

Predrag Elek

BALISTIKA NA CILJU

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

UNIVERZITET U BEOGRADU
Mašinski fakultet

Predrag Elek

BALISTIKA NA CILJU

Beograd, 2018.

dr Predrag Elek, vanredni profesor

BALISTIKA NA CILJU

prvo izdanje

Recenzenti:

Prof. dr Slobodan Jaramaz, Mašinski fakultet u Beogradu

Prof. dr Dejan Micković, Mašinski fakultet u Beogradu

Izdavač:

Univerzitet u Beogradu

Mašinski fakultet

Kraljice Marije 16, Beograd

tel: (011) 3370 760

fax: (011) 3370 364

Za izdavača:

Prof. dr Radivoje Mitrović, dekan

Glavni i odgovorni urednik:

Prof. dr Milan Lečić

Odobreno za štampu odlukom Dekana Mašinskog fakulteta u Beogradu
br. 30/2017 od 29.12.2017. godine

Tiraž: 150 primeraka

ISBN 978-86-7083-966-3

Štampa:

Planeta print

Vinogradski venac 9, Beograd

tel/fax: (011) 650 6546

Zabranjeno preštampavanje i fotokopiranje.

Sva prava zadržavaju izdavač i autor.

PREDGOVOR

Knjiga *Balistika na cilju* je prevashodno udžbenik za istoimeni predmet koji se izučava na master studijama modula za Sisteme naoružanja na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Osim toga, knjiga delimično obuhvata i gradivo iz predmeta doktorskih studija *Odabrana poglavlja balistike na cilju*. Svakako se nadam da ona može biti od koristi inženjerima, istraživačima i svim ostalim potencijalnim čitaocima koji su zainteresovani za oblast dejstva projektila na cilju.

Balistika na cilju je naučna disciplina koja izučava delovanje projektila, odnosno bojnih glava, na cilju. Složenost interakcije između različitih vrsta projektila i odgovarajućih ciljeva uslovljava multidisciplinarnu prirodu balistike na cilju. Saznanja do kojih se došlo u istraživanjima u proteklih 150 godina zasnovana su na obilju eksperimentalnih rezultata, kao i na primeni teorijskih principa iz mehanike krutog i deformabilnog tela, dinamike gasova, fizike eksplozije, nauke o materijalima i drugih oblasti.

U poslednjih nekoliko decenija, uporedo sa razvojem računara i različitih numeričkih pristupa, dolazi do intenziviranja istraživanja u domenu balistike na cilju. U ovom periodu formiraju se i specijalizovani časopisi (*International Journal of Impact Engineering, Protective Structures*), a na prestižnim simpozijumima Međunarodnog društva za balistiku (*International Ballistics Society*) dominiraju radovi iz oblasti balistike na cilju. Pomenute publikacije su važni izvori iz kojih je potekao značajan deo sadržaja ovog udžbenika. Tekst koji je pred Vama predstavlja rezultat desetogodišnjeg rada autora, kako u nastavi, tako i u naučnim istraživanjima u oblasti balistike na cilju.

Prijatna mi je dužnost da se zahvalim redovnim profesorima dr Slobodanu Jaramazu i dr Dejanu Mickoviću, koji su ne samo recenzenti, već i moji učitelji koji su mi pružali veliku podršku kroz ceo nastavni i naučnoistraživački rad.

Zahvaljujem se Dušanu Stokiću za dizajn korica, kao i Radomiru Čoviću i kompaniji *Planeta print* na profesionalnom odnosu i pomoći u toku pripreme materijala za štampu.

Takođe, veliku zahvalnost dugujem porodici za razumevanje i podršku ne samo tokom pisanja ove knjige.

Naravno, odgovornost za eventualne propuste i greške je samo moja i biće mi zadovoljstvo da razmotrim sve komentare i sugestije čitalaca i uključim ih u naredno izdanje.

Beograd, februar 2018.

Dr Predrag Elek, vanredni profesor

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. BALISTIKA NA CILJU. PREDMET IZUČAVANJA | 1 |
| 1.2. ISTRAŽIVAČKE METODE I PRISTUPI..... | 1 |
| 1.3. PROCESI KOJE IZUČAVA BALISTIKA NA CILJU | 2 |
| 1.4. VRSTE PROJEKTILA I NJIHOVIH DEJSTAVA | 2 |
| 1.5. VEROVATNOĆA UNIŠTENJA CILJA | 3 |
| 1.6. STRUKTURA KNJIGE | 4 |
| | |
| 2. PONAŠANJE MATERIJALA PRI DINAMIČKOM OPTEREĆENJU | 6 |
| 2.1. UVODNA RAZMATRANJA | 6 |
| 2.2. PLASTIČNO DEFORMISANJE MATERIJALA | 7 |
| 2.3. PROSTIRANJE POREMEĆAJA U ČVRSTOM TELU | 8 |
| 2.4. TALAS NAPONA | 10 |
| 2.5. UDARNI TALASI U ČVRSTOM TELU | 13 |
| | |
| 3. MEHANIKA PENETRACIJE | 20 |
| 3.1. UVODNA RAZMATRANJA | 20 |
| 3.1.1. Definicija problema i značaj proučavanja probijanja | 20 |
| 3.1.2. Vrste prepreka i penetratora | 20 |
| 3.1.3. Tipovi penetracionih procesa | 23 |
| 3.1.4. Pristupi rešavanju problema penetracije | 27 |
| 3.1.5. Osnovni pojmovi mehanike penetracije | 29 |
| 3.1.6. Zakon održanja energije pri probijanju | 32 |
| 3.2. EMPIRIJSKE RELACIJE | 33 |
| 3.2.1. Formula <i>JACOB DE MARREA</i> | 33 |
| 3.2.2. SRI formula | 35 |
| 3.2.3. BRL formula | 35 |
| 3.2.4. Relacije <i>NEILSONA</i> i <i>JOWETTA</i> | 35 |
| 3.2.5. JTCG/ME i FAA formule | 36 |
| 3.2.6. THOR formule..... | 37 |
| 3.3. ANALITIČKI MODELI PROBIJANJA METALNIH PREPREKA | 38 |
| 3.3.1. Model <i>RECHTA</i> i <i>IPSONA</i> | 38 |
| 3.3.2. Tranzicija režima probijanja | 41 |
| 3.3.3. Probijanje tankih metalnih ploča. Trofazni model | 42 |

