

# Metode mjerenja brzine masenog toka produkata detonacije

---

**Horvat, Valentina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:878896>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

**METODE MJERENJA BRZINE MASENOG TOKA PRODUKATA DETONACIJE**

Diplomski rad

Valentina Horvat

R-247

Zagreb, 2020.



KLASA: 602-04/20-01/158  
URBROJ: 251-70-03-20-2  
U Zagrebu, 12.10.2020.

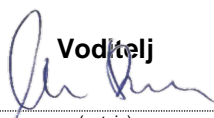
**Valentina Horvat, studentica**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/158, UR. BROJ: 251-70-03-20-1 od 08.05.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

### METODE MJERENJA BRZINE MASENOG TOKA PRODUKATA DETONACIJE

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu prof. dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

  
Voditelj

(potpis)

Prof. dr. sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite**

  
(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i  
studente**

  
(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

## METODE MJERENJA BRZINE MASENOG TOKA PRODUKATA DETONACIJE

Valentina Horvat

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

### Sažetak

Razumijevanje eksplozivnih procesa omogućava adekvatno projektiranje upotrebe eksploziva te poznavanje njihovih svojstava na način djelovanja i učinak procesa. Mjerenje pojedinih detonacijskih veličina, primjerice masenog protoka čestica, omogućava i validiranje postavljenih teoretskih modela idealne i neidealne detonacije. Važan parametar koji se mjeri posredno je brzina masenog toka čestica produkata detonacije ili brzina plinova.

Ključne riječi: detonacija, maseni tok, *CJ* teorija, *ZND* teorija, test metalnom pločicom (*FPT*), Dremnova metoda

Diplomski rad sadrži: 51 stranica, 21 sliku, 1 tablicu i 18 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: Dr.sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF

Pomagali pri izradi: Dr.sc. Vinko Škrlec, docent RGNF  
Dražen Pećina

Ocjenjivači: Dr.sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF  
Dr.sc. Vinko Škrlec, docent RGNF  
Dr.sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Datum obrane: 16.10.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## MEASUREMENT METHODS FOR THE SPEED OF THE MASS FLOW OF DETONATION PRODUCTS

Valentina Horvat

Thesis completed at: University of Zagreb Faculty of Mining,  
Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics,  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

Understanding explosive processes enables adequate design and application of explosives while knowing their properties on the mode of action and effect of the process. The measurement of individual detonation quantities, for example the mass flow of particles, also enables the validation of the set theoretical models of ideal and non-ideal detonation. An important parameter that is measured indirectly is the velocity of the mass flow of particles of detonation products or the velocity of gases.

Keywords: detonation, mass flow, *CJ* condition, *ZND* detonation model, Flying Plate Test (*FPT*), Dremin's method

Thesis contains: 51 pages, 21 figures, 1 table and 18 references

Original in: Croatian

Thesis is deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Tech. Assistance and support: Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD  
Dražen Pećina

Reviewers: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD  
Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD  
Assistant Professor Vječislav Bohanek, PhD

Date of defense: October 16, 2020, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. DETONACIJSKI PROCES.....	2
2.1. Udarni val.....	5
2.2. Teorije detonacije.....	6
2.2.1 Chapman - Jouguet-ova hidrodinamička teorija.....	6
2.2.2 ZND teorija.....	14
3. PREGLED DOSADAŠNJIH METODA ISPITIVANJA.....	16
3.1. Test metalnom pločicom ( <i>Flying Plate Test</i> ).....	18
3.1.1 Princip metode.....	18
3.1.2 Opis metode.....	18
3.1.3. Rezultati metode.....	22
3.2. Akvarij test.....	27
3.2.1. Princip metode.....	27
3.2.2. Opis metode.....	27
3.3. Laserska metoda.....	29
3.3.1. Princip metode.....	29
3.3.2. Opis metode.....	29
3.4. Elektromagnetska metoda.....	31
3.4.1. Princip metode.....	31
3.4.2. Opis metode.....	31
3.5. Rentgenska metoda.....	35
3.5.1. Princip metode.....	35
3.5.2. Opis metode.....	35
3.6. Manganinsko osjetilo tlaka.....	37
3.6.1. Princip metode.....	37
3.6.2. Opis metode.....	37
3.7. PVF tlačno mjerilo.....	39
3.7.1. Princip metode.....	39

3.7.2. Opis metode .....	39
3.8. Laserska interferometrija .....	41
3.8.1. Princip metode .....	41
3.8.2. Opis metode .....	41
3.9. Dremin metoda.....	44
4. PRIJEDLOG METODA ZA MJERENJE BRZINE METALNE PLOČICE .....	46
5. ZAKLJUČAK .....	49
6. LITERATURA.....	50

## POPIS SLIKA

Slika 2. 1: Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2008).....	4
Slika 2. 2: Model udarnog klipa (Dobrilović, 2008).....	8
Slika 2. 3: Prikaz udarne adijabate eksploziva (Hugoniotove linije) u $(p, v)$ dijagramu (Dobrilović, 2008)....	12
Slika 2. 4: Proces detonacije u $p$ - $v$ dijagramu s naznačenim adijabatama, Rayleighovim pravcem i $CJ$ točkom (Dobrilović, 2008).....	13
Slika 2. 5: Pojednostavljeni prikaz $ZND$ detonacijskog modela (Štimac, 2019) .....	15
Slika 3. 1: Graf promjene tlaka u vremenu za stabilnu detonaciju (Sućeska, 1995) .....	18
Slika 3. 2: Povezanost tlaka udarnog vala s debljinom metalne pločice (Sućeska, 1995).....	19
Slika 3. 3: Shema testa metalnom pločicom s elektrokontaktnim sondama (Sućeska, 1995).....	21
Slika 3. 4: Shema akvarij-testa (Sućeska, 1995).....	27
Slika 3. 5: Izvedba akvarij testa s blokom od pleksiglasa (Sućeska, 1995).....	28
Slika 3. 6: Shema postava mjerenja brzine udarnog vala u inertnom materijalu pomoću tehnologije lasera (Sućeska, 1995).....	30
Slika 3. 7: EPVG mjerni sustav (Sućeska, 1995) .....	33
Slika 3. 8: Shematski prikaz Helmholtz zavojnica te položaja ispitivanog uzorka u homogenom magnetskom polju (Jie i Ye, 2018). .....	33
Slika 3. 9: Shema mjernog sustava radiografske metode (Sućeska, 1995).....	36
Slika 3. 10: Shema mjernog sustava s manganinskim osjetilom (Sućeska, 1995) .....	38
Slika 3. 11: Shema PVF mjerača (Sućeska, 1995).....	40
Slika 3. 12: Shema mjernog sustava laserske interferometrije (Fabry-Perot interferometar) (Sućeska, 1995)	43
Slika 3. 13: Profili brzina masenog toka u vremenu za TNT različitih gustoća (Dremin et al., 1970).....	45
Slika 4. 1: Načelan postav metode mjerenja fotodiodama .....	46
Slika 4. 2: Električna shema mjernog kruga.....	47
Slika 4. 3: Načelan signal mjerenja .....	48



## POPIS TABLICA

Tablica 3. 1: Karakteristike TNT-a korištenog u primjeru izračuna (Sućeska, 1995).....	25
--	----

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
$B$	magnetska indukcija	T
$c_m$	brzina zvuka na udaljenosti $b$	m/s
$D$	brzina detonacije	m/s
$D, a$	Širina, debljina	m
$E$	energija	J
$E_s$	elektromotorna sila	V
$H$	entalpija	J/mol
$h$	visina	m
$I$	jakost električne struje	A
$k$	konstanta proporcionalnosti	-
$l, b$	duljina	m
$L_0$	prijedena udaljenost detonacijskog vala u promatranom vremenskom rasponu	mm
$P$	tlak	Pa
$p_m$	tlak na površini metalne pločice u kontaktu s eksplozivom	Pa
$Q_B$	električni naboj	C
$R$	električni otpor	$\Omega$
$T$	temperatura	K
$t$	vrijeme	s
$u$	brzina tvari iza fronte udarnog vala	m/s
$U$	unutarnja energija	J
$U$	napon	V
$U_m$	izmjereni pad napona	V
$U_r$	brzina reflektiranog vala	m/s
$V, v$	volumen	$m^3$
$v_c$	specifični volumen	$m^3, m^3/kg$
$v_c$	brzina na kontaktu eksplozivnog naboja i metalne pločice	m/s
$v_{sp}$	brzina slobodne površine metalne pločice	m/s
$W$	brzina masenog toka detonacijskih produkata u $c_j$ točki	m/s
$W_m$	brzina masenog toka metala	m/s

$X_0$	udaljenost od ravnine iniciranja i metalne folije prije nailaska detonacijskog vala	mm
$Y_0$	udaljenost od ravnine iniciranja i metalne folije u trenutku nailaska detonacijskog vala	mm
$\gamma$	politropski eksponent detonacije	-
$\rho$	gustoća	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{or}$	gustoća produkta detonacije	kg/m <sup>3</sup>

## 1. UVOD

Stupanj današnjeg stupnja razvoja svijeta u tehničkom i tehnološkom pogledu značajno je oblikovan brojnim otkrićima i izumima, među koje svakako spada i upotreba eksploziva. U domeni industrijskog razvoja, eksplozivi su ljudima omogućili učinkovito korištenje potencijalne energije određenih kemijskih spojeva i smjesa u vidu oslobođene kinetičke energije za obavljanje nekog neke vrste rada.

Prve planirane i evidentirane upotrebe eksploziva, početkom 17. stoljeća, bile su upravo u rudarskoj djelatnosti. Sve veća potreba društva za mineralnim i energetske sirovinama uvjetovala je daljnji razvoj eksploziva, njegove primjene i učinaka. Usavršavanje kvalitete, sigurnosnih zahtjeva i ekonomičnosti upotrebe eksploziva i inicijalnih sredstava provodi se i danas.

Suvremena civilna, odnosno gospodarska, upotreba eksploziva nije više ograničena samo na rudarsku djelatnost, već je zastupljena i u mnogim drugim granama industrije, znanostima i djelatnostima, poput medicine, šumarstva, svemirske tehnologije, obrade metala, rušenja objekata, formiranju iskopa za potrebe građevinarstva te ostalih.

Razumijevanje procesa eksplozivnih procesa omogućava adekvatno projektiranje upotrebe eksploziva te poznavanje njihovih svojstava na način djelovanja i učinak procesa. Mjerenje pojedinih detonacijskih veličina, primjerice masenog protoka čestica, omogućava i validiranje postavljenih teoretskih modela idealne i neidealne detonacije.

## 2. DETONACIJSKI PROCES

Pojmom eksplozivnih tvari obuhvaćeni su svi materijali i kemijski spojevi koji pri određenim uvjetima eksplodiraju. S druge strane, eksplozivi su proizvodi različitih namjena, ali sa zajedničkom svrhom iskorištenja energije oslobođene eksplozijom. Pod utjecajem vanjskog inicijalnog impulsa, tj. dovođenjem energije inicijalnog impulsa, eksplozivi formiraju stabilnu detonaciju.

Eksplozija je egzotermna reakcija koja u vrlo kratkom vremenu kemijski izmjeni početnu eksplozivnu tvar ili sustav. Istovremeno, tijekom eksplozije dolazi do ekspanzije nastalih plinovitih produkata, odnosno, pretvorbe potencijalne energije sustava u mehanički rad. Svaku eksplozivnu reakciju potrebno je pokrenuti (inicirati), odnosno dati joj određeni energetski impuls koji inicijalno kida veze na molekularnoj razini te potiče samoodrživu kemijsku reakciju slobodnih atoma s kisikom. Za razvijanje stabilne detonacije energija inicijalnog impulsa mora biti dostatne veličine. Iniciranje se najčešće izvodi inicijalnim eksplozivima koji su osjetljivi na udar, trenje ili plamen. Kako osjetljivost na početni impuls, ovisno o kemijskom sastavu i fizikalnim svojstvima, od eksploziva do eksploziva može varirati, nerijetko je i korištenje pojačnih detonatora (*eng. booster*) za eksplozive velike gustoće (Krsnik, 1989).

Specifično, eksplozija se može odvijati na dva načina: eksplozivnim sagorijevanjem (deflagracijom) ili detonacijom.

Detonacija je nadzvučni proces egzotermne kemijske izmjene (oksidacije) eksplozivne tvari pri kojemu se cijela polazna tvar pretvori u plinovite produkte u vremenu reda veličina mikrosekundi. Iniciranje reakcije se postiže djelovanjem udarnog vala nastalog pretvorbom izreagiranog materijala, a reakcija tako napreduje prenošenjem od sloja do sloja u eksplozivnoj tvari (Dobrilović, 2008).

S druge strane, prilikom deflagracije cijeli se opisani proces odvija podzvučnom brzinom te izostaju pojave udarnog (tlačnog) vala i ekspandirajući produkti.

Za detonaciju određene eksplozivne tvari, mora se postići sljedeće (Dobrilović, 2008):

- Materijal ima eksplozivna svojstva, odnosno sposobnost formiranja detonacije,
- Inicijalni impuls dovoljne je energije za poticanje stabilne detonacije u eksplozivu.

Kako bi se eksplozivna tvar mogla koristiti kao eksploziv, osim navedenih, mora zadovoljavati i sljedeće uvjete (Dobrilović, 2008):

- Neosjetljivost i stabilnost pri skladištenju i manipulaciji,
- Isključena mogućnost slučajne detonacije,
- Mogućnost pouzdanog iniciranja odgovarajućim impulsom,
- Inicijalni impuls energetski je niske vrijednosti u odnosu na oslobođenu energiju pri detonaciji.

Iniciranje detonacije u praksi primjene eksplozivnih tvari može nastati na sljedeće načine (Dobrilović, 2008):

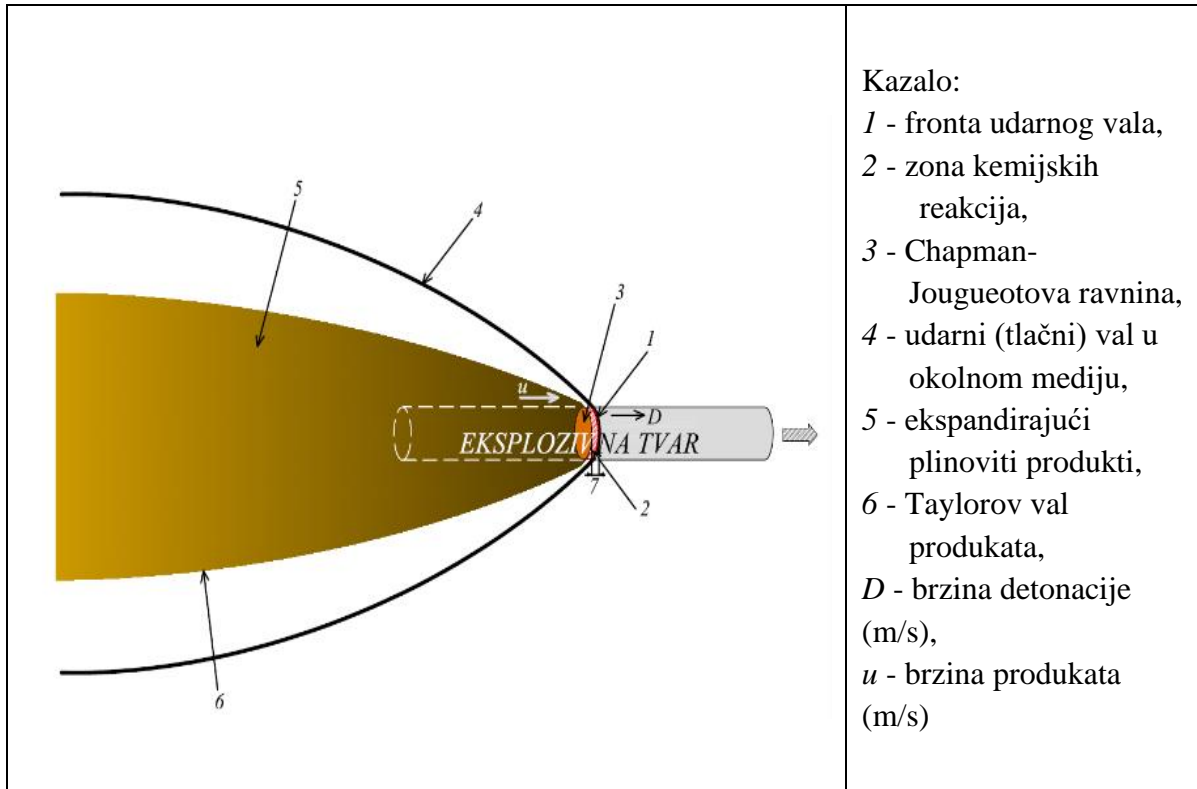
- Dovođenjem topline eksplozivnom materijalu,
- Prelaskom sagorijevanja u detonaciju (inicijalni eksplozivi),
- Djelovanjem udarnog impulsa i toplim točkama (sekundarni eksplozivi).

