proizvodnje svih mineralnih sirovina svakako je uvjetovano potrebama za sirovinama i energijom tijekom industrijske revolucije a zadovoljenje je omogućeno primjenom nove tehnike-miniranja eksplozivima.

2. Eksplozivi za boljitak

Razvoj ljudske civilizacije ovisio je uvelike i o dostupnosti prirodnih izvora energije te mogućnosti njihove upotrebe. Današnji tehnološki i tehnički status svijeta značajno je uobličen upotrebom eksploziva, energetskih materijala. Od najranijih pojavnosti eksplozivnih tvari, grčke vatre i baruta, eksplozivi su prošli razvojni put koji ih danas svrstava u nezaobilazne i nezamjenjive izvore energije s različitom primjenom. Time su postali energetski materijali sa sigurnom primjenom u vojnom i civilnom području ljudskog djelovanja. Civilna primjena eksploziva ili eksplozivnih tvari vrlo je široka tako da se oni koriste za miniranja u rudarstvu i građevinarstvu, eksploataciji nafte i plina, geološkim istražnim radovima, strojarstvu i brodogradnji, svemirskoj tehnologiji, automobilskoj industriji, poljoprivredi, medicini, razminiranju, filmskoj umjetnosti i vatrometima. Osnovne postavke razumijevanja detonacijskog i eksplozivnog procesa pretvorbe materijala postavljene su na prijelazu 19. u 20. stoljeće. Daljnji razvoj istraživanja eksploziva kao energetskih materijala teži pronalaženju novih, sigurnijih, jačih i jeftinijih materijala uz težnju k potpunom objašnjenju pojedinih fizikalno kemijskih procesa eksplozivnih materijala. Priča o eksplozivima i prirodnim eksplozijama počinje još od postanka svijeta a za čovjeka, neposredno, otkrićem kako vatru zapaliti i kako je kontrolirati.

Želja za spoznajom, uz traženje životnih resursa čovjeka je nukala na istraživanja. Istraživanja neposredne okoline, istraživanja daljih teritorija i svega što mu je bilo nepoznato. Vjerojatno su i naši dnevni preci razmišljali kako zauzdati njima nerazumljive sile koje se kriju u prirodi odnosno kako ući u područja bogova i kako si olakšati svakodnevni život. Nastajale su civilizacije i rasla je potreba za prirodnim resursima, oblicima energije, hranom, rudama. Vatre i eksplozije svakako su pojave koje su pratile razvoj civilizacija. Prvotno vatra je bila sredstvo pomoći ljudima za dobivanje topline, svjetla i pripremu hrane ali i katastrofa uzrokovanih požarima. Eksplozije kao prirodne pojave svakako nisu bile na pomoći ljudima već su kao vulkanske erupcije uzrokovale pošast i pogibelj. Moć eksplozija i pokušaj njihove kontrole bile su predmet istraživanja i u alkemičarskim procesima, primjerice za pretvaranje drugih tvari u zlato. Alkemičari nisu mogli znati da je u tim istraživanjima postojalo počelo procesa koji je otkriven nakon mnogih stoljeća, a to je proizvodnja umjetnih dijamanta iz grafita djelovanjem udarnog vala jake eksplozije. Leonardo da Vinci, jedan on najgenijalnijih umova renesanse a možda i ljudi uop-



Sl. 3. Leonardove reprodukcije [6]

će, razmatrao je eksplozije i eksplozivom pokretana oružja. Na slici 3 prikazano je njegovo viđenje velike eksplozije i naprave za izbacivanje vatrenih lopti.

Suvremeni eksplozivi i njihove eksplozijama, namijenjenim boljitku ljudi počinje u 17. stoljeću, a od 19 stoljeća eksplozivi su u stalnom razvoju. Današnji tehnološki i tehnički status svijeta značajno je uobličen upotrebom eksploziva, energetskih materijala. Nažalost, priča o eksplozivima za ratovanje počela je davno prije.

2.1 Razvoj eksploziva

Početak upotrebe jednog oblika, ili bolje rečeno nižeg reda brze kemijske pretvorbe-u odnosu na eksploziju-vatre počeo je pokušajima kontroliranje takvog procesa u ratne svrhe, za razaranje. Još 2000 godina prije Krista razne zaraćene strane u ratovima na Mediteranu koristile su zapaljive strelice i komade zapaljene smole za uništavanje protivnika i zauzimanje gradova pod opsadom. Prva takva oružja više su plašile suprotnu stranu, nego što su uzrokovale štetu, osim u slučaju kada su pogodile zapaljive mete.