| | |
|--|----|
| 3.3.4. Probijanje aluminijumskih prepreka | 48 |
| 3.4. PROBIJANJE BETONSKIH PREPREKA..... | 53 |
| 3.4.1. Prva faza procesa probijanja | 55 |
| 3.4.2. Druga faza procesa probijanja..... | 56 |
| 3.5. PROBIJANJE TLA | 57 |
| 3.5.1. Geometrija vrha projektila | 57 |
| 3.5.2. Dubina prodiranja u tlo | 61 |
| 3.6. PROBIJANJE KERAMIČKIH PREPREKA | 63 |
| 3.7. PROBIJANJE PREPREKA OD KOMPOZITNIH MATERIJALA | 67 |
| 3.8. DUBINA PRODİRANJA KUMULATIVNOG MLAZA | 70 |
| 3.8.1. Zakon gustina | 71 |
| 3.8.2. Probijanje kumulativnim mlazom promenljive brzine | 75 |
| 3.9. PROBOJNOST PENETRATORA POTKALIBARNIH PROJEKTILA | 80 |
| 3.9.1. Model <i>ALEKSEEVSKII-TATE</i> | 81 |
| 3.9.2. Empirijsko određivanje probojnosti | 83 |
| 3.10. OSNOVNI POJMOVI BALISTIKE RANA..... | 86 |
| 3.10.1. Mehanizmi delovanja penetratora..... | 86 |
| 3.10.2. Kriterijumi onesposobljavanja..... | 88 |

4. RUŠEĆE DEJSTVO 92

| | |
|---|-----|
| 4.1. UVOD..... | 92 |
| 4.2. ZONA BLISKOG DEJSTVA | 93 |
| 4.3. PROSTIRANJE UDARNOG TALASA U VAZDUHU | 97 |
| 4.4. ODREĐIVANJE PARAMETARA UDARNOG TALASA..... | 101 |
| 4.4.1. Koncept TNT ekvivalenta..... | 101 |
| 4.4.2. Skalirano rastojanje i maksimalni natpritisak..... | 102 |
| 4.4.4. Površinske eksplozije..... | 109 |
| 4.4.5. Uticaj metalne obloge | 110 |
| 4.5. INTERAKCIJA UDARNOG TALASA SA PREPREKOM | 111 |
| 4.5.1. Normalna refleksija udarnog talasa | 111 |
| 4.5.2. Kosa refleksija udarnog talasa..... | 114 |
| 4.6. DELOVANJE UDARNOG TALASA..... | 118 |
| 4.6.1. Sistem sa jednim stepenom slobode | 118 |
| 4.6.2. Režimi opterećenja | 120 |
| 4.6.3. Krive jednakih oštećenja | 125 |
| 4.6.4. Delovanje spoljašnje eksplozije na strukturu | 127 |
| 4.6.5. Delovanje udarnog talasa na čoveka..... | 130 |
| 4.7. RUŠEĆE DEJSTVO PRI DETONACIJI U TLU | 133 |
| 4.7.1. Formiranje kratera | 133 |
| 4.7.2. Određivanje parametara udarnog talasa | 137 |
| 4.8. PODVODNE EKSPLOZIJE..... | 141 |

| | |
|---|------------|
| 5. FRAGMENTACIJA I PARČADNO DEJSTVO | 144 |
| 5.1. UVODNA RAZMATRANJA | 144 |
| 5.1.1. Fragmentacija – pojam i primene | 144 |
| 5.1.2. Podela fragmentacionih procesa | 144 |
| 5.1.3. Osobnosti procesa dinamičke fragmentacije | 145 |
| 5.1.4. Fragmentacija cilindra pod dejstvom produkata detonacije | 147 |
| 5.1.5. Pristupi modeliranju dinamičke fragmentacije | 149 |
| 5.2. BRZINA RAZLETANJA FRAGMENTATA | 150 |
| 5.2.1. <i>GURNEY</i> jev model | 151 |
| 5.2.2. <i>TAYLOR</i> ova formula | 155 |
| 5.2.3. Dejstvo produkata detonacije na kretanje formiranih fragmenata | 156 |
| 5.3. RASPODELA VELIČINE I MASE FRAGMENTATA | 158 |
| 5.3.1. Funkcije raspodele mase fragmenata | 158 |
| 5.3.2. Geometrijski pristup modeliranju fragmentacije | 160 |
| 5.3.2.1. Jednodimenziona slučajna fragmentacija | 160 |
| 5.3.2.2. Dvodimenziona fragmentacija | 163 |
| 5.3.2.3. Trodimenziona fragmentacija | 165 |
| 5.3.3. Empirijski zakoni raspodele mase fragmenata | 167 |
| 5.3.3.1. Generalizovana <i>MOTTO</i> va raspodela | 168 |
| 5.3.3.2. Raspodela <i>STROMSOE-INGEBRIGTSENA</i> | 168 |
| 5.3.3.3. Generalizovana <i>GRADY-KIPP</i> raspodela | 168 |
| 5.3.3.4. Lognormalna raspodela | 169 |
| 5.3.3.5. <i>WEIBULL</i> ova raspodela | 169 |
| 5.3.3.6. <i>HELDOVA</i> raspodela | 169 |
| 5.3.3.7. Stepeni zakon raspodele | 170 |
| 5.4. FIZIČKI MODELI FRAGMENTACIJE | 170 |
| 5.4.1. <i>MOTTO</i> ov model jednodimenzione fragmentacije | 170 |
| 5.4.1.1. Model loma materijala košuljice | 171 |
| 5.4.1.2. Talas rasterećenja i generisanje fragmenata | 172 |
| 5.4.1.3. Proračun dužina fragmenata | 174 |
| 5.4.2. Energetski model fragmentacije | 177 |
| 5.4.3. <i>GRADY</i> jev energetski pristup | 180 |
| 5.5. RASPODELA OBLIKA FRAGMENTATA | 183 |
| 5.5.1. Morfologija parčadi | 184 |
| 5.5.2. Osnove balistike parčadi | 185 |
| 5.5.3. Eksperimentalno određivanje oblika parčadi | 189 |
| 5.5.4. Teorijski modeli raspodele oblika fragmenata | 192 |
| 5.5.4.1. Dvodimenzioni model raspodele oblika fragmenata | 192 |
| 5.5.4.2. Model "slot-mašine" | 195 |
| 5.6. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE EFIKASNOSTI PARČADNOG DEJSTVA | 202 |
| 5.6.1. Eksperiment u jami | 204 |
| 5.6.2. Eksperiment u oboru | 205 |
| 5.6.3. Eksperiment u areni | 210 |
| LITERATURA | 213 |

1. UVOD

1.1. BALISTIKA NA CILJU. PREDMET IZUČAVANJA

Balistika je naučna disciplina koja se bavi proučavanjem kretanja projektila. Njen naziv potiče od grčke reči *balein* (βάλλειν) što znači baciti.