Propagiranje detonacije kroz energetski materijal odvija se pomoću defekata, šupljina, pora ili uklopaka (pr. mjehurići plina), u kristalnoj rešetci eksplozivne tvari ili smjese, koji predstavljaju središta daljnjeg širenja reakcije. Takav koncept naziva opisuje se stvaranjem toplih točaka (reaktivnih centara) koje lokaliziraju energiju udarnog vala i aktiviraju reakciju razgradnje. Nedostaci strukture doprinose boljim značajkama snažnih eksploziva, štoviše, važan su dio procesa iniciranja koji dovodi do eksplozije (Orlović - Leko, 2013).

Prolaskom udarnog vala, topla točka se adijabatski komprimira, a njegovim kolapsom povećava se gustoća energije, čime temperatura oko tople točke naglo raste. Širenju reakcije može pridonijeti i turbulencija koja nastaje kolapsom mjehurića. Tople točke, odnosno lokalno povećanje temperature, se u eksplozivnim smjesama mogu ostvariti i trenjem dviju tvrdih površina, pri čemu se razvija toplina, ali i zbog djelovanja tlaka u neposrednoj blizini čestica velike gustoće i čvrstoće (Ester, 2005).

Zbog vrlo visokih tlakova, energetski materijal ne reagira kao cjelina, već u malim segmentima. Fronti kemijskih reakcija prethodi fronta udarnog vala, zona visokotlačnog eksplozivnog materijala pripremljenog za reakciju (*Slika 2.1*). Izreagirani plinoviti produkti detonacije zauzimaju volumenu gotovo identičan polazni volumeni tvari, a

zahvaljujući već oslobođenoj toplini zagriyani su na visoke temperature, pod visokim pritiskom. Upravo radi te činjenice, prilikom svoje ekspanzije oslobađaju znatnu količinu energije, prateći frontu udarnog vala te se ujedno i šire kroz eksplozivnu tvar i okolinu (zrak, stijenu ili neko drugo sredstvo) (Dobrilović, 2008).



Slika 2. 1: Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2008)

Poznavanje detonacijskog procesa, uz kemijski sastav eksplozivne tvari te reakcija koje se pritom odvijaju, moguće je predvidjeti ponašanje eksplozivne tvari. Proces koji se odvijaju uspješno su opisani zakonima termodinamike, kemije i mehanike (Dobrilović, 2008).

## 2.1. Udarni val

Udarni valovi se stvaraju uslijed pojave poremećaja u nekom mediju, čija je brzina veća od lokalne brzine zvuka u istome. Osim eksplozija, uzročnici pojave udarnog vala mogu biti različiti – meteora, vulkanska erupcija, postizanje nadzvučne brzine zrakoplova, itd.

Udarni val možemo klasificirati kao veliki intenzivni valni poremećaj visokog tlaka. Jednako kao i obični, udarni val je vrsta gibajućeg poremećaja koji je prijenosnik energije. Prolazak udarnog vala donosi nagle promjene svojstva materijala. Disipacija energije udarnog vala proporcionalna je s udaljenošću, stoga udarni val s vremenom prelazi u zvučni val.

Fizikalno objašnjenje nastanka udarnog vala vezano je uz samu kinetiku čestica medija. One se mogu gibati samo pripadnom brzinom zvuka, a pojavom poremećaja čija je brzina veća od navedene, njihova nemogućnost daljnjeg porasta brzine očituje se rastom termodinamičkih veličina kao što su tlak ( $p$ ), gustoća ( $\rho$ ), temperatura ( $T$ ) i energija ( $E$ ). Mehanizam udarnog vala opisuje se na principu klipa koji se kreće unutar komore ispunjene zrakom. Ukupnu brzinu poremećaja možemo promatrati kao zbroj lokalne brzine zvuka i lokalne brzine čestica. Kretanjem klipa, zrak u njegovoj neposrednoj blizini biva komprimiran, dok je zrak na većoj udaljenosti od klipa u stanju mirovanja. Daljnjim pomicanjem dolazi do sve veće kompresije plinskog medija te porastom ranije navedenih termodinamičkih veličina. Udarni val javlja se u trenutku kada ukupna brzina poremećaja u mediju premaši vrijednost lokalne brzine zvuka, odnosno, kada se formira fronta koja se kreće nadzvučnom brzinom. Sam udarni val skok je tlaka i tok materijala, uzrokovan koncentracijom velike količine energije u mali volumen materijala, a prati ga područje potlaka koji uzrokuje kretanje medija natrag prema središtu nastanka poremećaja (Sućeska, 2020).



## 2.2. Teorije detonacije

U svrhu razumijevanja detonacijskog procesa, tijekom 19. i 20. stoljeća razvijale su se teorije koje opisuju detonacijske procese. Cilj teoretskih razlaganja detonacije je sažeti bazne zakone fizike i kemije koji najbolje opisuju prirodu spomenutog procesa, iz čega proizlazi bolje poznavanje procesa, njihovih karakteristika i kvantitativnih učinaka detonacije bilo koje eksplozivne tvari ili smjese. Dvije razvijene teorije, takozvana *CJ* teorija i *ZND* teorija, danas su opće prihvaćene te svojim sadržajem nadopunjavaju jedna drugu.

### 2.2.1 *Chapman - Jouguet-ova* hidrodinamička teorija

Zahvaljujući prethodnim saznanjima, Chapman (1899.) i Jouguet (1905.), vodeći se činjenicom da je detonacija zapravo reaktivni udarni val, nezavisno razvijaju klasičnu hidrodinamičku teoriju kasnije prozvanu *Chapman - Jouguetovom (CJ)* teorijom. Jednodimenzionalni model u kojem je kemijska energija trenutačno oslobođena u diskontinuiranoj udarnoj fronti (Ester, 2005) temelji se na pretpostavkama hidrodinamičke prirode stabilne detonacije te opisuje odnose veličina osnovnih termodinamičkih parametara prilikom odvijanja detonacijskog procesa. Bitno je napomenuti kako je interpretacija *CJ* teorije i danas je zadovoljavajuća osnova opisa detonacijskog procesa, s kojom je podudarnost eksperimentalno dobivenih podataka unutar granica točnosti od 5 % (Dobrilović, 2008).

Interpretaciju pretpostavaka teorije može se podijeliti na tri cjeline (Dobrilović, 2008):

- Ponašanje idealnog plina prilikom nagle adijabatske kompresije,
- Ponašanje produkata raspada (plinova detonacije) tijekom ekspanzije,
- Uvjeti za stvaranje i održanje detonacije (Rayleighov pravac).

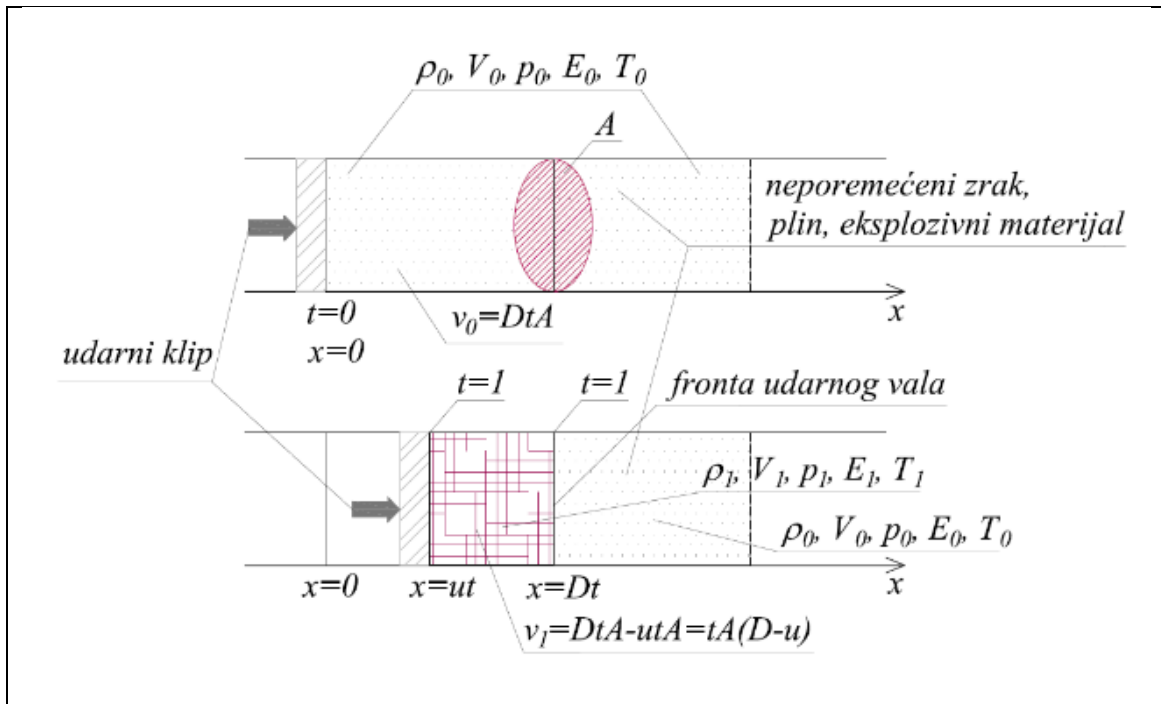
Teorijska obrada detonacijskog procesa zahtijeva određene pretpostavke i ograničenja (Dobrilović, 2008):

- Udarni val se kroz materijal kreće jednoosno i pravac njegova napredovanja je okomit na valnu frontu
- Valna fronta je ravnina bez zakrivljenosti, a ujedno je predstavljena i kao diskontinuitet u materijalu,
- Produkti detonacije nalaze se u kemijskoj i termodinamičkoj ravnoteži, iza fronte udarnog (detonacijskog) vala te su u njima kemijske reakcije završene
- Kemijske reakcije odvijaju se trenutno, odnosno širina zone kemijske reakcije jednaka je nuli
- Detonacijski proces je stabilan, a detonacijska brzina konstantna. Produkti kemijskih reakcija stabilnog su stanja bez obzira na položaj vala

Udarni val, kao jedna od važnijih promatranih pojava u procesu detonacije, može nastajati u materijalu bilo koje vrste i agregatnog stanja. Može se definirati kao šireći poremećaj u sredstvu čija je brzina veća od odgovarajuće brzine zvuka u samome mediju. Jednako kao i obični val, udarni je prijenosnik energije u sredstvu, no s razlikom razvijanja vrlo visokih tlakova te diskontinuiranim i naglim promjenama volumena, tlaka, gustoće i temperature samog medija. Udarni val, u okviru teoretskih pretpostavki *CJ* teorije, može nastati udarom klipa konačne dostatne brzine ili ubrzanjem klipa do iste. Da bi se udarni val održao, neophodno je postojanje stalnog izvora energije za njegovo gibanje, odnosno, van modela idealnog plina to bi označavalo nužnost postojanja egzotermnih kemijskih reakcija. (Dobrilović, 2008).

Obrazloženje *Chapman - Jougetove teorije* najjednostavnije se veže uz primjenu pretpostavki teorije za idealni plin na čvrstu eksplozivnu tvar.

Pojednostavljeni prikaz detonacije prema *CJ* teoriji može se vizualizirati pomoću mehanizma prikazanog na slici 2.2.



Slika 2. 2: Model udarnog klipa (Dobrilović, 2008)

Kruti klip, gibajući se početnom brzinom  $u$ , prvotno ulazi u idealni plinski medij, s početnim stanjem ( $0$ ) gustoće ( $\rho_0$ ), tlaka ( $p_0$ ), volumena ( $v_0$ ) temperature ( $T_0$ ) i unutarnje energije ( $E_0$ ). Ubrzavanjem klipa, idealni plin se stlačuje, zagrijava te mu se zbog porasta gustoće povećava i pripadna brzina zvuka u njemu. Infinitesimalnim porastima brzine klipa u vremenu, spomenuti poremećaj u plinskom mediju sve se brže širi, a valovi kojima se isti prenosi se superponiraju u udarni val (Dobrilović, 2008).

Zbog pripadne inercije koju medij posjeduje, u samim počecima komprimiranja ponaša se kao čvrsta prepreka. Posljedično, stanje u mediju se iz početnog stanja ( $0$ ) mijenja u stanje  $I$  ( $\rho_1 (> \rho_0)$ ,  $p_1 (> p_0)$ ,  $v_1 (> v_0)$ ,  $T_1 (> T_0)$  i  $E_1 (> E_0)$ ). Prijelaz iz opisanog stanja  $0$  u stanje  $I$  odvija se na fronti udarnog vala, vlastite (detonacijske) brzine  $D$  te brzine inicijalnog impulsa u mediju  $u$  (Slika 2.3). Vrijedi odnos  $D > u$  (Dobrilović, 2008).

Tok medija je, sukladno prethodno spomenutoj jednodimenzionalnoj naravi teorije, linearan i laminaran. Udarne fronta je prikazana kao planarni element koji je okomit na tok medija u sustavu (Ester, 2005).

Naglo komprimiranje idealnog plinskog medija odvija se na udarnoj adijabati, uz pretpostavke da se radi o sustavu bez gubitaka te da je, kako trenje na granicama cilindar - plinski medij, klip - plinski medij, tako i unutarnje trenje u mediju, nepostojeće.

Primjenjujući principe za koje je utvrđeno da vrijede u slučaju idealnog plina kao medija, teoriju možemo proširiti i uvesti eksplozivni materijal kao medij. Za isti će vrijediti jednaka, prethodno opisana načela.