Alkemičari su tražili mješavine koje bi davale razornije efekti koje bi znatnije mogle razoriti neprijateljske resurse. Bizantinsko carstvo primijenilo je u obrani Konstantinopola od Arapskih osvajača u sedmom stoljeću mješavinu znanu pod imenom “*Grčka vatra*”. Prema danas prihvaćenom shvaćanju, radilo se o mješavini organske tvari (smole) crnogoričnih biljaka, sumpora i tekućeg goriva odnosno sirove nafte. Takvu goreću mješavinu, kada je zapaljena prekrila drvena površina, brodova i utvrda, bilo je vrlo teško ugasiti vodom. U vojnom smislu Grčka vatra promijenila je način ratovanja u ta doba kao strojnica ili automatska puška u dvadesetom stoljeću. Prikaz pomorskog ratovanja grčkom vatrom dan je na slici 4.



Sl. 4. Grčka vatra u pomorskoj bitci [7]

Upotreba Grčke vatre u tom slučajevima bila je opasna za one koji su je upotrebljavali jer se plamen brzo mogao proširiti na zalihe i postati nepredviđeno oružje suprotne strane. S druge strane obrana je bila efikasna dok je bilo zaliha Grčke vatre.

Tražena je pouzdanija, dostupnija i razornija materija za ratovanje a to je bio barut ili “*crni prah*”. Prve, dakle, razorne materije krenule su od vatre.

Barut je smjesa kalijevo nitrata (KNO_3), drvenog ugljena i sumpora. Priče o pronalasku baruta govori da je on slučajno otkriven prilikom odvajanja zlata i srebra iz rude (pirit FeS_2 ili halkopirit $CuFeS_2$) kojoj su oni primjese, a ruda ima sumpora. Kineski alkemičar-metalurg dodao je u rudu kalij nitrat, a zaboravio drveni ugljen za povećanje temperature. Kada ga je dodao dogodila se eksplozija. Prvi relevantni zapisi iz Kine o barutu dolaze u 9. stoljeću, a recept odnosno formula baruta tamo je zapisana u 11. stoljeću. Upotreba crnog baruta u Kini bila je dobro poznata za pirotehniku i na njoj bazirana oružja. U Europi u 13. stoljeću. Roger Beacon u djelima “*Opus Maius*” i “*De Mirabili Potestate Artis et Nature*”, oko 1242. godine opisuje razornu snagu crnog baruta i zapisuje alkemičarsku formulu sastava baruta. U 14. stoljeću barut je u Europi ušao u uobičajenu vojnu primjenu. Smatra se da je njemački redovnik, alkemičar i magičar Berthold Schwartz osmislio top, mada mu se često pripisuje i izum baruta. Srednjovjekovna priprema baruta i Berthold Schwartz prikazani su na slici 5.



Sl. 5. Srednjevjekovna priprema baruta i Berthold Schwartz [8 i 9]

Barut se u početku u ratnoj tehnici koristio za paljenje vatre raketama iza neprijateljskih linija ili prve bombe gdje se barut pakiran u bačve koristio za uništavanje neprijateljskih vojnika. Jedno od kineskih oružja su bile strelice koje su letjele na snagu baruta i mogle su na velikoj daljini probijati oklope i štitove – prvi projektili ili rakete s barutnim raketnim motorom.

Tijekom takve upotrebe baruta shvatilo se da barut zapaljen u kontroliranom zatvorenom dovoljno čvrstom prostoru s otvorom, može koristiti za izbacivanje kugla ili drugih tijela. Vojnici, prvi artiljerci su teška srca prijavljali na opsluživanje topova jer su oni često eksplodirali ako su bili prepunjeni ili nedovoljno čvrsti i tako radili štetu svojim gospodarima. Problemi su bili i s transportom baruta jer nije trpio duge Transporte, dolazilo je do razdvajanja komponenti pa se trebao miješati na licu mjesta.

2.2 Eksplozivni alati

Rudarski rad obavljao se ručno. Taj težak fizički rad kojim su se lomile i drobile stijene ručnim alatom počeo se zamjenjivati korištenjem energije baruta. Iako je barut u tom smislu puno slabiji od kasnijih eksploziva, promijenio je sliku rudarstva.