Razlikujemo nekoliko faza kretanja klasičnih projektila. Prvu etapu čini kretanje projektila u cevi oruđa/oružja kada sila pritiska gasovitih produkata sagorevanja barutnog punjenja dominantno utiče na kretanje projektila. Fenomenima karakterističnim za period kretanja projektila u cevi bavi se *unutrašnja balistika*. U slučaju raketnih projektila postoji izvesna analogija ove faze kretanja sa aktivnom fazom leta raketnog projektila (period leta rakete u kome radi raketni motor).

Prelazna balistika bavi se prvenstveno složenim gasodinamičkim pojavama koje utiču na kretanje projektila neposredno po napuštanju cevi oruđa.

Slobodno kretanje projektila posle izlaska iz cevi oruđa pod dejstvom gravitacione sile i aerodinamičkih sila i momenata (u slučaju raketnih projektila mogu da deluju još i pogonska i upravljačke sile) predmet je proučavanja *spoljne balistike*.

Konačno, finalna faza kretanja projektila koja podrazumeva njegovo dejstvo, odnosno interakciju sa ciljem izučava se u okviru *balistike na cilju* (ponekad se koristi i izraz *terminalna balistika*).

1.2. ISTRAŽIVAČKE METODE I PRISTUPI

Kao i mnoge inženjerske discipline, balistiku na cilju karakterišu tri osnovna pristupa istraživanju.

Empirijski pristup se zasniva na formiranju odgovarajućih relacija između relevantnih balističkih veličina na bazi eksperimentalno utvrđenih zavisnosti. Ovaj pristup je u pravilu zahtevan u pogledu cene eksperimentalnih istraživanja, ali su dobijene relacije veoma pouzdane. One se, međutim, ne mogu primenjivati izvan domena u kome su izvršeni eksperimenti.

Analitički pristup bazira se na primeni osnovnih fizičkih zakonitosti na razmatrani terminalnobalistički proces. Rezultat predstavlja manje ili više složen analitički model, koji može biti iskazan u formi jedne relacije, ali i vrlo složenih sistema jednačina za čije je rešavanje neophodno formiranje kompleksnih računarskih programa. Ove modele odlikuje inženjerski

prihvatljiva tačnost i najčešće širi domen primene nego u slučaju empirijskih modela.

Numerički pristup je najmoderniji i podrazumeva primenu fizičkih zakona održanja na diskretizovanu strukturu koja se razmatra. Primena računara i odgovarajućeg simulacionog softvera omogućava rešavanje kompleksnih jednačina za sisteme sa veoma velikim brojem stepeni slobode. Rezultati u najvećoj meri zavise od tačnosti korišćenih modela ponašanja materijala.

U istraživanjima se često koristi kombinovani metod koji podrazumeva primenu najmanje dva pristupa (npr. empirijskog i numeričkog) u cilju dobijanja kvalitetnog modela koji verno opisuje razmatrani proces.

Valja napomenuti da su za izučavanje balistike na cilju neophodna saznanja iz različitih naučnih disciplina kao što su: mehanika deformabilnog tela, dinamika gasova, teorija udarnih talasa, fizika eksplozije, konstrukcija projektila, itd.

1.3. PROCESI KOJE IZUČAVA BALISTIKA NA CILJU

Kao što je napomenuto, balistika na cilju se bavi interakcijom projektila i cilja. Generalno, razlikujemo dva osnovna tipa procesa koji zavise od vrste projektila.

U prvu grupu svrstavaju se svi tzv. inertni projektili – projektili koji ne sadrže eksplozivno punjenje, tj. projektili čije se dejstvo zasniva isključivo na principu pretvaranja njihove kinetičke energije u koristan rad. Ovo najčešće podrazumeva probijanje određene prepreke. Proces započinje kontaktom projektila i prepreke. Tradicionalno, osnovni zadatak balistike na cilju je upravo bio određivanje relacija koje omogućavaju određivanje ključnih parametara procesa probijanja (odnosno penetracije ili perforacije).

Druga grupa procesa karakteristična je za projekte koji sadrže eksplozivno punjenje. U ovom slučaju terminalnobalistički proces je znatno složeniji i započinje aktiviranjem upaljača, odnosno iniciranjem eksplozivnog punjenja. Balistika na cilju usko je povezana sa mehanizmima delovanja bojnih glava i podrazumeva modeliranje brojnih procesa kao što su: detonacija, fragmentacija, balistika parčadi, formiranje kumulativnog mlaza, penetracija... Za ovu grupu projektila takođe je karakteristično i rušeće dejstvo (blast) koje nastaje kao posledica detonacije eksplozivnog punjenja.

1.4. VRSTE PROJEKTILA I NJIHOVIH DEJSTAVA

Postoje različite klasifikacije projektila, npr. s obzirom na kalibar, na način lansiranja, način stabilizacije leta, metode vođenja, namenu projektila itd. Sa

aspekta balistike na cilju, međutim, najznačajnija je podela projektila prema načinu dejstva na cilju. U osnovi, kada su u pitanju konvencionalni projektili kojima ćemo se prvenstveno baviti u okviru balistike na cilju, dva su glavna vida delovanja:

- probojno dejstvo (penetracija, odnosno perforacija), i
- rušeće dejstvo natpritiska udarnog talasa (blast efekat ili fugasno dejstvo).