Uvođenjem elementarnih pretpostavki o zakonima očuvanja vezanih uz održanje mase, momenta i energije dolazi se od Rankine - Hugonotovih udarnih relacija (Ester, 2005; Dobrilović, 2008):

#### 1. Očuvanje mase

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{D-u}{D} \quad (2.1)$$

Gdje je:

$\rho_0$  - gustoća eksplozivnog materijala (stanje  $0$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_1$  - gustoća eksplozivnog materijala (stanje  $I$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )

$D$  - brzina udarnog vala ( $\text{m/s}$ )

$u$  - brzina tvari iza fronte udarnog vala ( $\text{m/s}$ )

Prolaskom udarnog vala količina mase eksplozivnog materijala ostaje nepromijenjena (Štimac, 2019). Odnosno, zaključuje se kako je protok mase kroz frontu udarnog vala konstantan.

## 2. Očuvanje količine gibanja ili momentuma

$$p_1 - p_0 = \rho_0 Du \quad (2.2)$$

Promjena količine gibanja proporcionalna je u sustav uloženoj kompresijskoj sili (Štimac, 2019), a impuls sile odgovorne za kompresiju zapravo je razlika tlakova neporemećenog i stlačenog materijala.

## 3. Očuvanje energije

$$E_1 - E_0 = \frac{p_1 u}{D\rho_0} - \frac{1}{2}u^2 \quad (2.3)$$

Gdje je:

$E_0$  - unutarnja energija eksplozivnog materijala u stanju 0 (J)

$E_1$  - unutarnja energija eksplozivnog materijala u stanju 1 (J)

Koje se odnosi na promjenu specifične unutarnje energije, a izvedeno je primjenjujući načela zakona o očuvanju energije.

Ako se uvaži da je  $p_1 \gg p_0$ , jednadžba 2.3 može se promatrati i kao:

$$E_1 - E_0 \approx \frac{u^2}{2} \quad (2.5)$$

Shodno posljednjem izrazu, zaključuje se proporcionalnost odnosa unutarnje i kinetičke energije uslijed udarnog vala velike amplitude (Ester, 2005). Daljnjim izvodima vidljivo je kako promjena energije komprimiranog plina odgovara radu stlačivanja (Štimac, 2019).

Manipulacijom sva tri izraza očuvanja (2.1, 2.2 i 2.3), dobiva se *Hugoniotova* jednadžba udarnog vala (2.4):

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2}(p_1 + p_0)(v_0 - v_1) \quad (2.4)$$

Hugoniotova jednadžba udarnog vala prikazuje moguća stanja u sustavu iza udarne fronte (Cooper, 1997).

Budući da se cijeli proces prikazuje termodinamički, odnosno u  $p$ - $v$  dijagramu, uvođenjem entalpije ( $H$ ) jednadžba 2.4 prelazi u sljedeći oblik:

$$H_1 - H_0 = \frac{1}{2}(p_1 - p_0)(v_0 + v_1) \quad (2.5)$$

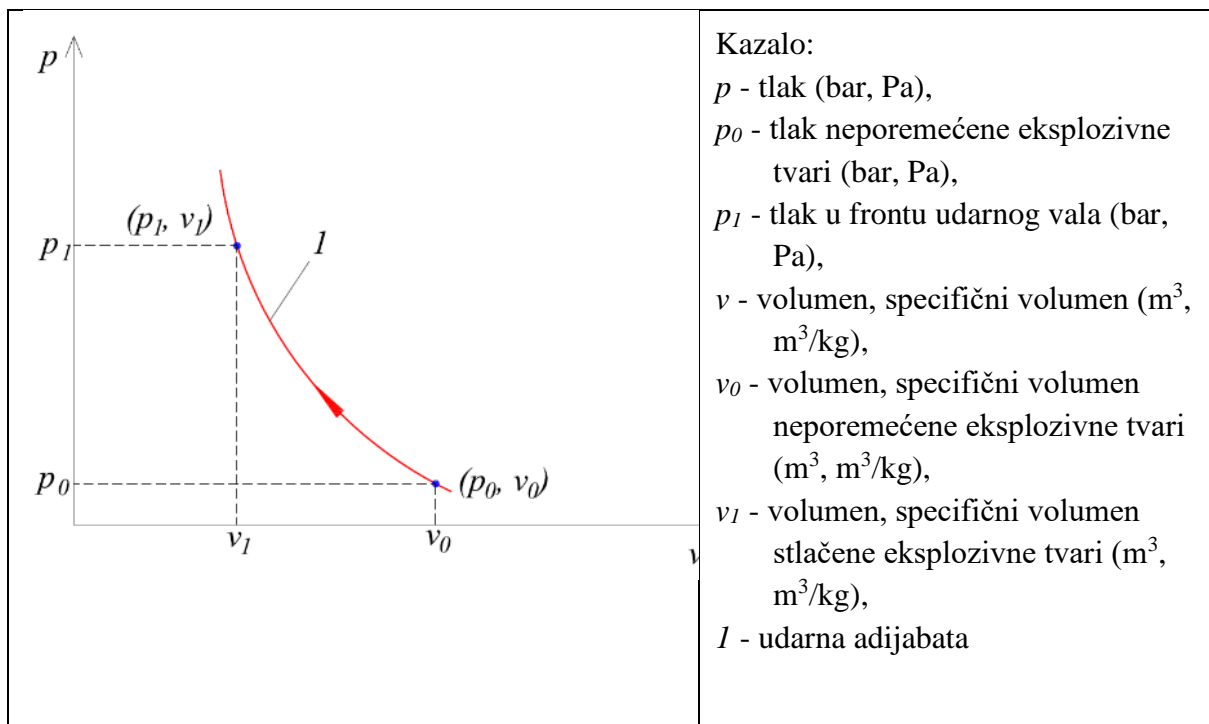
Entalpiju ( $H$ ), kao pojam termodinamičke funkcije stanja ravnoteže u nekom sustavu, definira se kao suma unutarnje energije ( $U$ ,  $E$ ) te umnoška tlaka ( $p$ ) i volumena ( $v$ ) (Cooper, 1997).

Kako je očekivani ishod teorije linearna jednadžba, rješavanjem sustava 2.1 i 2.2 dobiva se sljedeće (2.6):

$$-\rho_0^2 D^2 = \frac{\rho_1 - \rho_2}{v_1 - v_0} \quad (2.6)$$

Jednadžbom 2.6 reprezentiran je Rayleighov pravac u  $p$ - $v$  dijagramu (Ester, 2005). Rayleighov pravac spaja početne i krajnje točke na Hugoniotovoj liniji (udarnoj adijabati) (Slika 2.3) ( $(p_0, v_0)$  i  $(p_1, v_1)$ ) te je ujedno i poveznica između početne neizreagirane eksplozivne tvari i produkata. Stabilna brzina detonacije u stacionarnom procesu definira se upravo nagibom spomenutog pravca, točnije kutom koji zatvara s apscisom  $p$ - $v$  dijagrama (2.7). Njegov nagib je zbog stalan tijekom cijelog procesa detonacije jer je brzina konstantna (Dobrilović, 2008).

$$\tan \varphi = \frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1} = \rho_0^2 D^2 = (D - u)^2 \rho_1^2 \quad (2.7)$$



Slika 2. 3: Prikaz udarne adijabate eksploziva (Hugoniotove linije) u  $(p, v)$  dijagramu (Dobrilović, 2008)

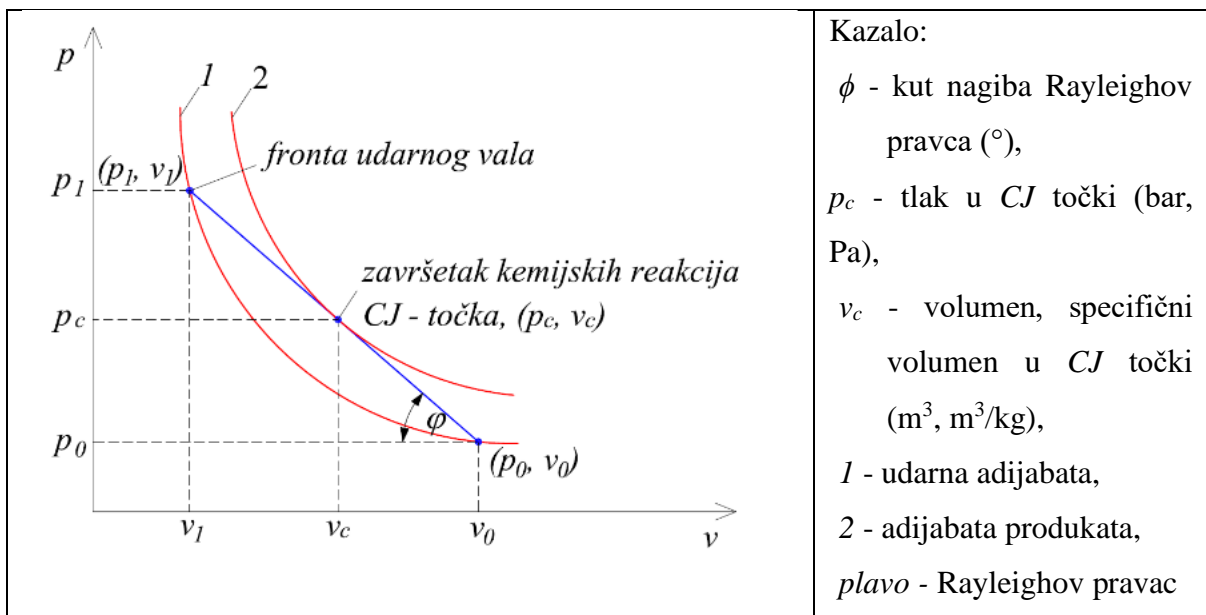
Eksplziv je u fronti udarnog vala doveden do stanja koje je optimalno za početak lančanih egzotermnih kemijskih reakcija. Kemijska priroda promjene tvari u eksplozivnom materijalu uvjetovana je naglim skokom temperature u stlačenom dijelu materijala. Odvijanje egzotermnih kemijskih reakcija ograničeno je na prostor iza primarno stlačene zone u širini od 1-1,5 nm, a njihovo napredovanje odvija se detonacijskom brzinom. Završetkom reakcija, produkti detonacije, volumena ( $v_c$ ) i tlaka ( $p_c$ ) nalaze se na adijabati plinovitih produkata. Ta adijabata različita je od prethodno spomenute adijabate eksploziva koja nastaje zbog kompresije udarnim valom, a opisuje stanje izreagirane eksplozivne tvari. Izreagirana tvar se u pravilu sastoji od plinova detonacije koji se nalaze iza udarne fronte u pojasu od 20 do 100  $\mu\text{m}$ .

Rayleighov pravac u  $p$ - $v$  dijagramu, kao poveznica udarne adijabate eksploziva i udarne adijabate produkata reakcije, na sebi nosi tri točke značajne za odvijanje detonacije (Slika 2.4):

- $(p_0, v_0)$ , područje niskog tlaka - nadzvučan proces (udarna adijabata eksploziva)
- $(p_1, v_1)$ , područje visokog tlaka - podzvučan proces (udarna adijabata eksploziva)

- $(p_c, v_c)$ , stanje izreagirano eksplozivnog materijala, trenutak prije ekspanzije (udarna adijabata produkata reakcije)

Iako su teoretski mogući različiti položaji točke  $(p_c, v_c)$ , odabrana je  $(p_c, v_c)$  koja se nalazi na Rayleighovom pravcu. Točka tog položaja naziva se i *CJ* točkom, a predstavlja jedini mogući stacionarni proces, odnosno stabilnu detonaciju.



Slika 2. 4: Proces detonacije u  $p$ - $v$  dijagramu s naznačenim adijabatama, Rayleighovim pravcem i *CJ* točkom (Dobrilović, 2008)

*CJ* teorija svojim pojednostavljenim jednodimenzionalnim prikazom procesa detonacije omogućava računanje parametara detonacije (brzina, tlak, temperatura i dr.) Pritom valja napomenuti kako je u realnim uvjetima detonacija trodimenzionalni proces (Ester, 2005).



### 2.2.2 ZND teorija

ZND teorija (Zeldovich (1940), Von Neuman (1942), Döring (1943) nadopunjava CJ teoriju u vidu njezinog najvećeg nedostatka zanemarivanja zone kemijske reakcije. Trojica autora nezavisnim su radom u svoje teorije uspjeli implementirati interakciju kemijske kinetike s detonacijskim valom, iza kojeg slijedi zona reakcije (Štimac, 2019).

Kao što je u prethodnom potpoglavlju navedeno, detonacija je trodimenzionalni proces. ZND teorija donosi odmak od jedne dimenzije, obrađene u CJ teoriji, na dvije dimenzije. Fronta udarnog vala, sukladno uvedenoj dvodimenzionalnosti, više nije planarni element, nego se sastoji od zakrivljenih segmenata (Ester, 2005).

Osnovna prednost koju omogućava ZND teorija jest modeliranje detonacijskog vala. Pretpostavlja se i konačna širina zone reakcija te njihova konačna brzina (Štimac, 2019).

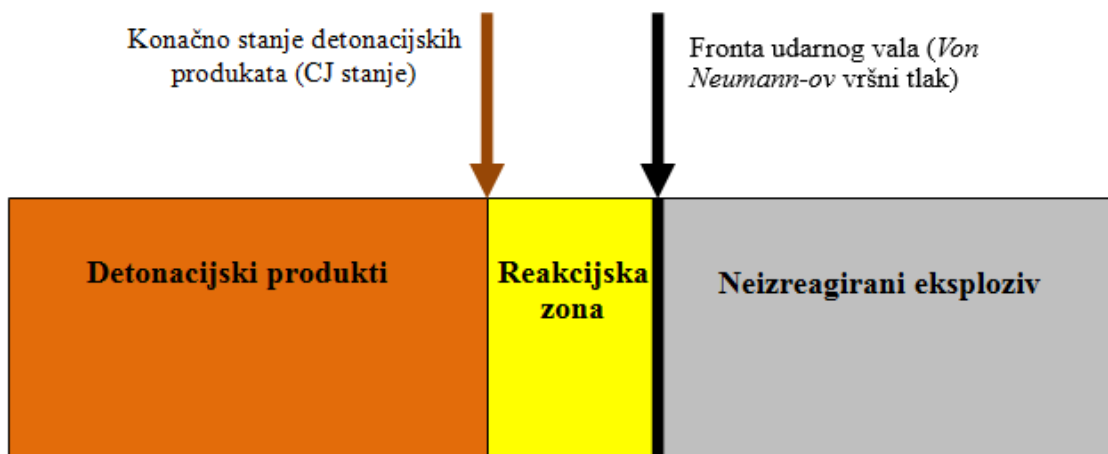
Zona kemijskih reakcija, sa svojom konačnom širinom iza udarnog vala, dijeli se na dvije zone:

1. Indukcijska zona
2. Zona oslobođenja energije

Ovakvom podjelom, ZND teorija veliki naglasak stavlja na kemijsku kinetiku te njezinu ulogu u teoriji detonacije.

U CJ teoriji kemijske reakcije odvijaju se na fronti udarnog vala. Međutim, ZND teorija uvodi načelo kojime udarni val prvo komprimira materijal do von Neumann stanja, odnosno, *von Neumann* vršnog tlaka (*eng. von Neumann peak*) (Slika 2.5). Tako stlačeni eksplozivni materijal podliježe iniciranju, no reakcije se i dalje ne odvijaju. Sam *von Neumann peak* označava početak egzotermnih kemijskih reakcija koje, zbog očuvanja stacionarnosti i stabilnosti detonacije, završavaju u ravnotežnoj CJ točki.