Tako je 1613. godine predložena tehnologija bušenja i miniranja od strane rudarskog nadzornika Martina Weigela u Friebergu u Njemačkoj. Prvi zapis o uspješnoj primjeni nove tehnologije datira 1617. godine kada Casper Windt, njemački inženjer bilježi izvedeno miniranje u Schemintzu u Njemačkoj odnosno 1627. godine u Mađarskoj. Prema drugim izvorima prvo evidentirano miniranje u rudarstvu izvedeno je 1627. godine u rudniku Kornberger Erbstollenu u Banskog Štiavnici. Miner

Casper Windt izveo je pokusno miniranje barutom u prisustvu Carske rudarske komisije (godina i mjesto se razlikuje po pojedinim bibliografskim jedinicama) korištenjem snage crnog baruta smještenog u začepljene rupe (bušotina) u stijeni. To je prva zabilježena primjena miniranja. Miniranje u rudniku crnim barutom prikazano je na slici 6



Sl. 6. Miniranje crnim barutom [8]

Do početka 18 stoljeća miniranje crnim barutom postala je opće prihvaćena i primjenjivana tehnologija u površinskim i podzemnim rudnicima te izradi tunela. Pronalaskom parnog stroja i njegovom komercijalnom dostupnošću počela je i industrijska revolucija (kraj 18.st.) Miniranje, kao jedna od osnovnih metoda dobivanja mineralnih sirovina sve više je dobivalo na važnosti.

Problemi vezani uz upotrebu crnog baruta u to doba bili su vezani uz nepouzdana omjere mješavine te se nije znalo koliko je potrebna količina za pojedina miniranja. Najveći problem bio je samo paljenje baruta na mjestu upotrebe. Barut se morao paliti prvo u manjoj količini koja je bila fizički povezana s glavnom količinom da bi prenijela plamen a moralo se paliti tako da se miner može nakon pripaljenja stigne sakriti iza zaklona prije eksplozije. Pripalna sredstva, prvi štapini ili fitilji izrađeni su od gušćih pera napunjenih baruta ili šupljih biljnih stabljika. Budući da se nije znalo točno koliko je baruta u takvim fitiljima i kolika je gustoća pakiranja, nije se znalo ni točno vrijeme gorenja te je paljenje minskog polja bilo povezano sa srećom, da li će se miner na vrijeme skloniti.

William Bickford, trgovac kožom i izumitelj počeo se zanimati za problem kontrole vremena paljenja baruta i 1931 g. izumio je sporogoreći štapin tada engleski zvan sigurnosni fitilj (engl. *safety fuse*). Bio je to barut u cjevčici od jutelog pletiva s još nekoliko vanjskih slojeva zaštite od drugih materijala. najveća prednost je bila to što se znalo duljinsko vrijeme gorenja od dvije minute za jedan *yard*. Vrijeme gorenja današnjih štapina je još uvijek dvije minute za jedan metar ali s većom točnošću od prvih štapina. Minerai su sada imali veću sigurnost pri miniranju.

Iako je crni barut i sigurnost njegovog iniciranja sporogorećim štapinom preokrenuo sliku rudarstva i izrade tunela potrebni su bili jači eksplozivi s mogućnošću bolje kontrole eksplozije. Jednako tako i vojske u devetnaestom stoljeću trebale su jače eksplozive i na njihovu radost, kemičari su ih izumili.

Do početka 19. st. nekoliko kemičara koji su pokušavali eksperimentirati sa materijama i kemikalijama nisu uspjeli smiješati ništa jače od baruta. Sve se promijenilo (ne samo u eksplozivima već u sveukupnim prirodnim znanostima) 1905. godine, objavljivanjem teorije o atomskoj građi tvari kemičara Johna Daltona. Primjenom Daltonove teorije na barut, kemičari su zaključili da je ključni sastojak baruta Kalij nitrat koji ima slabe veze unutar molekule. Te veze se lako prekidaju zagrijavanjem, plamenom oslobađa se kisik koji podržava gorenje sumpora i ugljika iz ugljena. Dakle oni (dušik, sumpor i ugljik) se spajaju u plinove s kisikom pri čemu se oslobađa energije i toplina koja podržava reakciju. Kemičari zaključili da bi puno bolji eksploziv bio tvar koja u molekuli ima C, H, N i O. Takvu molekulu moglo bi se razbiti impulsom energije, ne vatrom, oslobodila bi se energija i sagorijevanjem bi novonastali plinovi.