U slučaju nuklearnih bojnih glava osim rušećeg, postoje još svetlosni i toplotni efekat, kao i radioaktivnost.

Probojno dejstvo je karakteristično za sledeće tipove projektila:

- projektili koji se ispaljuju iz klasičnog streljačkog (pešadijskog) naoružanja (namenjeni za uništavanje žive sile i materijalno-tehničkih sredstava),
- projektili parčadnog dejstva (prirodna ili kontrolisana fragmentacija),
- inertni protivoklopni projektili (kalibarni i potkalibarni),
- protivoklopni projektili na bazi usmerenog delovanja eksplozije (projektili na bazi kumulativnog, *MISZNAY-SCHARDIN*ovog i *HOPKINSON*ovog efekta).

Dejstvo natpritiska udarnog talasa izazvanog eksplozijom je karakteristično za:

- projektele rušećeg dejstva,
- u izvesnoj meri i za sve druge projektele koji sadrže eksplozivno punjenje (projektili parčadno-rušećeg dejstva, sve klase protivoklopnih projektila zasnovanih na usmerenom delovanju eksplozije).

Ostali tipovi projektila koji nisu namenjeni za direktno dejstvo na cilju (osvetljavajući, dimni, propagandni, projektili za obuku,...) neće biti razmatrani u okviru balistike na cilju.

1.5. VEROVATNOĆA UNIŠTENJA CILJA

Kao što smo već napomenuli, sistem oruđe-projektil prvenstveno je namenjen za uništavanje određenih ciljeva. Postoji, međutim, i širi kontekst u kojem se razmatra ceo proces uništavanja cilja koji podrazumeva i kompleksan sistem upravljanja vatrom. Ovaj sistem treba najpre da omogući otkrivanje cilja i njegovo zahvatanje i praćenje, a potom da generiše optimalne parametre gađanja. Na sl. 1.1 predstavljen je primer gađanja tenka i svi nivoi njegove zaštite. U tom kontekstu, verovatnoća uništenja cilja p može se pisati u formi:

$$p = \prod_j p_j . \quad (1.1)$$

Verovatnoće p_j su redom:

p_1 – verovatnoća otkrivanja cilja,

p_2 – verovatnoća zahvatanja cilja,

p_3 – verovatnoća pogađanja cilja,

p_4 – verovatnoća probijanja oklopa cilja,

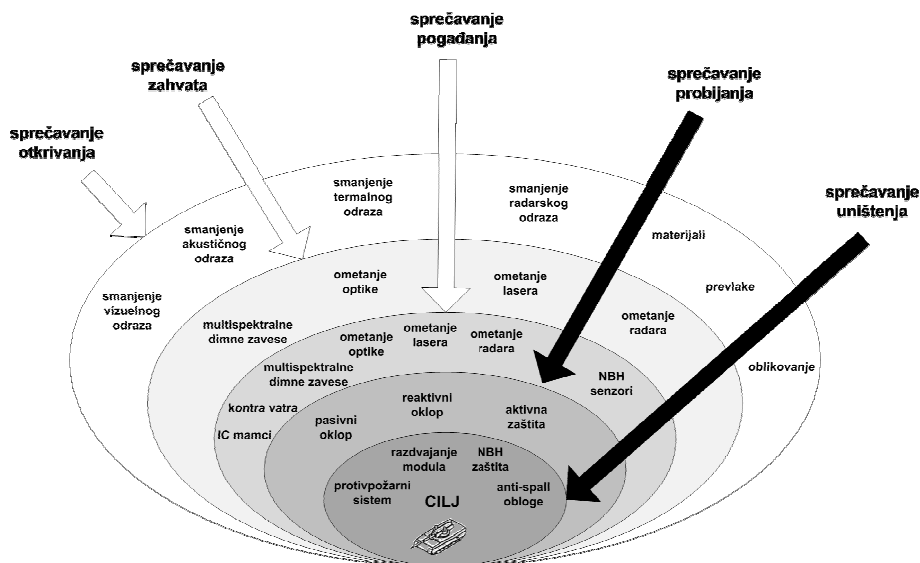
p_5 – verovatnoća uništenja cilja posle probijanja oklopa.

Treba imati u vidu da verovatnoće p_j zavise od vrste cilja i sistema oruđe-projektil, kao i od sistema upravljanja vatrom i da je u opštem slučaju $j \neq 5$.

U konkretnom slučaju, balistika na cilju tretira samo poslednja dva nivoa zaštite: sam proces probijanja prepreke i efekte koji nastaju posle probijanja oklopa.

1.6. STRUKTURA KNJIGE

Posle uvodnog, prvog poglavlja u kome smo razmotrili predmet izučavanja balistike na cilju i neke njene osobenosti, u drugom poglavlju se analizira ponašanje materijala pod dejstvom dinamičkih opterećenja. Osnovni koncepti plastičnog deformisanja, talasa napona i udarnih talasa u čvrstim telima važni su za razumevanje procesa kojima se bavimo u balistici na cilju. U tom smislu, sadržaj ove celine prožima i sva tri naredna poglavlja.



Slika 1.1. Nivoi zaštite tenka (*protection onion*) koji se odnose na različite metode sprečavanja otkrivanja i zahvata cilja, pogađanja cilja, njegovog probijanja i uništenja posle proboja

Treće poglavlje bavi se mehanikom penetracije, odnosno probojnim dejstvom projektila. U najužem smislu, balistika na cilju se često identifikuje upravo sa mehanikom probijanja. U ovom poglavlju predstavimo najznačajnije empirijske i analitičke modele koji opisuju probojno dejstvo različitih tipova projektila na najraznovrsnijim preprekama.

U četvrtom poglavlju razmatramo drugi osnovni mehanizam delovanja projektila na cilju – rušeće dejstvo. Upoznaćemo se sa prirodom generisanja udarnih talasa koji predstavljaju posledicu eksplozije i njihovim prostiranjem u vazduhu, tlu i vodi. Takođe ćemo se baviti delovanjem ovih talasa na različite ciljeve.