U reakcijskoj zoni, stanje bilo koje točke spojivo je sa stanjem neizreagiranog materijala zakonima održanja (očuvanja) opisanim u prošlom potpoglavlju (Štimac, 2019).



Slika 2. 5: Pojednostavljeni prikaz ZND detonacijskog modela (Štimac, 2019)

### 3. PREGLED DOSADAŠNJIH METODA ISPITIVANJA

Poznavanje parametara detonacijskog vala od značaja je zbog razumijevanja procesa, poznavanja ovisnosti pojedinih fizikalnih veličina procesa te mogućnosti procjene djelovanja detonacijskog procesa.

Tijekom polovice prošloga stoljeća na području SAD-a i SSSR-a razvijeni su mnogobrojne metode temeljene na postavka *ZND* teorije kojima je cilj bio utvrditi parametre detonacijskog vala. Razvijene metode bile su raznolike, od potpuno teoretskih do eksperimentalnih metoda (Sućeska, 1995).

Ugrubo, sve razvijene metode moguće je podijeliti u dvije skupine, ovisno o načinu utvrđivanja parametara detonacije (Sućeska, 1995):

- Direktno metode - obuhvaćaju metode u kojima se detonacijski parametri dobivaju neposredno;
  1. Određivanje brzine masenog toka detonacijskih produkata pomoću elektromagnetske metode
  2. Direktno određivanje detonacijskog tlaka pomoću manganinskih<sup>1</sup> osjetila
  3. Određivanje brzine masenog toka detonacije pomoću rentgenskih X- zrakaRezolucija metoda ove skupine je reda veličine nanosekundi, što je i dalje nedovoljno precizno za određivanje parametara u zoni kemijskih reakcija i samoj fronti udarnog vala.
- Metode koje su temeljene na očitanjima refleksije udarnog vala o određenu barijeru;
  1. Metoda određivanja detonacijskih parametara pomoću tanke metalne pločice
  2. Optičke metode
  3. Akvarij-test
  4. Laserska interferometrija

---

<sup>1</sup>Manganin - Legura sačinjena od 86 % bakra, 12 % mangana i 2 % nikla (Kashani et al, 2009)

Ova skupina metoda obuhvaća rezolucije od reda veličine nanosekundi, ali kod određenih ispitivanja, kao primjerice laserska interferometrija, moguća je i veća razlučivost koja naginje manjem redu veličine.

### 3.1. Test metalnom pločicom (*Flying Plate Test*)

#### 3.1.1 Princip metode

Određivanje detonacijskog tlaka eksploziva u ovoj se metodi bazira na brzini kretanja metalne pločice ubrzane detonacijom u slobodnom gibanju. Metodu je prvi iznio Goranson (1945.), a narednim godinama uslijedile su brojne nadogradnje.

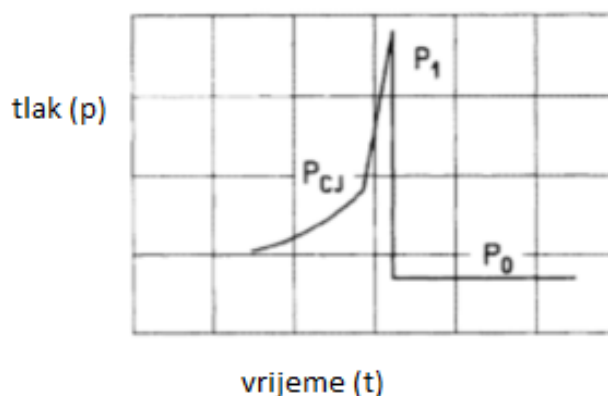
Izračun detonacijskog tlaka temelji se na činjenici da su tlak i količina gibanja čestica odnosno toka materijala jednaki na obje strane kontaktne površine, odnosno na površini pločice u kontaktu s produktima detonacije i na suprotnoj, slobodnoj površini. Koristeći zakon o očuvanju količine gibanja te jednadžbu udarne adijabate produkata na metalnoj pločici dolazimo do informacija o detonacijskom procesu.

Brzina metalne pločice može se utvrditi različitim metodama, kao primjerice, elektrokontaktnim, elektromagnetskim, piezoelektričnim ili optičkim metodama.

#### 3.1.2 Opis metode

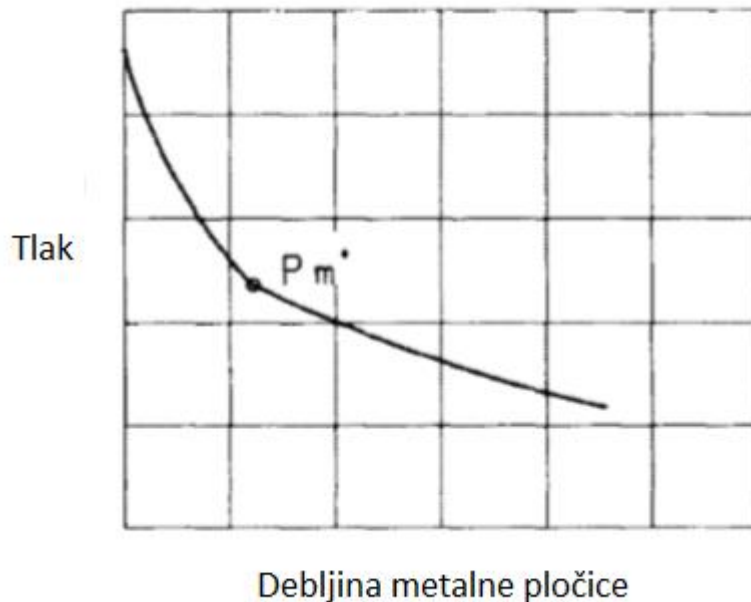
Udarom detonacijskog vala na metalnu pločicu, koja je ujedno i u kontaktu s eksplozivnim nabojem, dolazi do njihove interakcije.

Prema grafu (*Slika 3.1*), mogu se razaznati specifične točke na  $p-t$  krivulji koje upućuju na odvijanje različitih faza detonacije. Područje naglog pada detonacijskog tlaka odgovara utjecaju zone kemijskih reakcija na parametre udarnog vala na metalnoj pločici.



Slika 3. 1: Graf promjene tlaka u vremenu za stabilnu detonaciju (Sućeska, 1995)

Kada bi debljina metalne pločice bila jednaka nuli (Slika 3.2), odnosno kada bi metalna pločica bila isključivo planarni element, izmjereni tlak odgovarao bi Von Neumann vršnom tlaku (eng. *Von Neumann peaku*).



Slika 3. 2: Povezanost tlaka udarnog vala s debljinom metalne pločice (Sućeska, 1995)

Kako bi se valjano odredio graf odnosa udarnog vala o debljini metalne pločice, neophodno je utvrditi funkcijsku povezanost brzine na slobodnoj površini pločice s njezinom debljinom. Uz te podatke moguće je dobiti odgovarajući tlak vala kao funkciju debljine pločice pomoću jednadžbi triju zakona očuvanja, opisanih u prethodnom poglavlju.

Brzina na slobodnoj površini metalne pločice može se eksperimentalno odrediti pomoću prije navedenih metoda.

Za opis principa metode korištena su tri para elektro kontaktnih sondi. Načelo metode opisano je primjerom mjerenja elektro kontaktnim sondama. Prvi par sondi dodiruje površinu prvog zaslona i zatvara strujni krug u trenutku kada udarni val prijeđe površinu prvog zaslona te služi kao indikator početka mjerenja vremena, odnosno kretanja pločice. Drugi par sondi dodiruje metalnu pločicu i zatvara strujni krug u trenutku kada udarni val prijeđe slobodnu površinu metalne pločice. Treći par nalazi se na slobodnoj površini drugog zaslona s vanjske strane te zatvara strujni krug kada ga metalna pločica udari.

Podatak o visini prstena služi kao ulaz za udaljenost pri izračunu brzine slobodne površine metalne pločice.

Signali koji se primaju s elektrokontaktne sondi mjere se i bilježe na osciloskopu. Promjene, odnosno padovi napona koje osciloskop očitava služe za izračun brzine udarnog vala prema sljedećem nizu jednadžbi (Sućeska, 1995) :

$$U_m = \frac{d}{t_m} \quad (3.1)$$

Gdje je:

$U_m$  – izmjereni pad napona na osciloskopu (V);

$d$  – debljina metalne pločice (m);

$t_m$  – vremenski interval očitavanja s prva dva para elektrokontaktne sondi (s).

Brzina slobodne površine metalne pločice ( $v_{sp}$ ) računa se prema vremenskom intervalu između drugog i trećeg para sondi. U tom intervalu uključeno je vrijeme kretanja pločice ( $t_s$ ) i vrijeme kretanja udarnog vala na drugom zaslonu. Kako je brzina kretanja metalne pločice manja od brzine udarnog vala, uvodi se korekcija s visinom metalnog prstena:

$$t_s < t_m \quad (3.2)$$

Gdje je:

$t_s$  - vrijeme kretanja metalne pločice od drugog do trećeg para sondi

$t_m$  - vrijeme kretanja udarnog vala od drugog do trećeg para sondi

Uvođenjem korekcije dobivamo sljedeću nejednadžbu:

$$\frac{h}{v_{sp}} < \frac{d}{U_m} \quad (3.3)$$

Gdje je:

$h$  – visina metalnog prstena (m);

$v_{sp}$  – brzina slobodne površine metalne pločice (m/s);

$d$  – debljina metalne pločice (m);

$U_m$  - izmjereni pad napona na osciloskopu (V).

Kako je drugi zaslon desetak puta tanji od samog prstena, usporavanje udarnog vala na zaslonu je zanemarivo. Sukladno tome,  $t_s$  se računa prema izrazu (Sućeska, 1995):

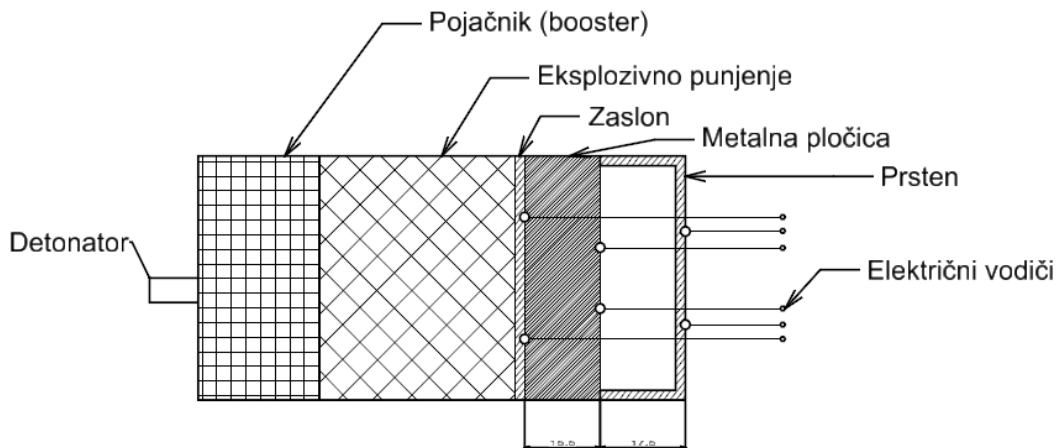
$$t_s = \frac{h}{v_{sp}} \quad (3.4)$$

Iz čega proizlazi:

$$v_{sp} = \frac{h}{t_s} \quad (3.5)$$

Prema Goransonovom postulatu, brzina slobodne površine metalne pločice u trenutku kada udarni val napusti njenu površinu iznosom je jednaka dvostrukoj brzini masenog toka produkata iza udarne fronte vala. Taj podatak proizlazi iz relacije parametara udarnog vala na kontaktu eksplozivne tvari i inertnog materijala. Shodno tome, brzina masenog toka detonacijskih produkata ( $W_m$ ) dobiva se prema sljedećoj jednadžbi:

$$W_s = \frac{v_{sp}}{2} = \frac{h}{2t_s} \quad (3.6)$$



Slika 3. 3: Shema testa metalnom pločicom s elektrokontaktnim sondama (Sućeska, 1995)



### 3.1.3. Rezultati metode

Prilikom udara detonacijskog udarnog vala u metalnu pločicu, val se:

- a) reflektira od kontakta u eksploziv odnosno produkte detonacije,
- b) prolazi u metalnu pločicu te se i u njoj reflektira od kontakta s zrakom čime u njoj nastaje glavni, refraktirani val i reflektirani val

Uzimajući u obzir interakciju eksplozivnog naboja i metalne pločice na njihovom kontaktu, odnos tlaka udarnog vala i brzine masenog toka detonacijskih produkata moraju na kontaktu biti jednakoni tlaku na kontaktu pločice te masenog toka u pločici, te ih možemo označiti izrazom 3.7:

$$p_m = p + \rho_{0r} U_r (W - W_m) \quad (3.7)$$

Gdje je:

$p_m$  – tlak na površini metalne pločice u kontaktu s eksplozivom (Pa)

$p$  – tlak u *CJ* točki (Pa)

$\rho_{0r}$  – gustoća produkta detonacije (kg/m<sup>3</sup>)

$U_r$  – brzina reflektiranog vala (m/s)

$W$  – brzina masenog toka detonacijskih produkata u *CJ* točki (m/s)

$W_m$  – brzina masenog toka metala (m/s)

Prema gornjem zbroj tlakova detonacijskog vala i reflektiranog vala u produktima te udarnog vala u metalu i reflektiranog vala moraju biti jednaki.

Prema zakonu očuvanja količine gibanja (momentuma) i izrazima 3.8 i 3.9 proizlazi relacija 3.10 (Sućeska, 1995):

$$p = \rho_0 D W \quad (3.8)$$

$$p_m = \rho_{0m} U_m W_m \quad (3.9)$$

$$\frac{p_m}{p} = \frac{\rho_{0m} U_m}{\rho_0 D} \cdot \frac{\rho_0 D + \rho_{0r} U_r}{\rho_{0m} U_m + \rho_{0r} U_r} \quad (3.10)$$

Uvođenjem izraza za akustičnu aproksimaciju 3.11, izraz 3.10 pojednostavljuje se na oblik Goransonove jednadžbe (3.12):

$$\rho_{0r} U_r = \rho_0 D \quad (3.11)$$

$$p = \frac{p_m}{2\rho_{0m} U_m} (\rho_0 D + \rho_{0m} U_m) \quad (3.12)$$

Implementacijom jednog od oblika zakona o očuvanju gibanja (3.13) u 3.12 dolazimo do sljedećeg izraza (3.14):

$$W_m = \frac{p_m}{\rho_{0m} U_m} \quad (3.13)$$

$$p = \frac{1}{2} W_m (\rho_0 D + \rho_{0m} U_m) \quad (3.14)$$

Prema eksperimentalno utvrđenoj vezi između brzine slobodne površine metalne pločice i njene debljine te karakteristikama upotrijebljenog eksploziva, razlikuju se dva slučaja (Sućeska, 1995):

- *Slučaj 1:* *CJ* točka je jasno razlučiva te se nakon nje nagib krivulje znatno mijenja;
- *Slučaj 2:* *CJ* točka se ne nalazi na krivulji, odnosno prisutna je linearna ovisnost brzine slobodne površine metalne pločice i njezine debljine.