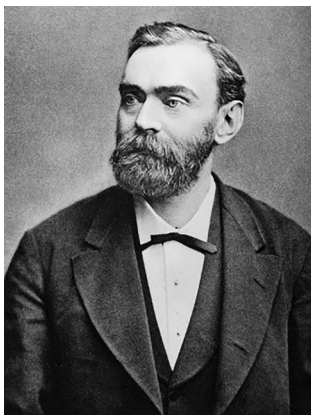
Prema tome, trebalo je naći tvar ili kemijski spoj koji u sebi sadrži i dušik i kisik i ugljik.

Ispitivanja su usmjerena k pokusima s dušičnom kiselinom HNO_3 „*aqua fortis*” koja je bila dovoljno snažna da izjeda metal imala je i dušik i kisik. Nedostaje još ugljik. Ugljika ima svugdje, organski smo svijet, u ugljenu, papiru, tkaninama, šećeru, koži itd. Istraživanja su krenula k miješanju dušične kiseline s organskim tvarima. Rodili su se nitroglicerini i nitroceluloza. Nitrocelulozu ili puščani, praskavi pamuk pronašao je 1846. godine njemački kemičar Christian Schönbein tretirajući pamuk s dušičnom kiselinom. Nitroceluloza u jednakim količinama kao barut davala je veći razorni efekt, dakle energiju i daleko manje dima.

Talijanski kemičar Ascanio Sobrero isto je eksperimentirao sa željom da napravi spoj dušika i ugljika za eksploziv. S krutim tvarima nije imao sreće ali se dosjetio da ima i tekućina bogatih ugljikom. Budući da je imao tvornicu sapuna u blizini, koristio je glicerini, uljastu tekućinu, nusproizvod pri proizvodnji sapuna i pomiješao je s dušičnom kiselinom. Dobio je žućkastu uljastu tekućinu. Grijao je tekućinu koja nije eksplodirala već je mu je para uzrokovala glavobolju. Još je isprobao reakciju na udar

da vidi ima li eksplozivna svojstva tako da je s par kapi natopio papir koji je udario čekićem. Čekić mu je eksplozija izbila iz ruke kroz prozor laboratorija. Immanuel Nobel izrađivao je barut za potrebe carske Rusije, te se, nakon prekida ugovora vraća u Švedsku i pokušava miješati crni barut i nitroglicerina. Alfred, najmlađi sin koji radi s ocem pokušavao je koristiti nitroglicerina kao sredstvo, pojačnik, koji bi dodao snagu barutu. Ubrzo je shvatio da je taj pristup, njega i ostalih znanstvenika pogrešan. Shvatio je treba potražiti način da se nitroglicerina dovede kontrolirani udarni energetski impuls da bi on eksplodirao, a ne toplinu odnosno vatru. On je napravio prvi detonator koji je kontrolirano mogao navesti nitroglicerina na eksploziju. Sastojao se od izmjerene količine nitroglicerina koji je bio u kontaktu s malenim limenim zatvorenim spremnikom s barutom. S barutom je spojen štapin s čijom se duljinom kontroliralo vrijeme iniciranja. Nobel je počeo proizvoditi i detonatore i nitroglicerina. Veliki broj nesreća i katastrofa povezan je s tom proizvodnjom, a u jednoj takvoj u tvornici u Švedskoj poginuo je i Alfredov brat. Obzirom na sve to Nobel je tražio način kako bi nitroglicerina postao neosjetljiv u proizvodnji transportu i upotrebi. Tek miješanje s silicijem bogatom glinom koja je nitroglicerina upijala poput spužve dalo je rezultat. Takva mješavina bila je neosjetljive na udarce, mogle su se grijati do topljenja, a detonacija potaknutom detonatorom oslobađala je energiju dvadeset puta veću nego crni barut. Nazvao ga je dinamit prema grčkoj riječi za snagu "*dynamis*" i to je ime i danas sinonim za eksploziv [8]. Nobelov izum dinamita i detonatora, danas kod nas znanog i kao rudarska kapica, zamijenio je korištenje crnog baruta u miniranju. Crni barut koristio se za municiju, a i u tom području crni barut zamjenjivao se nitrocelulozom, odnosno bezdimnim barutom. Razvoj eksploziva odveo je u dva pravca. Jedan pravac su tvari koji eksplozivno sagorijevaju brzinama manjim od zvuka, generiraju manji tlak plinova eksplozije, nekoliko kBar na nižim temperaturama i zovu se "*low explosives*", kod nas baruti, propelanti i pirotehničke smjese. Eksplozivi tipa nitroglicerina eksplodiraju procesom koji se zove detonacija uz tlakove od nekoliko stotina kBar i brzinama nekoliko km/s te se nazivaju "*high explosives*", detonirajući, jaki ili brizantni eksplozivi. I dalje je Nobel eksperimentirao organskim tvarima bogatim kisikom i ugljikom, kao i drugi istraživači. Nobel je dinamitu dodavao natrijev nitrat, NaNO_3 , i tako dobivao jeftiniji, ne mnogo slabiji eksploziv od dinamita. U isto vrijeme druga dva švedska kemičara Ohlsson i Norrbein koristili su amonijev nitrat, NH_4NO_3 , za miješanje s drugim tvarima u eksplozivima. Nobel je otkupio patent i amonijev nitrat dodavao dinamitu. Budući da je amonijev nitrat teže inicirati, odnosno potaknuti na eksploziju – detonaciju dobiven je novi eksploziv sigurniji za rukovanje za dobrim eksplozivnim svojstvima. Amonijev nitrat danas je gotovo nezaobilazna komponenta gospodarskih eksploziva.