Konačno, u poslednjem, petom poglavlju bavićemo se parčadnim dejstvom i procesom fragmentacije. Predstavimo složene teorijske modele koji omogućavaju određivanje raspodele brzine, veličine, mase i oblika fragmenata projektila parčadnog dejstva. Upoznaćemo se takođe i sa eksperimentalnim metodama određivanja efikasnosti parčadnog dejstva.

2. PONAŠANJE MATERIJALA PRI DINAMIČKOM OPTEREĆENJU

2.1. UVODNA RAZMATRANJA

Jedna od najvažnijih karakteristika procesa koji se proučavaju u okviru balistike na cilju je dinamički karakter opterećenja koja deluju na najrazličitije strukture, odnosno ciljeve. Ovo predstavlja bitnu razliku u odnosu na brojne procese u fizičkim i tehničkim sistemima koji imaju kvazistatički karakter. Kod eksplozija i udara, kojima se najviše bavimo, opterećenje u pravilu deluje vrlo kratko što uslovljava i odgovarajuću prirodu naprezanja napadnute strukture. U Tabeli 2.1 data je klasifikacija opterećenja imajuću u vidu karakterističnu vrednost brzine deformacija. Dinamički lom materijala, tipičan za procese probijanja i fragmentacije koje ćemo razmatrati u narednim poglavljima, spada u grupu procesa sa velikim deformacijama i velikim brzinama deformacija, koje najčešće pripadaju intervalu $\dot{\epsilon} = 10^3 \dots 10^5 \text{ s}^{-1}$.

Karakterizacija ponašanja materijala od kojih su izrađene strukture koje razmatramo u balistici na cilju (različite vrste projektila i ciljeva) predstavlja jedan od osnovnih problema pri modeliranju terminalnobilističkih procesa. Kvalitativno, materijal izložen impulsnom dejstvu može da trpi nominalno veća opterećenja nego u kvazistatičkim uslovima.

Pri manjim vrednostima opterećenja i deformacija materijal se nalazi u zoni *elastičnosti* gde se primenjuje poznati *HOOKEOV* zakon. Međutim, vrlo često je moguće zanemariti elastične deformacije materijala s obzirom da se na njih troši neuporedivo manja energija nego na *plastično deformisanje*.

Tabela 2.1. Klasifikacija opterećenja s obzirom na karakterističnu brzinu deformacija i odgovarajuće metode ispitivanja; prema (MEYERS, 1994)

| Brzina deformacije $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) | Kategorija | Metoda ispitivanja |
|---|---|--|
| $10^{-9} - 10^{-5}$ | Relaksacija napona, puzanje | Konvencionalne metode |
| $10^{-5} - 10^0$ | Kvazistatička opterećenja | Hidraulične mašine |
| $10^0 - 10^3$ | Dinamička opterećenja (male brzine deformacija) | Visokobrzinske mašine |
| $10^3 - 10^5$ | Dinamička opterećenja (velike brzine deformacija) | Primena eksploziva |
| $10^5 - 10^7$ | Dinamička opterećenja (ultrabrze deformacije) | Eksplozivi, udari ultra-brzinama, laseri |

3. MEHANIKA PENETRACIJE

3.1. UVODNA RAZMATRANJA

3.1.1. Definicija problema i značaj proučavanja probijanja

Pod *probijanjem (penetracijom)* se podrazumeva proces koji započinje udarom *penetratora* u *prepreku* i nastavlja se njegovim kretanjem kroz strukturu prepreke. Pri tome se pod *penetratorom* podrazumeva svako telo namenjeno za probojno dejstvo, dok se *preprekom* smatra sredina izložena istom dejstvu.

Proučavanje ove pojave započeto je sredinom XIX veka uočavanjem osnovnih zakonomernosti između karakteristika penetratora i prepreke i parametara procesa penetracije. Činjenica da ni do danas nije nađeno opšte rešenje problema penetracije ilustruje složenost i raznovrsnost fenomena koji su povezani sa procesom probijanja.

Značaj proučavanja penetracije ogleda se u njenoj primeni koja ima dva vida. Osnovno polje primene je vojna tehnika, s obzirom da je probijanje jedan od važnijih mehanizama kojim se bave konstrukcija projektila, odnosno balistika na cilju. Razmatranje procesa probijanja ima fundamentalni značaj, sa jedne strane, za optimizaciju konstrukcije projektila probojnog i razornog dejstva, kao i, sa druge strane, za projektovanje balističke zaštite. Osim toga, postoje i brojne civilne primene procesa probijanja kao što su zaštita objekata (npr. nuklearnih elektrana), te primene u rudarstvu i građevinarstvu. Vojne aplikacije su svakako najbitniji cilj i najznačajniji pokretač istraživanja u oblasti mehanike penetracije.

Razmatranje procesa probijanja nezamislivo je bez svestranih eksperimentalnih ispitivanja, dok su teorijska istraživanja multidisciplinarna, budući da obuhvataju različite oblasti mehanike krutog i deformabilnog tela (otpornost materijala, teoriju elastičnosti i plastičnosti, prostiranje talasa napona, itd.).

3.1.2. Vrste prepreka i penetratora

Na proces penetracije utiče veliki broj parametara koji se odnose na karakteristike penetratora, odnosno prepreke i na uslove udara. Stoga postoji veliki broj kriterijuma za kategorizaciju penetracionih procesa. Sa stanovišta pojava koje karakterišu probijanje, a koje su relevantne za modeliranje procesa, osnovna klasifikacija vezana je za *vrstu materijala prepreke*. S obzirom na ovaj kriterijum, najčešće se razmatra proces probijanja sledećih vrsta materijala prepreke:

- metali – najznačajniju primenu imaju čelici i laki metali (aluminijum i titanijum),
- beton, uključujući i armirani beton,
- tlo, koje podrazumeva najrazličitije tipove zemljišta,
- keramički materijali i staklo,
- polimeri i vlaknima ojačani plastični materijali,
- tkanine i kompozitni vlaknasti materijali.