Prvi je slučaj karakterističan za eksplozive kojima je zona kemijskih reakcija prostrana, a debljina pritom korištene metalne pločice manja je ili jednaka širini zone kemijskih reakcija. Pri navedenom, detonacijski je tlak moguće izračunati na sljedeće načine (Sućeska, 1995):

- Kada su parametri  $\rho_0$ ,  $\rho_{0m}$  i  $D$  poznatni, odnosno prethodno utvrđeni;
- Kada je brzina metalne pločice utvrđena eksperimentalno za nekoliko različitih debljina pločice;
- Primjenom *Goransonovog* postulata danog izrazom 3.6;
- Izračunom brzine udarnog vala za odgovarajuću debljinu metalne pločice putem jednadžbi adijabatskog šoka preko izraza 3.15 ili 3.16;

$$U_m = c + sW_m \quad (3.15)$$

$$U_m = c + sW_m + zW_m^2 \quad (3.16)$$

Gdje su konstante  $c$ ,  $s$  i  $z$  eksperimentalno utvrđene.

- Primjenom oblika *Goransonove* jednadžbe (3.14) dobiva se vrijednost tlaka kao funkcijska ovisnost debljine pločice. Za teoretsku debljinu pločice koja je jednaka nuli, vrijednost tlaka odgovara vršnom tlaku u zoni kemijskih reakcija (*von Neumann* vršni tlak), dok je njegova vrijednost u točki tranzicije jednaka detonacijskom tlaku, odnosno tlaku u samoj *CJ* točki;

- Određivanjem debljine pločice koja odgovara *CJ* točki otvara i mogućnost izračuna širine zone kemijskih reakcija ( $\delta$ ) prema odgovarajućem izrazu 3.17.

$$\delta = \frac{b(W_m + c_m - U_m)(D - W_m)}{D(W_m + c_m + v_c)} \quad (3.17)$$

Gdje je:

$v_c$  – brzina na kontaktu eksplozivnog naboja i metalne pločice (m/s);

$c_m$  – brzina zvuka na udaljenosti  $b$  (m/s);

$U_m$  – brzina udarnog vala na metalnoj pločici (m/s).

Ukoliko stanje *CJ* točke nije postignuto eksperimentalno, prisutan je ranije opisan drugi slučaj (s lineranom ovisnošću parametara brzine i debljine metalne pločice), gdje se obično radi o upotrebljenom eksplozivu s uskom zonom kemijskih reakcija ili upotrebljenoj metalnoj pločici veće debljine. U takvim slučajevima, izračun detonacijskog tlaka moguć je na sljedeće načine (Sućeska, 1995):

- Kada su parametri  $\rho_0$ ,  $\rho_{0m}$  i  $D$  poznati, odnosno prethodno određeni odgovarajućom metodom.
- Kada je brzina metalne pločice utvrđena eksperimentalno za nekoliko različitih debljina pločice;
- Pronalaženjem prikladnog analitičkog izraza za povezanost brzine metalne pločice i debljine postupkom iteracije ili grafički, ekstrapolacijom spomenute funkcijske povezanosti za teoretsku debljinu pločice koja je jednaka nuli;
- Korištenjem izraza 3.6 za izračun masenog toka detonacijskih produkata u slučaju brzine metalne pločice teoretske nulte debljine metalne pločice;
- Pri poznatoj jednadžbi adijabatske kompresije na metalnoj pločici, moguće je izračunati vrijednost brzine udarnog vala pri teoretskoj nultoj debljini metalne pločice;
- Jednostavnim izračunom detonacijskog tlaka pomoću *Goransonove* jednadžbe (3.14).

Također, postoji i alternativni način određivanja *CJ* točke i njoj pripadnoj detonacijskog tlaka. Nizom mjerenja brzina slobodnih površina metalnih pločica od različitih materijala, koje posljedično imaju i različite iznose impedancija ( $r_{0m}U$ ). Korištenjem isključivo

pločice čija je debljina veća od pripadne širine zone kemijskih reakcija, dobiva se linearna relacija brzine pločice i njene debljine (ranije opisani *Slučaj 2*). Metodom ekstrapolacije za nultu debljinu pločice na spomenutoj relaciji u grafičkom obliku, dobiva se brzina na kontaktu metalne pločice i detonacijskih produkata na samom početku njihove interakcije. Ovisno o odnosu impedancija detonacijskih produkata i upotrebjene metalne pločice, javlja se refleksijski (kada je impedancija pločice veća) ili rarefakcijski (kada je impedancija detonacijskih produkata veća) val koji se započinje kretati kroz detonacijske produkte.

Ako se izradi krivulja spomenutih impedancijskih omjera za niz pločica izrađenih od različitih materijala u  $p-W$  (tlak – brzina masenog toka) koordinatama, točka presjeka krivulje s pravcem danim izrazom 3.8 predstavlja  $CJ$  točku. Presjecište, odnosno  $CJ$  točka mjesto je u kojem su iznosi impedancija pločice i detonacijskih produkata jednaki. U tom slučaju, ne dolazi niti do rarefakcije niti do usporavanja detonacijskih produkata. Štoviše, parametri detonacijskog i udarnog vala na kontaktu pločice i produkata jednaki su parametrima samog udarnog vala. Opisani postupak naziva se tehnikom usklađivanja impedancija (Sućeska, 1995).

Primjerice, za eksplozivno punjenje trinitrotoluena (TNT), karakteristika danih u *Tablici 3.1*.

Tablica 3. 1: Karakteristike TNT-a korištenog u primjeru izračuna (Sućeska, 1995)

<b>Eksploziv</b>	<b>Gustoća (<math>\rho</math>)</b>	<b>Brzina pri idealnoj detonaciji</b>
Trinitrotoluen (TNT)	1,637 g/cm <sup>3</sup>	6 942 m/s

Ovisnos brzine slobodne površine metalne pločice o njenoj debljini dana je izrazom 3.18:

$$v_{sp} = 2,468 - 0,00642 \cdot d \quad (3.18)$$

Gdje je:

$v_{sp}$  – brzina slobodne površine metalne pločice (km/s)

$d$  – debljina metalne pločice (mm)

Pritom su korištene aluminijske pločice debljina u rasponu od 2,3 do 51 mm, kojima nije bilo moguće eksperimentalno dosegnuti  $CJ$  točku.

Upotrebom izraza 3.6 proizlazi da je odgovarajuća brzina masenog toka jednaka sljedećem (3.19):

$$W_m = \frac{v_{sp}}{2} = \frac{2,468}{2} = 1,234 \text{ km/s} \quad (3.19)$$

Jednadžba adijabatske kompresije aluminijske može se izraziti kao 3.20:

$$U_m = 5,15 + 1,37 \cdot W_m \quad (3.20)$$

Uvrštavanjem  $W_m$  dobivenog u 3.19, izraz 3.20 daje vrijednost od 6,84 km/s.

Krajnji rezultat detonacijskog tlaka (18,78 GPa) dobivamo pomoću Goransonove jednadžbe (3.14), u koju unosimo izračunate vrijednosti  $U_m$ ,  $W_m$ ,  $\rho_0$  i  $\rho_m$  (Sućeska, 1995).

## 3.2. Akvarij test

### 3.2.1. Princip metode

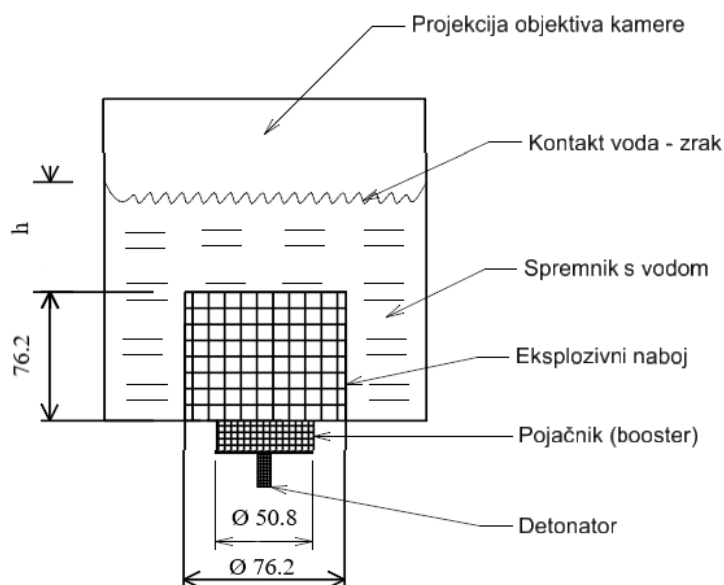
Akvarij test je u suštini modifikacija testa metalnom pločicom u kojemu se metalna pločica zamjenjuje vodom ili nekim drugim optički transparentnim materijalom (pr. pleksiglas). Umjesto određivanja brzine slobodne površine metalne pločice, bilježi se vremenska funkcija prolaska udarnog vala kroz transparentni materijal (Sućeska, 1995).

Poznavajući funkcijsku povezanost brzine udarnog vala s udaljenošću te jednadžbu adijabatske kompresije korištenog inertnog materijala, mogu se izračunati brzina masenog toka detonacijskih produkata iza udarnog vala te detonacijski tlak ispitivanog eksploziva (Sućeska, 1995).

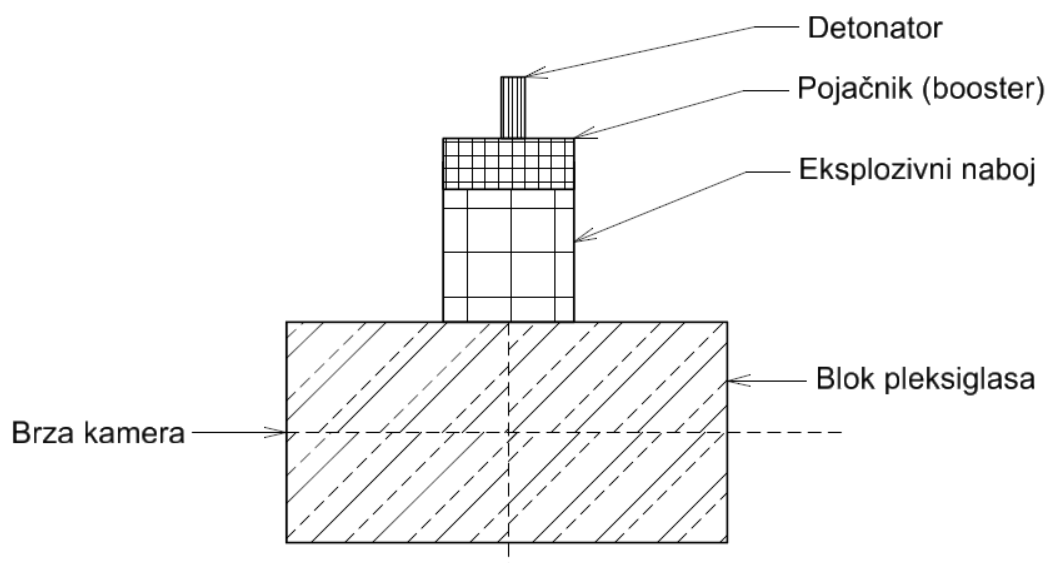
### 3.2.2. Opis metode

Eksplozivni naboj promjera 72 mm te duljine 144 mm uranja se u spremnik napunjen destiliranom vodom.

Iniciranjem naboja i pokretanjem detonacije, stvoreni udarni val kreće se vodom izazivajući promjenu transparentnosti vode. Pomoću brzih kamera snima se pozicija udarnog vala kao funkcija vremena. Spremnik vode pozadinski je osvijetljen snažnim izvorom svjetlosti, poput argonskog lasera (*eng. Argon flash bomb*) (Sućeska, 1995). Na slikama 3.4 i 3.5 prikazane su sheme akvarij testa za vodeni spremnik i blok pleksiglasa.



Slika 3. 4: Shema akvarij-testa (Sućeska, 1995)



Slika 3. 5: Izvedba akvarij testa s blokom od pleksiglasa (Sućeska, 1995)

### 3.3. Laserska metoda

#### 3.3.1. Princip metode

Određivanje detonacijskih parametara i strukture detonacijskog vala izvodi se na temelju brzine udarnog vala u inertnom i optički transparentnom sredstvu. Princip je jednak prethodno opisanom *akvarij testu*, uz iznimku korištenja laserske tehnologije. Lasersku metodu karakterizira bolja, nanosekundna rezolucija, koja omogućava ne samo dobivanje detonacijskih parametara, već i strukture detonacijskog vala, odnosno uočavanje zone kemijskih reakcija (Sućeska, 1995).

Brzina udarnog vala u inertnom sredstvu kao funkcija udaljenosti od eksplozivnog naboja ili inertnog materijala određuje se pomoću refleksije laserske zrake o optičku barijeru pomoću fotomultiplikatora i osciloskopa. Iz grafa brzine udarnog vala kao funkcije udaljenosti za materijal s poznatim podacima adijabate udarnog vala moguće je izračunati brzinu masenog toka produkata detonacije putem Goransonove jednadžbe, dok se širina i trajanje zone kemijskih reakcija mogu dobiti putem krivulje prigušenja udarnog vala (Sućeska, 1995).

#### 3.3.2. Opis metode

Struktura udarnog vala predložena *ZND* teorijom višestruko je potvrđivana eksperimentalno. Potvrđeno je i postojanje točke *Von Neumann-ovog* vršnog tlaka koji završava u *CJ* točki te nije ovisan o samoj duljini eksplozivnog naboja.

Razvojem laserske mjerne tehnologije i njenom primjenom u polju fizike eksploziva postignut je značajan napredak u optimizaciji preciznosti i točnosti mjerenja vezanih uz detonacijski proces.

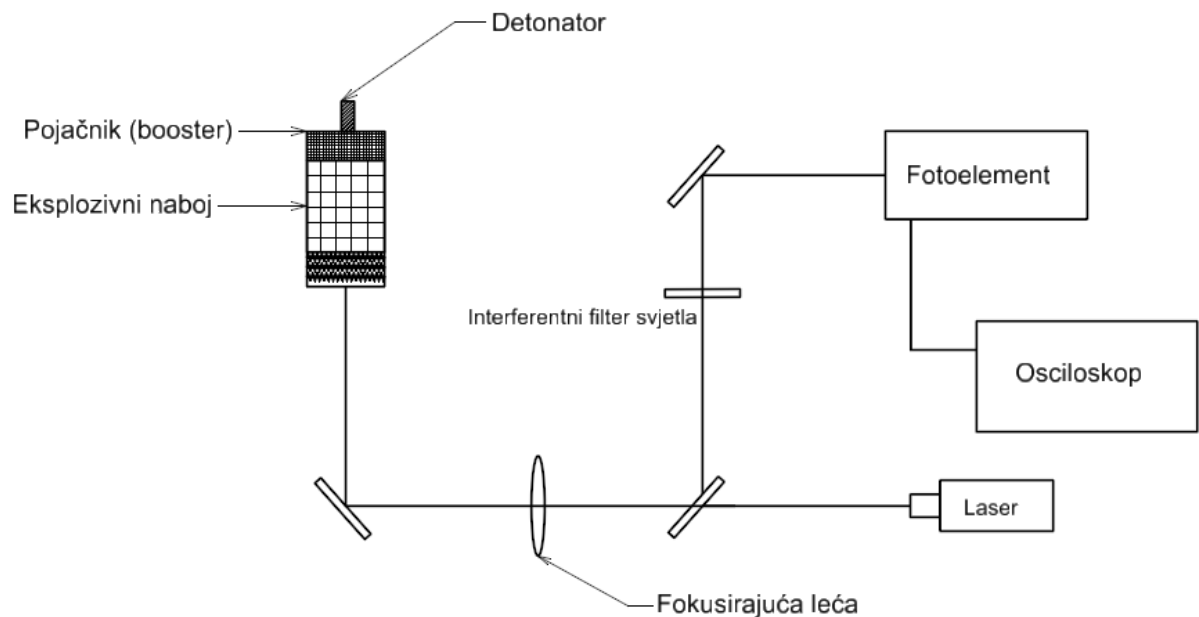
Analize pokazuju kako se najviše informacija o strukturi detonacijskog vala postiže korištenjem metoda koje određuju ovisnost brzine udarnog vala u inertnom materijalu na udaljenosti od dodirne površine eksploziva i inertnog materijala. Tom funkcijskom povezanosti dobivamo informacije o stanju i vrijednostima parametara na dodiru eksploziva i inertnog materijala, odnosno o trenutku izlaska udarnog vala s površine eksploziva.