Za spomenuti je da Nobel, koji je izumio i pronašao moderne eksplozive, smatrao ih je prvenstveno alatima za čovjekovo dobro, a ne alatima ratnog razaranja. Obzirom da je bio prozivan kao "*andeo razaranja*", a tada je bio jedan od najbogatijih ljudi na svijetu osnovao je zakladu za poticanje znanosti, umjetnosti i mira koja i danas istaknutim zaslužnim ljudima s tih područja dodjeljuje Nobelovu nagradu.

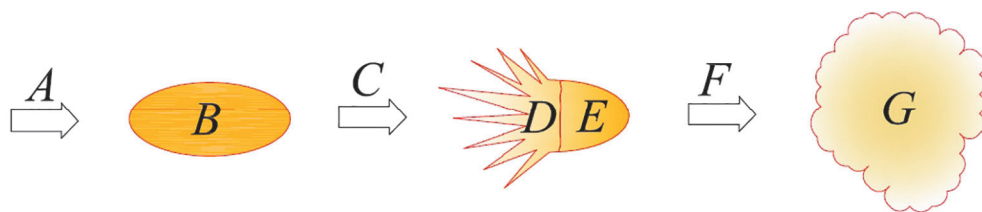


Sl. 7. Alfred Nobel (1833-1896) – švedski kemičar i izumitelj [10]

2.3 Eksplozije eksploziva

Eksplozija je fizikalni proces koji se pojavljuje kao posljedica prirodnog djelovanja ili ljudskih aktivnosti. Definiciju pojma *eksplozija* ponudilo je više autora. Prema Baumu eksplozija je proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prilaz njegove potencijalne energije u mehanički rad. Izvršeni rad eksplozije je rezultat nagle ekspanzije plinova i para. Dremin definira eksploziju kao proces brzog oslobađanja energije u ograničenom volumenu [11].

Eksplozija je vrlo brza ekspanzija tvari od početnog do mnogo većeg volumena. Može se reći da je eksplozija egzoterma, vrlo brza pretvorba početne tvari ili sustava uz ekspanziju nastalih plinovitih produkata. Eksplozivna pretvorba obavlja se u vremenu 10^{-5} s a shematski je prikazana na slici 8.



Kazalo:

A – inicijalni impuls (udar, plamen, toplina, trenje),

B – neporemećena eksplozivna tvar ($T \approx 20$ °C, $v \approx 0,2-1,5$ l/kg, $p \approx 1$ bar),