Važnu karakteristiku prepreke predstavlja i njena *debljina*, budući da značajno utiče na prirodu procesa probijanja. Sa stanovišta debljine razlikujemo četiri vrste prepreka:

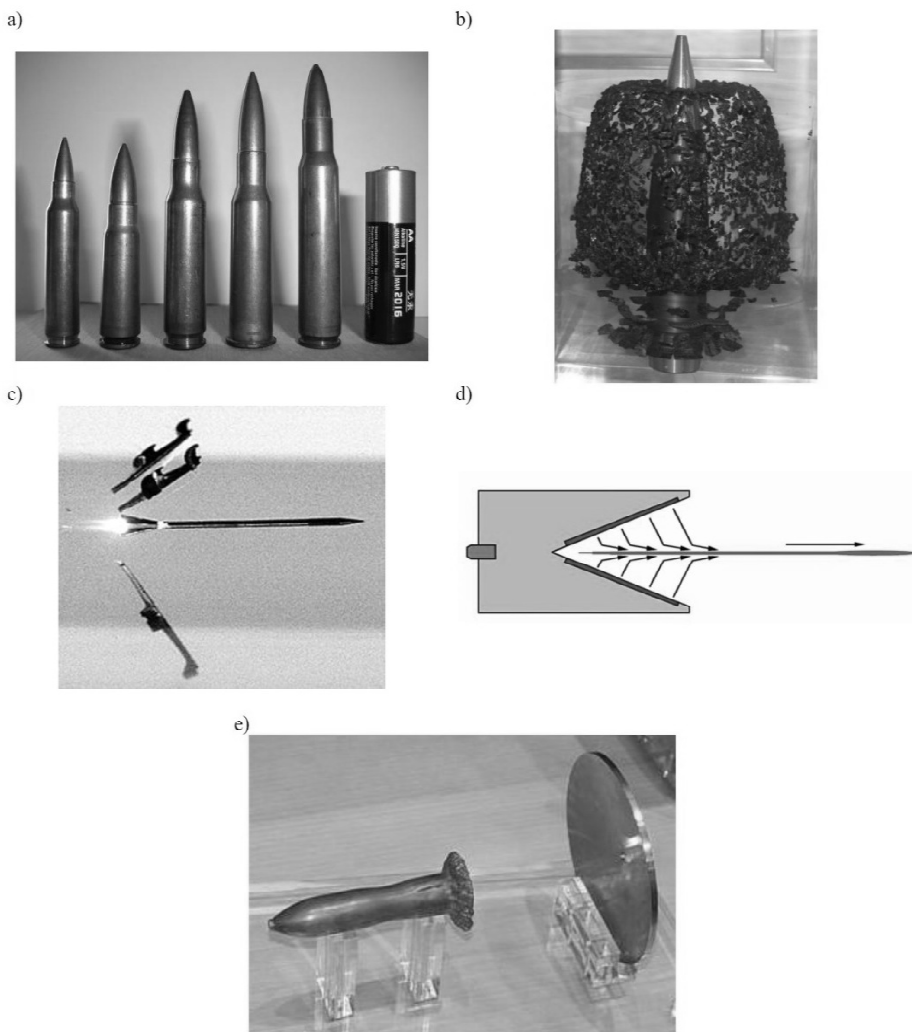
- *polubeskonačne prepreke*; teorijski radi se o apstraktnoj prepreci koja u stvari čini poluprostor; pod polubeskonačnom preprekom podrazumeva se takođe i prepreka dovoljno velike debljine kod koje se uticaj zadnje površine prepreke, kao i same debljine prepreke na proces probijanja može zanemariti,
- *debele prepreke i prepreke srednje (umerene) debljine* karakteriše više ili manje značajan uticaj zadnje, slobodne površine prepreke na proces penetracije,
- *tanke prepreke* su definisane nepromenljivošću napona smicanja duž cele debljine prepreke.

Za analizu su takođe značajne i *poprečne dimenzije prepreke*. Konačno, s obzirom na broj slojeva razlikuju se: *monolitne (jednoslojne) i višeslojne prepreke*. Dalje će u pravilu biti razmatrane ravne, homogene, nepokretne, monolitne prepreke različitih debljina.

Vrsta penetratora takođe bitno utiče na karakter procesa probijanja. Sa aspekta primene u vojnoj tehnici, značajne su sledeće vrste penetratora prikazane na sl. 3.1:

- projektili koji se ispaljuju iz streljačkog naoružanja (različiti tipovi pištolja, automata, pušaka i mitraljeza),
- fragmenti košuljice razornih projektila,
- penetratori potkalibarnih projektila,
- kumulativni mlaz, koji nastaje preoblikovanjem obloge kumulativnih projektila,
- preoblikovani disk, koji deluje na principu *MISZNAY-SHARDIN*-ovog efekta.

Treba primetiti da prve dve kategorije penetratora spadaju u grupu penetratora relativno *male energije* i namenjene su za delovanje protiv lako zaštićenih ciljeva i žive sile. Preostale tri grupe penetratora imaju *visoku energiju* i u pravilu su namenjene za protivoklopno dejstvo.



Slika 3.1. Različite vrste penetratora: a) municija za streljačko naoružanje – selekcija pušanih metaka kalibra 5,56 mm i 7,62 mm, b) prikaz parčadi nastale fragmentacijom košuljice razornog projektila, c) penetrator potkalibarnog projektila – trenutak odvajanja nosača neposredno posle izlaska projektila iz cevi, d) pojednostavljeni šematski prikaz nastajanja kumulativnog mlaza, e) EFP projektil – preoblikovanje diska u penetrator

Takođe, prvu i treću kategoriju penetratora čine projektili koji se lansiraju na klasičan način – unutrašnjebalističkim procesom u cevima odgovarajućih oružja, odnosno oruđa. Preostali penetratori se ubrzavaju putem eksplozivne propulzije, tj. koriste hemijsku energije koja potiče od brzantnih eksploziva.

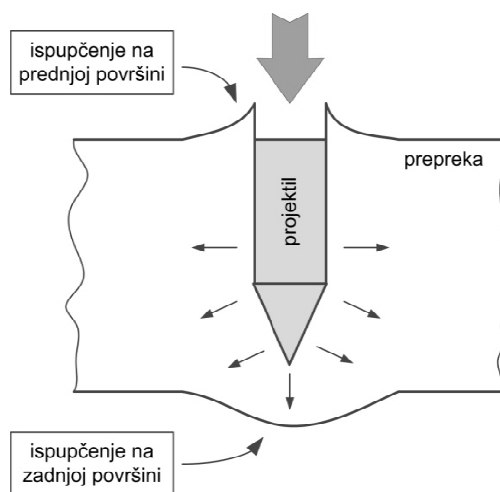
Penetratori (izuzev fragmenata) imaju cilindričan oblik sa ravnim, sfernim, konusnim, oživalnim ili složenim oblikom prednjeg dela.