Ukoliko je moguće odrediti brzinu udarnog vala u inernom materijalu na udaljenosti od 0.1 mm od dodirne površine eksploziva i inernog materijala, prvi podaci s te površine bit će zabilježeni 2 – 5 ns nakon detonacije, odnosno nakon prolaska udarnog vala (Sućeska, 1995).

Nasuprot točki iniciranja, na drugoj slobodnoj površini eksplozivnog naboja postavljaju se PMMA (*polimetilmetakrilat, pleksiglas*) diskovi debljine 0.5 – 1.0 mm. Njihova površina dodatno se prekriva tankim slojem aluminijevog praha (~ 1 μm ). Pomoću specijalnog uređaja, diskovi se spajaju tako da među njima ostane nekoliko mikrometara razmaka. Taj razmak predstavlja optičku barijeru za lasersku zraku.

Udarni val prolazi kroz PMMA diskove te zatvara optičke barijere, pritom mijenjajući ukupni intenzitet reflektirane laserske zrake koja se zatim usmjerava na fotomultiplikator pomoću sustava zrcala i leća. Izlazni signal fotomultiplikatora snima se pomoću osciloskopa čija je vremenska rezolucija reda veličine nanosekundi. Na slici 3.6 prikazan je postav mjerenja pomoću laserske metode.



Slika 3. 6: Shema postava mjerenja brzine udarnog vala u inernom materijalu pomoću tehnologije lasera (Sućeska, 1995)

### 3.4. Elektromagnetska metoda

#### 3.4.1. Princip metode

Elektromagnetska metoda (*eng. The electromagnetic particle velocity gauge – EPVG*) zasniva se na fizikalnom principu generiranja elektromotorne sile (*EMS, Es*), od strane vodiča koji se kreće u homogenom magnetskom polju. Intenzitet elektromotorne sile proporcionalan je brzini vodiča, njegovoj duljini i jakosti magnetskog polja.

Detonacijski parametri dobivaju se preko bilježenja elektromotorne sile generirane kretanjem tanke mjerne metalne folije smještene u eksplozivno punjenje. Nakon iniciranja, folija se kreće homogenim magnetskim poljem uz detonacijske produkte iza udarne fronte. Eksplozivni naboj s mjernom folijom je smješten unutar homogenog magnetskog polja. Pomoću osciloskopa bilježi se intenzitet elektromotorne sile u vremenu. Mjerene vrijednosti su podaci stanja iza detonacijske fronte. Dobiveni oscilogram daje ulazne parametre za proračun brzine masenog toka detonacijskih produkata u ovisnosti o vremenu (Sućeska, 1995).

#### 3.4.2. Opis metode

Instrumentarij za mjerenje ovom metodom može se bitno razlikovati ovisno o korištenom izvoru homogenog magnetskog polja, obliku i veličini mjerača (mjerne folije), načinu bilježenja elektromotorne sile, itd.

Spomenuti mjerac, obično je tanka bakrena ili aluminijska folija debljine 50 – 150  $\mu\text{m}$ . Ukoliko se koristi aluminijska folija, istu je potrebnu eloksirati<sup>2</sup> (anodizirati) zaštitnim slojem aluminijevog oksida u debljini 10 – 15  $\mu\text{m}$ . Oksidni sloj sprječava aluminijsku foliju da kemijski reagira s eksplozivom te ujedno olakšava i samo postavljanje folije u eksplozivni naboj. Promjena same širine i debljine mjerne folije oksidnim slojem nema utjecaj na promjenu dobivenog iznosa elektromotorne sile.

Eksplozivni naboj s umetnutom mjernom folijom postavlja se u homogeno magnetsko polje. Kada detonacijski val naiđe na mjernu foliju, ona se započinje kretati kroz

---

<sup>2</sup> Eloksiranje (elektrolitsko oksidiranje) ili anodizacija je postupak kojim se pomoću električne struje na predmetima od aluminija i od njegovih slitina proizvodi sloj aluminijeva oksida, koji može služiti kao zaštita od korozije i habanja, kao električni ili toplinski izolator, ili kao podloga za zaštitne premaze. Jedan od načina eloksiranja jest i anodizacija u sumpornoj kiselini (Sanz et al., 2009).

magnetsko polje, poprimajući karakteristike brzine okolnih čestica. Posljedično, na mjerачu se generira elektromotorna sila, sukladno izrazu:

$$E_s = Blv \quad (3.7)$$

Gdje je:

$E_s$  – elektromotorna dila (V)

$B$  – magnetska indukcija (T)

$v$  – brzina kretanja mjerачa (m/s)

$l$  – duljina aktivne površine mjerачa (m)

Uzimajući u obzir kako su veličine  $B$  i  $l$  konstantne za postavljeni mjerni sustav, intenzitet generirane elektromotorne sile direktno je proporcionalan samoj brzini postavljene mjerne folije:

$$E_s = kv \quad (3.21)$$

Gdje je:

$k$  – konstanta proporcionalnosti postavljenog mjernog sustava

*Slika 3.7* prikazuje shemu postavljenog mjernog sustava.

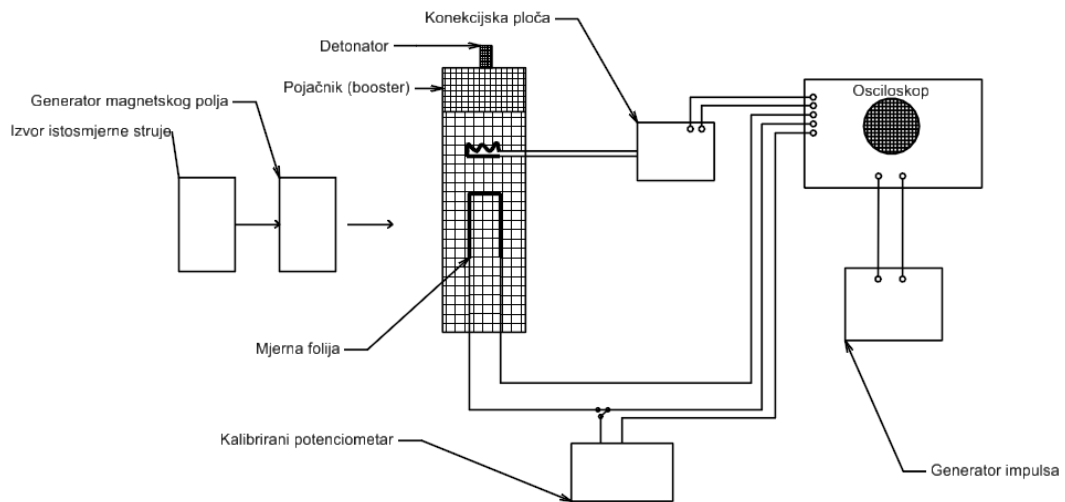
Izvore homogenog magnetskog polja, kao ključne dijelove mjernog sustava, prema načinu stvaranja magnetskog polja i izvedbi možemo podijeliti na (Sućeska, 1995):

- Elektromagnete
- Cilindrične zavojnice
- *Helmholtz* zavojnice
- *Maxwell* zavojnice
- Kvadratno oblikovane zavojnice

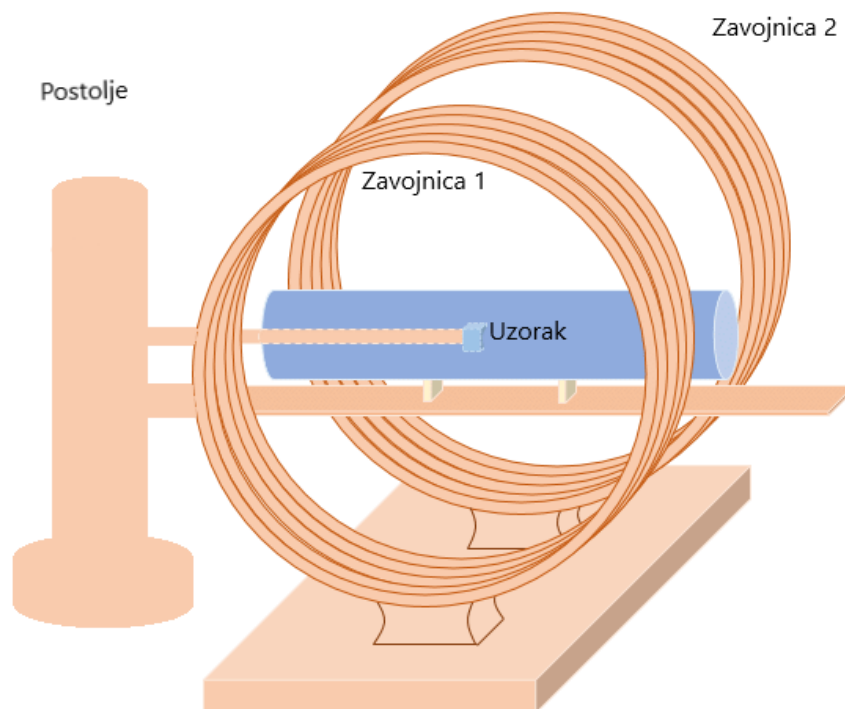
Najčešće se, međutim, za provedbu ovakvog tipa ispitivanja koriste *Helmholtz* zavojnice. Sastoje se od dva identična prstena od nemagnetičnog materijala smještenih međusobno paralelno (*Slika 3.8*).

Propuštanjem istosmjerne struje kroz zavojnice inducira se homogeno magnetsko polje, s maksimalnom uniformnošću na prostoru između dvije zavojnice. Primjerice, zavojnice od emajlirane bakrene žice promjera 500 mm s 210 navoja i poprečnog presjeka od 4 mm<sup>2</sup> pri jakosti struje od 100 A stvaraju magnetsko polje iznosa 0.05 T na udaljenosti od 250 mm.

Za potrebe ispitivanja, eksplozivni naboj potrebno je smjestiti u dio najjače magnetske homogenosti (Sućeska, 1995).



Slika 3. 7: EPVG mjerni sustav (Sućeska, 1995)



Slika 3. 8: Shematski prikaz Helmholtz zavojnica te položaja ispitivanog uzorka u homogenom magnetskom polju (Jie i Ye, 2018).

Prije mjerenja neophodno je sinkronizirati mjerni sustav kako bi se uskladio vertikalni (elektromotorna sila) i horizontalni (vrijeme) otklon osciloskopa. Navedene otklone moguće je podešavati preko unutarnjih i vanjskih izvora za sinkronizaciju, ovisno o tehničkim karakteristikama i izvedbi samog osciloskopa. Vertikalni otklon moguće je sinkronizirati pomoću preciznog potenciometra, a horizontalni generatorom okidnih impulsa (Furčić, 2020).

Masa ispitivanog uzorka eksplozivnog naboja ovisi o veličini (promjeru) zavojnica te samoj izvedbi zaštite protiv oštećenja koja se mogu javiti kao posljedica eksplozije. Primjerice, za spomenute Helmholtz zavojnice promjera 500 mm preporučena je zaštita od 10 mm debelog nemagnetičnog nehrđajućeg čelika te je u opisanom slučaju dozvoljeno koristiti do 200 g eksploziva (Sućeska, 1995).

### 3.5. Rentgenska metoda

#### 3.5.1. Princip metode

Metode radiografije također su se pokazale uspješnim u ispitivanjima za određivanje parametara detonacije. Princip uključuje vremensko bilježenje položaja tankih metalnih folija koje se kreću s detonacijskim produktima iza detonacijske valne fronte. Zajednička brzina produkata i folija, koje su dobri apsorbenti X – zraka, omogućava uvid u brzinu same brzine masenog toka detonacijskih produkata (Sućeska, 1995).

#### 3.5.2. Opis metode

U eksplozivni naboj smješta se 5 – 10 diskova, promjera 120 mm te individualne debljine 10 mm. Između diskova umeću se olovne metalne folije promjera 50 mm i debljine 20  $\mu\text{m}$ , jer su iste odlične u apsorpciji rentgenskih zraka. Rentgenski stroj stvara X – zrake u pulsacijama od 0.1  $\mu\text{s}$  te se one bilježe pomoću fotoelementa koji pretvorene podatke predaje brzom osciloskopu. RTG kazeta s trakom za pohranu mjerenih podataka postavlja se na minimalnoj sigurnosnoj udaljenosti od eksplozivnog naboja, dok se RTG stroj postavlja okomito na uzdužnu os pripremljenog naboja. Ovakvim postavom mjerne aparature omogućen je direktni uvid u položaj i gibanje poprečno postavljenih olovnih folija.

Analiza fotozapisa mjerenja vrši se prema izrazima (Sućeska, 1995):

$$X = \frac{X_0}{L_0} \quad (3.22)$$

$$Y = \frac{Y_0}{L_0} \quad (3.23)$$

Gdje je:

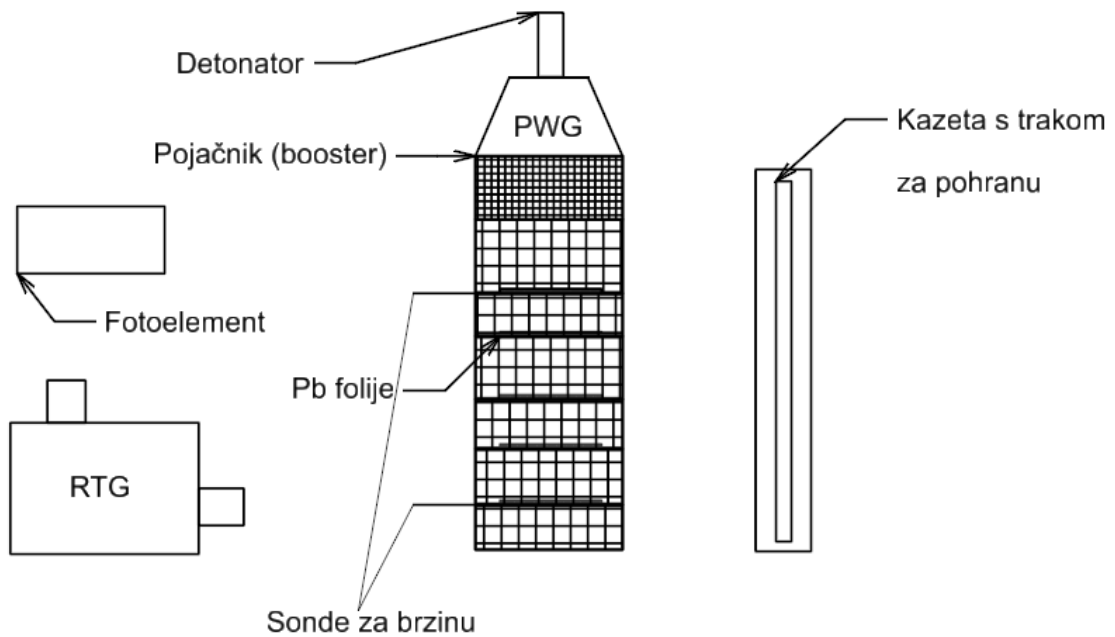
$X_0$  – udaljenost od ravnine iniciranja i metalne folije prije nailaska detonacijskog vala (mm);

$Y_0$  – udaljenost od ravnine iniciranja i metalne folije u trenutku nailaska detonacijskog vala (mm);

$L_0$  – prijeđena udaljenost detonacijskog vala u promatranom vremenskom rasponu (mm).