C – kemijski proces pretvorbe,

D – plinoviti produkti,

E – neporemećena eksplozivna tvar,

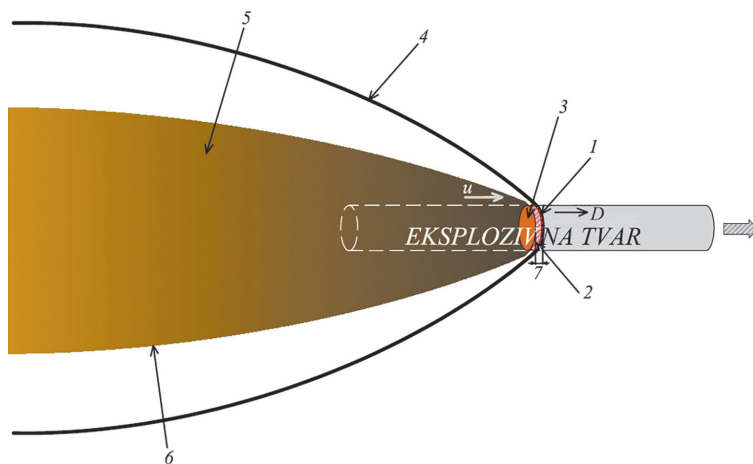
F – ekspanzija plinovitih produkata,

G – plinoviti produkti u ekspanziji ($T \approx 2000-5000$ °K, $v \approx 1000$ l/kg, $p \approx 10^5$ bar, $Q \approx 3,5-7,5$ kJ/g).

Sl. 8. Eksplozija

Poštujući te definicije, eksplozije se prema karakteru procesa pretvorbe mogu podijeliti na fizikalne, nuklearne i kemijske. U prirodi na Zemlji i u svemiru dolazi do eksplozija kao što su eksplozije električnog pražnjenja munje, vulkanske i eksplozije elastičnog sabijanja zemljinih ploča kod potresa (gorski udari) i provale plina u rudnicima, zatim eksplozije pri udaru (npr. meteora), eksplozije u svemiru itd. Kemijske eksplozije su procesi koji se dešavaju u eksplozivnim tvarima i čija se energija koristi za dobivanje energije odnosno mehaničkog rada [11]. Detonacija je vrsta kemijske eksplozije koja je prisutna kod jakih eksploziva, monomolekularnih ili smjesa kojom se oslobađa toplinska energija.

Djelovanje detonacije se može razložiti na proces djelovanja udarnog vala u eksplozivu, djelovanje udarnog vala u okolnom sredstvu te sekundarno djelovanje ekspandirajućih plinova u sredstvu. Detonacijski proces u patroni eksploziva shematski je prikazan na slici 9. Djelovanjem udarnog vala dolazi do intenzivnog stlačivanja eksploziva te se u njemu iniciraju kemijske reakcije u zoni kemijskih reakcija. Kada je sav eksploziv izreagirao i pretvoren u plinove, u Chapman-Jougetovoj ravnini (prema Chapman i Jouguetu, teoretičarima detonacijskog procesa), plinovi naglo ekspandiraju i udarno djeluju na eksploziv i okolni medij formirajući udarni, Taylorov val. Nakon toga slijedi ekspanzija plinova te obavljanje mehaničkog rada u sredstvu.



Kazalo:

- 1 – fronta udarnog vala,
- 2 – zona kemijskih reakcija,
- 3 – Chapman-Jougetova ravnina,
- 4 – udarni (tlačni) val u okolnom mediju,
- 5 – ekspandirajući plinoviti produkti,
- 6 – Taylorov val produkata,
- D – brzina detonacije (m/s),
- u – brzina produkata (m/s)

Slika 9. Detonacijski proces u patroni eksploziva

2.4 Primjena eksplozivnih tvari u miniranju

Detonacijski eksplozivi koriste se poglavito za dobivanje čvrstih mineralnih sirovina u rudarstvu, za površinske, podzemne i podvodne iskope te za niz vrsta tehnoloških miniranja. Godišnji utrošak eksploziva danas se u Hrvatskoj kreće oko 5 000 tona, a maksimalna potrošnja ostvarena je 2004. godine kad je iznosila 20 000 tona. To je u europskim razmjerima predstavljalo značajnu količinu, a gledajući potrošnju eksploziva po stanovniku, prema nekim izvorima, Hrvatska je tada bila europskom vrhu.

Osim eksploziva, prilikom miniranja potrebna su i inicijalna sredstva a to su uz sporogoreći štapin, rudarsku kapicu br. 8 i detonirajući štapin, električni, neelektrični i elektronički detonatori. Prilikom miniranja stjenskih masa, a ovisno o potrebama proizvodnje i prerade ili pak kapacitetima transportirane mase, moguće je formiranje velikih minskih polja s teoretski neograničenim brojem minskih bušotina. Na taj način se odjednom mogu minirati deseci tisuća kubnih metara stijene. Potrošnja eksploziva za miniranje stjenske mase, ovisna je o njenim karakteristikama, vrste miniranja i osobinama korištenog eksploziva. U grubim granicama potrebno je od 0,2-1 kg eksploziva za jedan m³ dobivene stjenske mase. Na slici 10 prikazano je masovno miniranje na kamenolomu.