Osim karakteristika prepreke i penetratora, za penetracioni proces su važni i *početni uslovi* pri inicijalnom kontaktu penetratora i prepreke – reč je o *udarnoj brzini* i *udarnom uglu* penetratora.

3.1.3. Tipovi penetracionih procesa

U zavisnosti od osnovnih "ulaznih" parametara procesa penetracije razmatranih u prethodnom odeljku (karakteristike penetratora, prepreke i uslovi udara), sam proces može imati sasvim različitu prirodu. Naime, pri različitim uslovima menjaju se dominantni fenomeni koji karakterišu interakciju penetrator/prepreka i koji definišu mehanizam penetracionog procesa. U nastavku ćemo ukratko opisati neke od najznačajnijih tipova procesa probijanja.

Plastično formiranje otvora (eng. *piercing* ili *ductile hole formation*). Ovaj mehanizam penetracije, predstavljen na sl. 3.2, tipičan je za penetratore visoke krutosti sa oštrim (oživalnim ili konusnim) vrhom i prepreke koje karakteriše izrazita plastičnost. Posle početnog utiskivanja penetratora, dolazi do plastičnog deformisanja materijala prepreke i njegovog potiskivanja prvenstveno u radijalnom pravcu. U pravilu nema značajnog deformisanja projektila i ne dolazi do odvajanja materijala prepreke. Na zadnjoj površini prepreke obično se formira ispupčenje, dok na prednjoj (ulaznoj) površini prepreke može doći do stvaranja manjeg ispupčenja, venca ili do rascvetavanja. S obzirom da je plastično deformisanje materijala prepreke dominantan mehanizam probijanja, može se pokazati da je napon tečenja ključna karakteristika ovog materijala koja definiše otpornost. Generalno, plastično formiranje otvora je mehanizam probijanja kome je svojstvena velika apsorpcija energije penetratora i koji minimizuje efekte delovanja penetratora iza prepreke.



Slika 3.2. Plastično formiranje otvora – šematski prikaz mehanizma probijanja

4. RUŠEĆE DEJSTVO

4.1. UVOD

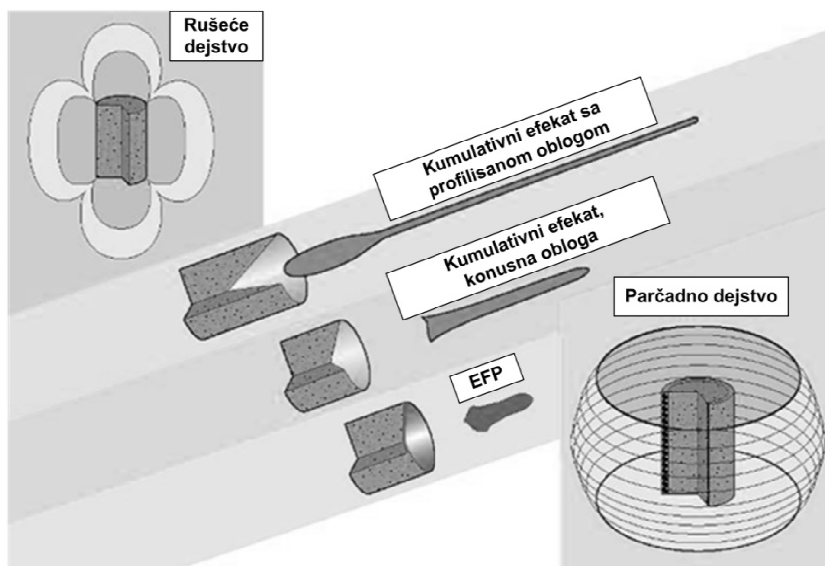
Rušeće dejstvo (engl. *blast*) je direktna posledica eksplozije – procesa čija je osnovna karakteristika izuzetno brzo oslobađanje energije. U primenama koje se odnose na sisteme naoružanja najznačajnije su hemijske eksplozije pri kojima dolazi do hemijskog preobražaja eksplozivne materije uz formiranje gasovitih produkata detonacije. U pogledu fizičkog (agregatnog) stanja, najzastupljeniji i za dalja razmatranja najznačajniji su čvrsti sekundarni (brizantni) eksplozivi.

Kao što je poznato iz fizike eksplozivnih procesa, detonacijom ovih eksplozivnih materija dolazi do formiranja gasovitih produkata čiji je pritisak reda 15 GPa do 40 GPa, a temperatura od 2000 K do 4000 K. Ovi vreli gasovi visokog pritiska naglo se šire formirajući tzv. primarnu zonu bliskog dejstva u kojoj je pritisak gasa i dalje veoma visok i gde su razaranja izuzetno velika. Ova zona je ograničena na prostor u neposrednoj blizini eksplozivnog punjenja (u narednom odeljku pokazaćemo da orijentacioni radijus ove zone iznosi oko 16 radijusa eksplozivnog punjenja). U primarnoj zoni za razmatranje mehaničkih efekata i prenosa energije značajna je analiza širenja gasovitih produkata detonacije, kao i kretanje sabijenog okolnog vazduha, pa se ova zona naziva i kompozitna zona.

U sekundarnoj zoni rušećeg dejstva, na većim rastojanjima od centra eksplozije, pritisak značajno opada i za opisivanje fenomenologije dejstva dovoljno je razmatrati prostiranje formiranog udarnog talasa u okolnoj sredini.

U ovom poglavlju razmotrićemo način određivanja parametara udarnog talasa koji nastaje kao posledica eksplozije. Takođe ćemo analizirati interakciju udarnih talasa sa preprekom, kao i delovanje udarnog talasa na različite strukture. Pored toga, ukratko ćemo razmotriti prirodu rušećeg dejstva pri detonaciji u tlu i podvodnoj eksploziji.