Budući da su parametri masenog toka iza detonacijskog vala funkcija raspodjele gradijenta  $\frac{dy}{dx}$ , koristi se metoda gradijenta brzine pomaka.

Na slici 3.9 prikazana je shema mjernog sustava radiografske metode.



Slika 3. 9: Shema mjernog sustava radiografske metode (Sućeska, 1995)

### 3.6. Manganinsko osjetilo tlaka

Tlačna manganinska folija, odnosno osjetilo tlaka, od 1960-ih se godina koristi pri određivanju detonacijskog tlaka i tlaka udarnog vala (Sućeska, 1995).

Manganin, slitina bakra, mangana i nikla uz manje primjese željeza i silicija, značajan je po promjenama električnog otpora ovisno o primijenjenom dinamičkom pritisku. Materijal je neosjetljiv na male promjene pritiska, dok je za veće iznose, iznad nekoliko MPa, prikladan. Funkcijska veza između korištenog električnog otpora i mjenog tlaka je gotovo linearna. Od ostalih karakteristika, manganin je značajan i po iznosu temperaturnog koeficijenta otpora ( $\alpha$ ) koji je približno jednak nuli te niskom iznosu histereze (Graham i Asay, 1978; Song i Lee 1989).

#### 3.6.1. Princip metode

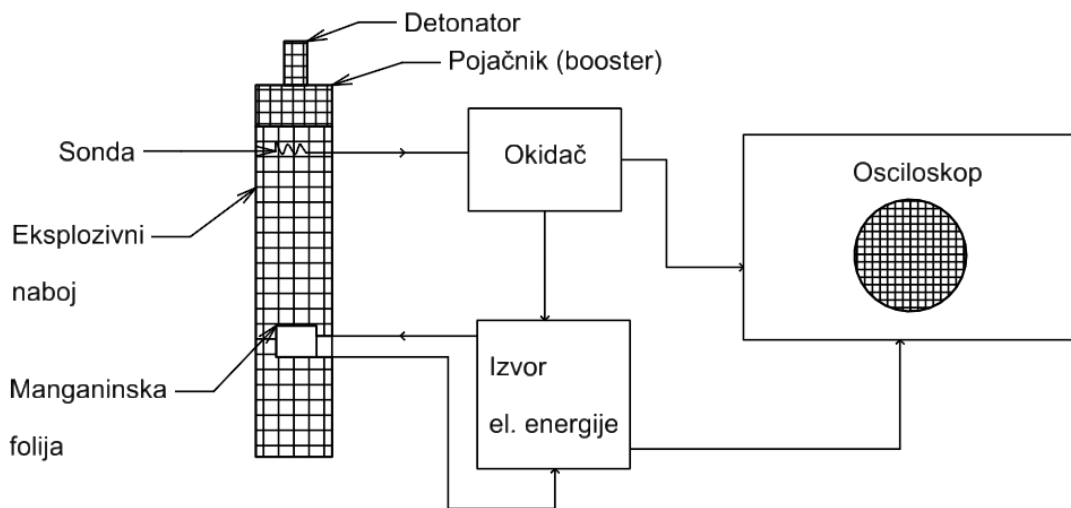
Čitava metoda zasniva se na već spomenutom svojstvu manganina da pod dinamičkim tlakom, u ovom slučaju pritisku koji nastaje detonacijom, mijenja električni otpor. Manganinska mjerna folija postavlja se direktno u eksplozivno punjenje okomito na smjer kretanja detonacijskog vala, a promjena otpora se bilježi pomoću modificiranog *Wheatstone-ovog* mosta (Sućeska, 1995).

#### 3.6.2. Opis metode

Manganinske folije sa slojem teflonske izolacije povezuju se *epoxy* smolom te vakuumski prešaju. Na iste se dovodi pravokutni napon amplitude 30 - 300 V, periode 100  $\mu$ s te struja jakosti 3 – 30 A (Sućeska, 1995).

Na slici 3.10 prikazana je izvedba mjerenja s manganinskom osjetilom.





Slika 3. 10: Shema mjernog sustava s manganinskim osjetilom (Sućeska, 1995)

### 3.7. PVF tlačno mjerilo

#### 3.7.1. Princip metode

PVF ili polivinilfluorid tlačni mjerači funkcioniraju na sličnom principu kao i manganinski, a u aktivnoj upotrebu u fizici eksploziva su od 1980-ih godina (Sućeska).

Polivinilfluorid je termoplastični polimer kemijske formule  $(C_2H_3F)_n$ . Polikristalni je polimer, otprilike 50 % strukture je amorfne građe. Široka upotreba ovog polimera pripisuje se mehaničkoj čvrstoći, kemijskoj otpornosti, visokoj stabilnosti, maloj propusnosti, trajnosti i izdržljivosti (Alaeddin et al., 2019).

Na razliku od prethodno opisane metode, prednost PVF-a je u tome što za mjerenje ne zahtijevaju nikakav izvor energije. Polukristalni oblik PVF-a, zbog svog piezoelektričnog svojstva isporučuje električne impulse koji se mogu koristiti za bilježenje udarnog vala. Pod utjecajem dinamičkog pritiska električni naboj se akumulira na polovima PVF-a. Primjenom kalibracijske krivulje, prethodno mjerenju, utvrđuje se funkcijska veza stvorenog električnog naboja ovisno o primijenjenom dinamičkom pritisku (Bauer, 2011; Sućeska 1995).

#### 3.7.2. Opis metode

PVF tlačni mjerni sustav sastoji se od tankog filma polivinilfluorida koji se postavlja između dvije bakrene ili zlatne pločice. Debljina PVF filma nije striktno određena. Tanji filmovi pokazuju veću osjetljivost na promjenu tlaka, no ujedno su i zahtjevniji pri rukovanju. Komercijalno dostupni filmovi debljine 23  $\mu\text{m}$  te promjera 3.75 mm pokazali su se kao dovoljno dobro rješenje pri ovom tipu mjerenja (Sućeska, 1995).

Električni naboj koji se akumulira na polovima PVF mjernog sustava pod stvorenim dinamičkim tlakom bilježi se kao funkcija u vremenu uključivanjem u strujne krugove sljedećih značajki (Sućeska, 1995):

- Prvi strujni krug, s ugrađenim poznatim otporom daje vrijednost jakosti struje prema sljedećem izrazu:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} \quad (3.24)$$

Gdje je:

$I$  – jakost električne struje (A)

$U$  – napon (V)

$R$  – električni otpor ( $\Omega$ )

$t$  – vrijeme (s)

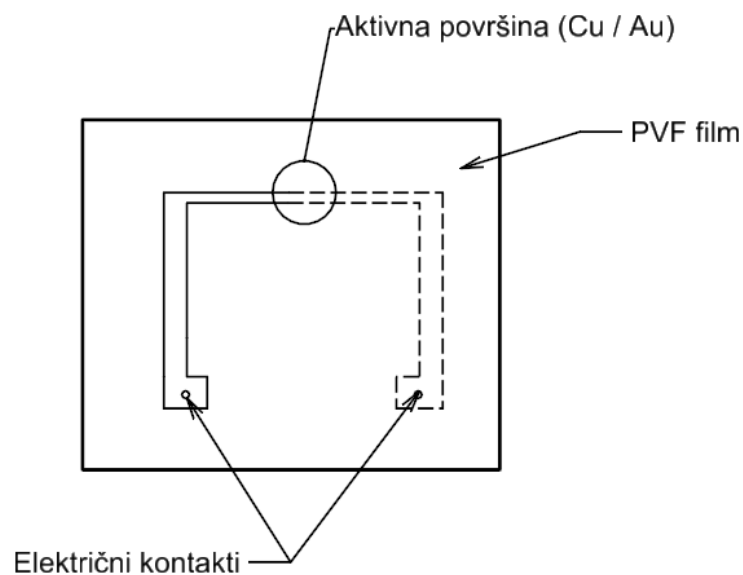
- Drugi strujni krug uz otpor ima ugrađen i kondenzator te se na njemu prema izrazu 3.12 računa iznos električnog naboja.

$$q_B = \int \frac{U(t)}{R} dt \quad (3.25)$$

Gdje je:

$Q_B$  – električni naboj (C)

Ovakvom izvedbom mjernog sustava moguće je utvrditi detonacijski tlak, jednako kao i  $CJ$  točku.



Slika 3. 11: Shema PVF mjerača (Sućeska, 1995)

### 3.8. Laserska interferometrija

#### 3.8.1. Princip metode

Laserska interferometrija široko je primjenjivana tehnika pri ispitivanjima svojstava i strukture detonacijskog vala. Metoda se bazira na Dopplerovom efektu. Bilježenje pozicije interferometrijskog polja u ovisnosti o vremenu, primjenom Dopplerovog pomaka u valnoj duljini reflektirane laserske zrake, je posljedica pomaka metalnog podloška (Sućeska, 1995).

Metalni podložak, debljine 15 – 25  $\mu\text{m}$  postavlja se između eksplozivnog naboja i područja s ugrađenim optički transparentnim materijalom (vodom, litij fluoridom ili polimetilakrilatom). Pomoću brzine detonacije eksploziva, odnosno metalnog podloška, moguće je utvrditi vrijednosti detonacijskih parametara eksploziva (Sućeska, 1995).

#### 3.8.2. Opis metode

Interferometar je mjerni instrument koji putem detektora (objektiva) prima elektromagnetske ili mehaničke valove te se pomoću interferencijskih pruga valova njime mogu obavljati precizna mjerenja. Iz razmaka pruga interferencije i udaljenosti otvora od slike može se izračunati valna duljina svjetlosti.

Postoji velik broj izvedbi interferometara, a neki od značajnijih su (Sućeska, 1995):

- Orvis
- Fabry – Perot
- Visar

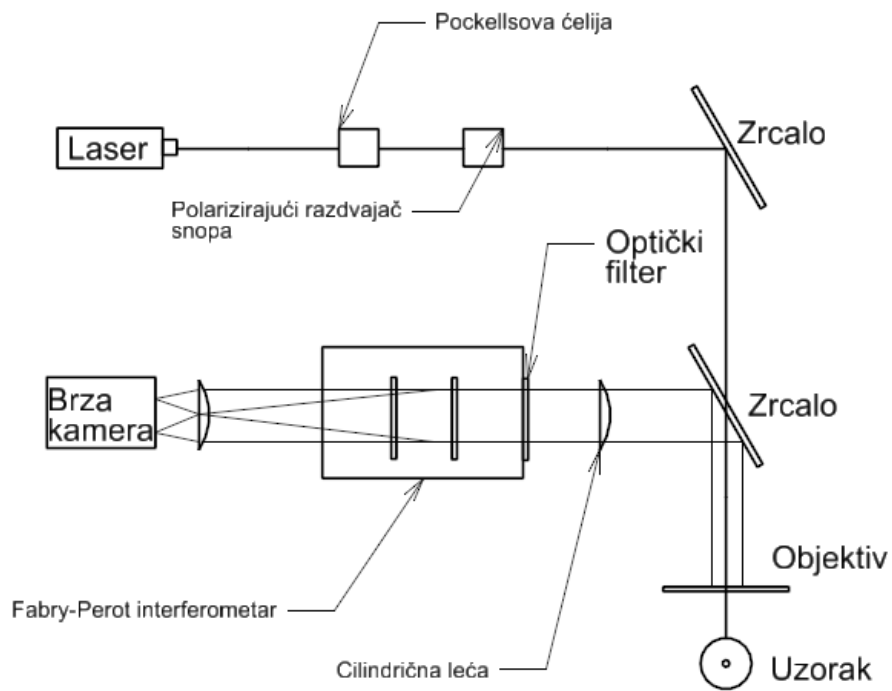
Međusobno se razlikuju u vremenskoj rezoluciji, koja se kreće od 0.3 ns do nekoliko ns. Mjerni sustav ove metode sastoji se od cilindričnih i sferičnih leća, Fabry – Perot interferometra te brze kamere. Kamera omogućava snimanje položaja interferometrijskog polja uzrokovanog Dopplerovim pomakom valne duljine o metalni podložak reflektirane laserske zrake. Interferometrijsko polje stvoreno interferometrom propušta lasersku zraku samo kroz unaprijed definirane kutove između Fabry – Perot zrcala i valne duljine zrake. Sustavi cilindričnih leća služe kao pojačivači intenziteta laserskih zraka. One koncentriraju interferometrijsku sliku u dva para točaka na poziciji svakog interferometrijskog prstena.

Parovi točaka nalaze se u ravnini objektiva brze kamere. Mjerni postav ove metode prikazan je na slici 3.12.

Kada se mjeri tražena brzina, laserska zraka se usmjerava na ispitivani uzorak u gibanju. Zrcala i leće koriste se za usmjeravanje reflektirane zrake paralelno prema Fabry – Perot interferometru. Unatoč pomaku nastalom zbog *Dopplerovog* efekta, reflektirana laserska zraka pri konstantnoj brzini daje statičnu sliku. U slučaju iznosa brzine koji nije konstantan u vremenu, reflektirana zraka podliježe pomaku koji se javlja zbog *Doppler* – efekta. Upravo iz tog razloga reflektirane se zrake krajnje bilježe kao položaji parova točaka putem brze kamere (Sućeska, 1995).

Kretanje metalnog podloška uzrokovano detonacijom vidljivo je na interferogramu.

Argonski laser najčešći je izvor laserske zrake za ovaj tip ispitivanja. Primjenjuje se valna duljina 514.5 nm uz maksimalnu snagu izvora 4 W (Sućeska, 1995).



Slika 3. 12: Shema mjernog sustava laserske interferometrije (Fabry-Perot interferometar)  
 (Sućeska, 1995)

### 3.9. Dremin metoda

Tehnika mjerenja brzine čestica, kao funkcije ovisnost o vremenu u detonacijskim procesima, poznata kao elektromagnetska metoda prvi je puta, kao takva znanstveno uvedena 1960-ih godina. Zaitzev, Pokhil i Shvedov su prvi za spomenuta mjerenja uspješno primijenili Faraday-ev zakon elektromagnetske indukcije.