Sl. 10. Miniranje na kamenolomu

Miniranja za potrebe izrada prometnica u čvrstoj stijeni mogu se pobrojati unutar slijedećih grupa; miniranja usjeka i zasjeka, miniranja u tunelogradnji, miniranja jama za upornjake mostova i nadvožnjaka, miniranja prilikom rekonstrukcija i proširenja prometnica, rušenja i uklanjanja postojećih objekata prometnica. Priprema minskog polja u tunelu prikazana je na slici 11.

Posebna kategorija specijalnih miniranja su podvodna miniranja. Obavljaju se za potrebe produbljenja dna, izrade obala, priveza, kanala za polaganje kablova i cje-



Sl. 11. Priprema minskog polja u tunelu

vovoda. Bušenje minskih bušotina obavlja se sa plutajućih maona ili roniocima. Ronioci postavljaju eksplozivna punjenja u bušotine i povezuju minsko polje unutar pripreme za iniciranje. Djelovanje miniranja u podmorju na površini mora prikazano je na slici 12.



Sl. 12. Podmorsko miniranje

Rušenje objekata miniranjem brz je i relativno jeftin način uklanjanja građevina. Tehnologija je primjenjiva na građevine izgrađene od gotovo svih materijala, odnosno betona, armiranog betona, cigle, drva ili čelika. Uobičajeno se miniranjem ruše više građevine pri čemu se za drobljene prvenstveno koristi vlastita masa građevine odnosno kinetička energija udara prilikom pada građevine.

Dvije su osnovne metode rušenja miniranjem: rotacija objekata u slobodni prostor i urušavanje objekta u vlastiti tlocrt te treća, kombinirana metoda rušenja. Na slici 13 prikazano je rušenje objekta miniranjem.



Sl. 13. Rušenje objekata vapnare miniranjem

2.5 Tehnološka miniranja

Primjena eksploziva za obradu metala počela je istraživanjima koje je izveo Monroe 1888. godine. Većina značajnih istraživanja vezanih za obradu metala eksplozivom provedena su pedesetih godina 20. stoljeća, a rezultirala su različitim oblicima primjene energije eksploziva za obradu metala. Najveći doprinosi razvoju pojedinih metoda obrade metala nalaze se u raketnoj i zrakoplovnoj industriji koje su bile glavni investitori u ovo područje. Mnogi od postupaka obrade metala eksplozivom koriste se kao komercijalni postupci u proizvodnji, dok su pojedini u stadiju istraživanja mogućnosti primjene.

Postupke obrade metala eksplozivom moguće je podijeliti postupaka obrade metala s obzirom na namjenu postupka. Podjela razlikuje slijedeće postupke obrade meta-

la eksplozivom; zavarivanje metala eksplozivom, oblikovanje metala eksplozivom, rezanje ili perforiranje metala eksplozivom, popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom, kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom i povećanje tvrdoće metala eksplozivom.

2.6 Eksplozivi u umjetnosti

Izrada umjetničkih dijela tehnikom nazvanom detonografijom počiva na učincima oblikovanog punjenja odnosno na kumulativnom efektu eksplozije. Taj fenomen je otkrio Franz von Baader (1792), odnosno Charles E. Munroe 1888, koji je otkrio da utisnuta slova na eksplozivu prilikom eksplozije na metalnoj ploči bivaju utisnute u ploču. [12]. Bazirano na tom efektu, umjetnik Verner Molin je razvio tehniku nazvanu graviranje eksplozijom. Evelin Rosenberg je razvila tehniku detonografije kojom se dobiju reljefi na metalnim pločama. Njezina djela izrađena tom metodom nalaze se u nizu javnih zgrada u SAD-u [11]. Tehnika graviranja eksplozijom primijenjena je kod izrade motiva srednjevjekovnog rudnika. Motiv je izrađen u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta. Na slici 14 prikazan je motiv srednjevjekovnog rudnika nakon eksplozije te nakon čišćenja i bojanja.



Sl. 14. Motiv srednjevjekovnog rudnika izrađen graviranjem eksplozijom

2.7 Eksplozivi i razvoj

Eksplozivi su unaprijedili svijet na različite, često neprepoznate načine. U rudarstvu su eksplozivi omogućili eksploataciju količina mineralnih sirovina koje su dotad bile nezamislive. U vremenu kada je pronalazak parnog stroja povećao potrebe za energijom i materijalima, rudarstvo je uz pomoć dinamita bilo u mogućnosti zadovoljiti te potrebe. Veliki kotač razvoja brzo se počeo okretati. Ugljen za energetske namjene masovno je pridobivan miniranjem. Eksplozivi su omogućili i razvoj proi-

zvodnje električne energije u hidroelektranama. Za velika postrojenja hidroelektrana bilo je potrebno obaviti masovne zahvate u na vodnim tokovima i značajna premještanja stijena i tla. Za takve zahvate potrebni su bili eksplozivi. Energija je postala jeftina. U proizvodnji cementa osnovne karbonatne i silikatne komponente za cement mogle su se dobivati jeftino i masovno. Jeftina električna energija omogućila je i dobivanje aluminija u električnim pećima. Proizvodnja cementa uz pomoć eksploziva omogućila je daljnji razvoj građevinarstva [8]. Poljoprivreda i zaštita od poplava profitirale su primjenom eksploziva. Zaštita od tuče postiže se raketama koje djeluju pomoću eksploziva a u oblaku raspršuju čestice koje sprječavaju stvaranje leda sagorijevanjem pirotehničke smjese. Eksplozivi se nalaze u svemirskim letjelicama, u sigurnosnim sustavima automobila, uređajima za izbacivanje sjedala aviona. Sredstva spašavanja na moru, od baklji, dimova, signalnih raketa i bacača užeta ne bi djelovala bez eksploziva. Snježne lavine se obaraju eksplozivnim punjenjima. Umjetni dijamanti mogu se stvoriti djelovanjem eksploziva. Različiti specijalni postupci obrade metala mogući su jedino visokim tlakovima eksplozije. Eksplozivima se mogu dobivati elektromagnetski impulsi visokih vrijednosti.

Prometna i trgovačka povezanost, ceste, željeznice, tuneli izgrađeni su uz pomoć eksploziva. U Hrvatskoj, posebice od završetka domovinskog rata cestovna infrastruktura izrađena je pomoću eksploziva. Iskopi za aerodromske objekte, produbljivanja i proširenja luka te željeznički tuneli izrađeni su pomoću eksploziva kao i različiti kanali za polaganje instalacija, kabela i cjevovoda. Eksplozivi su zaista alati razvoja na mnoge načine, direktne i indirektna, vidljive i nevidljive već više od 1000 godina, a svakako će to biti i dalje.

Literatura

- [1] Kišpatić, M.: *Slike iz rudstva*, Poučna knjižnica "Matice Hrvatske", Zagreb, (1974)
- [2] Stack, B.: *Handbook of Mining and Tunnelling Machinery*, J. Wiley, New York (1982)
- [3] <http://krzemionki.pl/en/new-photos/> Pristupljeno: 2020-02-01
- [4] Marić, L.: *Minerali, stijene i rudna ležišta u našoj zemlji od prehistorije do danas*, JAZU, Zagreb, (1878)
- [5] Agricola, G.: *De Re Metallica*, Dover Publications, Inc. New York, (2015)
- [6] Capra, F.: *The Science of Leonardo: Inside the Mind of the Great Genius of the Renaissance*, Anchor, (2008)
- [7] <https://nationalinterest.org/blog/the-buzz/greek-fire-the-byzantine-empires-secret-weapon-the-ancient-20955> Pristupljeno: 2020-02-03
- [8] Grady S. M.: *Explosives: Devices of Controlled Destruction*, Lucent Books, San Diego (1994)
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Berthold_Schwarz Pristupljeno: 2020-02-03
- [10] https://bs.wikipedia.org/wiki/Alfred_Nobel Pristupljeno: 2020-02-05
- [11] Sućeska, M.: *EKSPLOZIJE I EKSPLOZIVI: njihova mirnodopska primjena*, Zagreb, (2001)
- [12] Zukas, J. A. & Walters, W.P.: *Explosive Effects and Applications*, New York: Springer-Verlag, (1998).