Uvedeni princip temelji se na mjerenju brzine čestica u nevodljivom, gustom mediju koji nalik fluidu. Elektromotorna sila javlja se na tankoj metalnoj foliji ili vrpici poznate duljine, koja se kreće s fluidom u magnetskom polju poznate jakosti, orijentiranom okomito na metalnu foliju i njezin smjer gibanja.

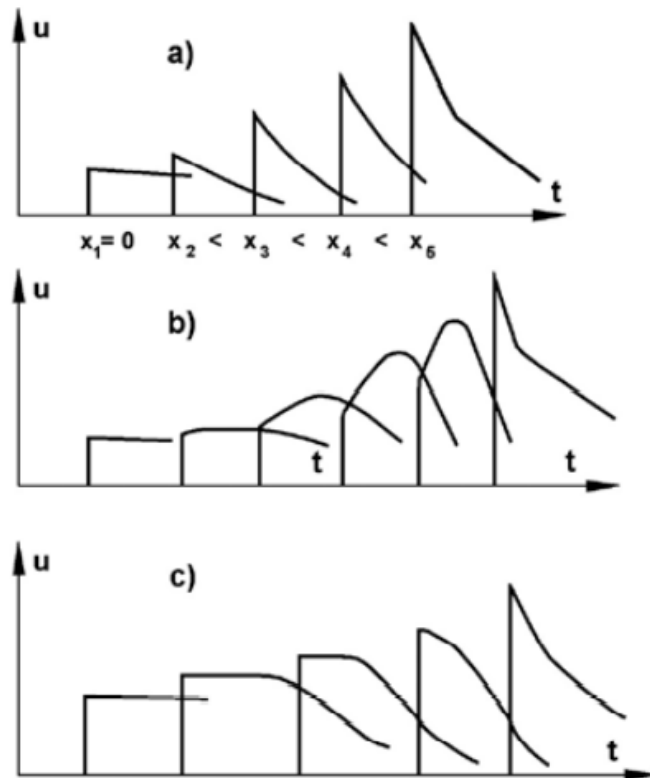
Metoda je nakon uvođenja najviše pozornosti privukla u SSSR-u, gdje je korištena u brojnim istraživanjima i radovima vezanim uz detonacijske i udarne valove te veličine koje su s istima povezane. Spomenuta istraživanja dala su velik značaj u samom poznavanju procesa detonacije te razumijevanja načina djelovanja eksploziva te njihovih efekata.

Najpoznatiji autor znanstvenih radova koji su temeljeni na spomenutoj metodi je A.N. Dremine. U suradnji s Vojnim Sveučilištem za tehnologiju u Varšavi, doradio je elektromagnetsku metodu za mjerenje masenog toka detonacijskih produkata. Sa svojim suradnicima, uspio je doći do podataka tlaka u *CJ* točki, ispravivši time tadašnja podatke američkih znanstvenika za 10%.

Slično kao i elektromagnetska metoda opisana u potpoglavlju 3.4. i ova se metoda temelji na elektromotornoj sili koja se javlja na vrhovima vodiča duljine  $l$ , koji se kreću brzinom  $v$  u magnetskom polju indukcije  $B$ . Spomenute veličine povezuje izraz (3.7) (Zygmunt, 2009).

Za slučaj stacionarnog detonacijskog procesa Dreminovom metodom moguće je utvrditi brzinu masenog toka detonacijskih produkata, brzinu same detonacije, vrijeme kemijskih reakcija te određivanje detonacijskih parametara kao što su tlak ( $p$ ), širina zone kemijskih reakcija ( $a$ ) te politropski eksponent ekspanzije detonacijskih produkata ( $\gamma$ ). Dreminova metoda omogućava izradu profila brzine masenog toka detonacijskih produkata i za neidealnu detonaciju (Zygmunt, 2009).

Veliki značaj Dreminove metode je u opisima karakteristika razvoja detonacije u različitim fizikalnim stanjima eksploziva – tekućem i krutim stanjima (prešani, mljeveni, lijevani). Navedeno je vidljivo na primjeru TNT-a na *slici 3.13*, gdje se *slučaj a* odnosi na TNT gustoće  $0,9 \text{ g/cm}^3$ , *slučaj b* na prešani TNT gustoće  $1,6 \text{ g/cm}^3$  te *slučaj c* na lijevani TNT gustoće  $1,6 \text{ g/cm}^3$  (Zygmunt, 2009).



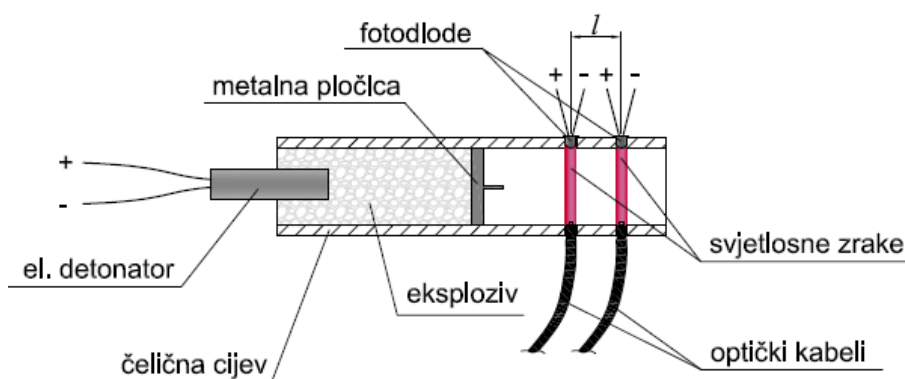
Slika 3. 13: Profili brzina masenog toka u vremenu za TNT različitih gustoća (Dremin et al., 1970)



#### 4. PRIJEDLOG METODA ZA MJERENJE BRZINE METALNE PLOČICE

Iz pregleda metoda za mjerenje brzine masenog toga produkata detonacije može se primijetiti da su metode zahtjevne, dugotrajne i u konačnici skupe te zahtijevaju posebnu mjernu opremu. Razvojem metode kojom bi se koristila univerzalna mjerna oprema i jeftinija i konstruktivno jednostavnija (jednokratna) mjerna osjetila, omogućila bi se dostupnost primjene metode i u rutinskim, laboratorijskim i terenskim ispitivanjima.

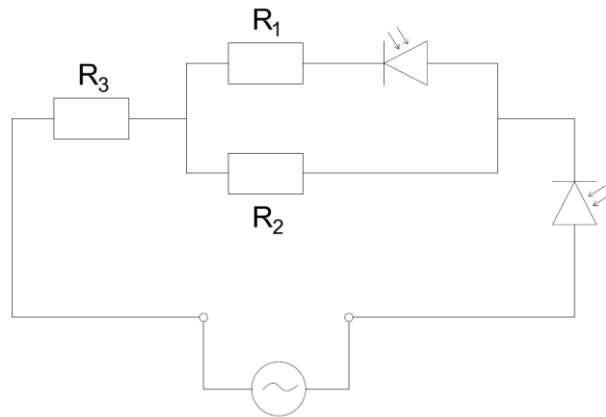
Jednostavna metoda mjerenja može se izvesti mjerenjem brzine pločice iz koje se prije opisanom metodologijom mogu izračunati i brzina masenog toka i parametri detonacijskog vala. Brzina metalne pločice može se mjeriti registracijom na digitalnom osciloskopu a električni signal se iz optičkog postiže transformacijom fotodiodama. Usmjerene zrake svjetlosti dovode se kroz tijelo cijevi eksplozivnog naboja fotodiodama. Fotodiode, poluvodički elementi koji ostvaruju proboj, odnosno vođenje struje samo kada su osvijetljeni, daju električni signal osciloskopu. Prekidanjem optičke veze zbog prolaska metalne pločice prekida se polarizacija i vođenje fotodiode te dolazi do prekida električnog signala koji se očitava na zaslonu osciloskopa. Načelan postav metode prikazan je na *slici 4.1.*



Slika 4. 1: Načelan postav metode mjerenja fotodiodama

Preko jednostavnog elektroničkog sklopa, odnosno dijelila napona paralelnim spojem otpornika omogućava se izbacivanje diode u grani s otporom  $R_1$  u trenutku kada pločica prekine optičku vezu s tom, prvom diodom prema nailasku pločice. U tom slučaju otpor paralele  $R_1R_2$ , postaje otpor  $R_2$ . Otpor cijelog spoja je otpor serije  $R_2R_3$ .

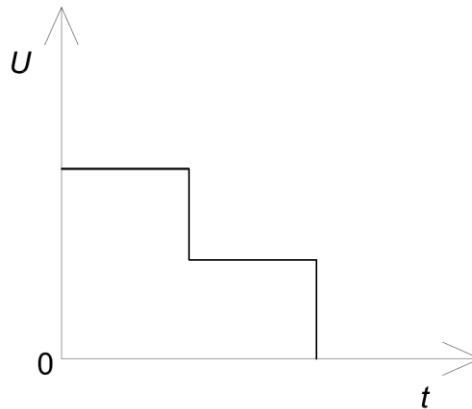
Daljnjim gibanjem pločice prekida se optička veza s drugom diodom. Dioda prestaje biti vidljiva i prekida se tok struje u cijelom mjernom strujnom krugu. Električna shema mjernog kruga prikazan je na *slici 4.2*.



Slika 4. 2: Električna shema mjernog kruga

Prekid u grani paralelnog spoja zbog prestanka vođenja prve diode, na zaslonu osciloskopa vidljiv je kao prvi pad napona zbog povećanja otpora paralelnog spoja odnosno cijelog strujnog kruga. Prekidanjem vođenja druge diode dolazi do prekida cijelog strujnog kruga i napon pada na nulu.

Izborom odgovarajućih odnosa otpornika  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ , moguće je podešavati razine padova napona čime se poboljšava razlučivost na zaslonu osciloskopa. Načelan signal mjerenja prikazan je na *slici 4.3*.



Slika 4. 3: Načelan signal mjerenja

Otpor paralelnog spoja otpornika  $R_1$  i  $R_2$  prema Kirchhoffovom zakonu je:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_p} \quad (4.1),$$

te se sređivanjem dobije:

$$R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.2)$$

Ukupan otpor kruga je:

$$R_{uk} = R_3 + R_p \quad (4.3)$$

Kombinacijom vrijednosti otpora paralele tako da  $R_1$  bude, primjerice deset puta manji od  $R_2$ , i otpor paralele bit će nešto više od deset puta manji od otpora  $R_2$ . Prekidanjem prve diode i pad napona, obzirom na značajnu promjenu otpora lako je razlučiv na zaslonu osciloskopa. Uvođenjem dodatnih otpora, može se podesiti i konstanta prijelazne pojave isključivanja iz strujnog kruga, čime se dobiva oštrina signala.

Opisani strujni krug može se koristiti i za postizanja signala različitim osjetilima odnosno različitim signalima. Na taj način mogu se u strujni mjerni krug uključiti i fotootpornici te elektrokontaktna osjetila.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani opisi metoda za karakterizaciju parametara detonacijskog vala. Važan parametar koji se mjeri posredno je brzina masenog toka čestica produkata detonacije ili brzina plinova detonacije. Poznavanjem toga parametra i zakona očuvanja količine gibanja, mase i energije na granici skoka prijelaza djelovanja detonacijskog vala moguće je opisati udarnu adijabatu produkata te odrediti tlak detonacije u *CJ* točki.

Opisane metode pokazale su mogućnost mjerenja brzine produkata ali su relativno komplicirane i skupe.

Postoji mogućnost i prostor za izvedbu jeftinijih i pristupačnijih metoda za mjerenje brzine produkata temeljenih na mjerenjima brzine pločice ili na direktnom mjerenju elektromagnetski inducirane energije ioniziranim produktima detonacije.

## 6. LITERATURA

1. Alaaeddin, M.H., Sapuan, S. M., , Zuhri, M.Y.M, Zainudin, E.S., AL-Oqla, F.M. (2019): *Polyvinyl fluoride (PVF); Its Properties, Applications, and Manufacturing Prospects*. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 538 012010. LINK: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/538/1/012010/pdf>
2. Bauer, F. (2011): *PVF2 polymers: Ferroelectric polarization and piezoelectric properties under dynamic pressure and shock wave action*. *Ferroelectrics Journal*. Volume 49, 1983 - Issue 1. Pages 231-240 .
3. Cooper, P.W. (1996): *Explosive Engineering*. Wiley - VCH, Inc.
4. Dobrilović, M. (2008): *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora*. Doktorska disertacija. Rudarsko - geološko - naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.
5. Dremin, A.N., Savrov, S.D., Trofimov, W.C., Shvedov, K.K. (1970): *Detonacionnye Volny v Kondensirovannyh Sredah*. Nauka, Moskva 1970.
6. Ester, Z. (2005): *Miniranje I. Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja*. Udžbenik. Rudarsko - geološko - naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.
7. Furčić, N. (2020): *Uvod u elektroniku. Poglavlje Mjerni instrumenti*. ISBN:978-953-197-312-0. Udžbenik za drugi razred srednjih strukovnih škola. Element. <https://element.hr/artikli/file/3850/uvod-u-elektroniku-udzbenik/12312>
8. Graham R.A., Asay T.R. (1978): *The Measurement of Wave Profiles in Shock Loaded Solids*. *High Temperatures – High Pressures* 10. 355-390
9. Jie, H., Ye, H. (2018): *Measurement and Analysis of Low Frequency Magnetic Shielding Performance of Open-Cell Nickel Foam*. *Conference Series Materials Science and Engineering* 394(3):032122 .DOI: 10.1088/1757-899X/394/3/032122. Research Gate.
10. Kashani, M., Aizawa, T., Okagawa, K., Sugiyama, Y. (2009): *Welding of Manganin and Copper Sheets by Using Magnetic Pulse Welding (MPW) Technique*. Yazaki Corporation, Japan. ResearchGate.
11. Krsnik, J. (1989): *Miniranje*. Udžbenik. Rudarsko - geološko - naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu. OOUR - Institut za rudarstvo, geotehniku i naftu.
12. Orlović - Leko, P. (2013): *Kemija za rudare. Poglavlje Kemija eksploziva* (str. 42-75). Nastavni tekst. Rudarsko - geološko - naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.

13. Sanz, O., Martínez, L.M., Echave, F.J., Domínguez, M.I., Centeno, M.A., Odriozol, J.A., Montes, M. (2009): *Aluminium anodisation for Au-CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al monoliths preparation*. Chemical Engineering Journal. Volume 151, Issues 1–3, 15/08/2009, Str. 324-332
14. Song, S.-Y., Lee, J.W. (1989): *A Detonation Pressure Measurement System Employing High Resistance Manganine Foil Gauge*. 9th Symposium International Detonation. Portland, OR, USA. PP 226-232
15. Sućeska, M. (2020): *Radni materijali: Udarni val. Detonacija*.
16. Sućeska, M. (1995): *Test Methods for Explosives*. Springer Science+Business Media New York. ISBN 978-1-4612-0797-9 (e-Book)
17. Štimac, B. (2019): *Numeričko modeliranje ANFO eksploziva*. Javni seminar. Prvi rezultati istraživanja. Poslijediplomski studij Primjenjene geoznanosti, rudarstvo i naftno inženjerstvo. Rudarsko - geološko - naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.
18. Zygmunt, B. (2009): *Detonation Parameters of Mixtures Containing Ammonium Nitrate and Aluminium*. Central European Journal of Energetic Materials, 2009, 6(1), 57-66. ISSN 1733-7178.