Rušeće dejstvo je, dakle, posledica isključivo procesa detonacije i prostorno nije usmereno kao što je slučaj sa nekim drugim primenama efekata eksplozije (sl. 4.1). Ovo tzv. *omnidirekciono* dejstvo je jedna od najvažnijih osobina rušećeg efekta.



Slika 4.1. Rušeće dejstvo (*blast*) i drugi vidovi primene eksplozivnih procesa u bojnim glavama. Kumulativni efekat i *MISZNAY-SCHARDIN*-ov efekat, tj. eksplozijom formirani projektil (EFP) su primeri usmerenog delovanja eksplozije. Fragmentaciju i parčadno dejstvo karakteriše delimično (uglavnom radijalno) usmeravanje energije eksplozije. Energija rušećeg dejstva nije usmerena (tzv. omnidirekciono dejstvo)

4.2. ZONA BLISKOG DEJSTVA

Primarna zona bliskog dejstva produkata detonacije definisana je prvenstveno nivoom pritiska u gasovitim produktima detonacije. Razmotrimo detonaciju neobloženg sfernog eksploziva radijusa r_e koji je iniciran u centru sfere. Za egzaktno određivanje raspodele pritiska, brzine, gustine i temperature u gasovitim produktima detonacije neophodno je formirati jednačine koje opisuju zakone održanja mase, količine kretanja i energije. Osim toga, potrebno je poznavati jednačinu stanja produkata detonacije, kao i materijala okolne sredine. Ovaj sistem jednačina moguće je rešiti samo numeričkim putem.

Ovde ćemo na bazi pojednostavljenog pristupa analitički približno proceniti vrednost pritiska u gasovitim produktima detonacije. Najpre ćemo pretpostaviti da se proces detonacije, odnosno hemijskog preobražaja eksploziva odvija trenutno. Realno, proces detonacije sfernog eksploziva traje:

$$t_d = \frac{r_e}{D} \quad (4.1)$$

gde je D brzina detonacije eksploziva. Iz prethodne jednačine se vidi da vreme trajanja detonacionog procesa za izabrani eksploziv zavisi od radijusa sfere.

Npr. za TNT (brzina detonacije 6900 m/s) mase 1 kg (radijus 52 mm) ovo vreme je 7,5 μ s.

Sledeći korak je procena pritiska homogenih gasovitih produkata detonacije p_d koji sada zauzimaju istu zapreminu koju je prethodno imao eksploziv u čvrstom stanju. Jedan od rezultata hidrodinamičke teorije detonacije *CHAPMAN-JOUGEUTA* je izraz za toplotu eksplozije Q (po jedinici mase eksploziva) koja je oslobođena u toku detonacionog procesa:

$$Q = \frac{D^2}{2(\gamma^2 - 1)}, \quad (4.2)$$

pri čemu je γ politropski koeficijent koji karakteriše produkte detonacije. Unutrašnja energija produkata detonacije neposredno posle završetka eksplozivnog preobražaja može se napisati u obliku:

$$E = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p_d}{\rho_d}, \quad (4.3)$$

gde je ρ_d gustina produkata detonacije koja je jednaka gustini eksploziva ρ_e , budući da u razmatranom trenutku produkti detonacije imaju zapreminu koja je jednaka zapremini eksploziva. Ako pretpostavimo da je brzina gasovitih produkata zanemarljiva, tada se prema zakonu o održanju energije celokupna oslobođena energija transformiše u unutrašnju energiju produkata detonacije, pa se desne strane jednačina (4.2) i (4.3) mogu izjednačiti, što daje sledeći izraz za "početni" pritisak produkata detonacije:

$$p_d = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} = \frac{1}{2} p_{CJ}. \quad (4.4)$$

Poslednja relacija pokazuje da je pritisak gasovitih produkata detonacije, pod ranije navedenim pretpostavkama, jednak polovini pritiska u ravni *CHAPMAN-JOUGEUT*, neposredno po završetku hemijskih reakcija, koji je definisan poznatom formulom:

$$p_{CJ} = \frac{\rho_e D^2}{\gamma + 1}. \quad (4.5)$$

Posle završenog procesa detonacije, ekspanzija gasovitih produkata detonacije može se predstaviti politropskim zakonom u obliku:

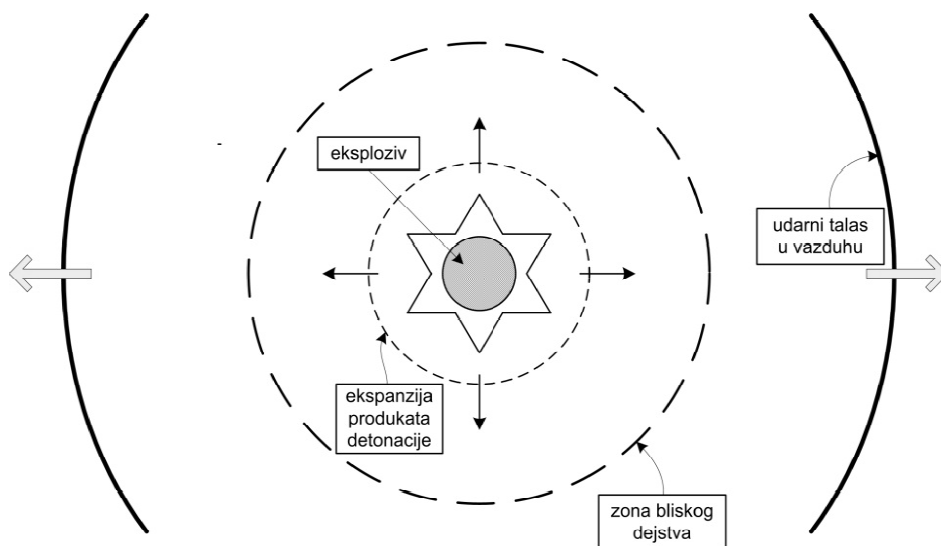
$$pV^\gamma = p_d V_e^\gamma = \text{const.} \quad (4.6)$$

Poslednja relacija predstavlja vrlo pojednostavljen model širenja produkata detonacije, pri čemu se najčešće uzima da je politropska konstanta $\gamma=3$. Važno je napomenuti da se realna ekspanzija produkata detonacije opisuje složenijim modelima, odnosno da parametar γ nema konstantnu vrednost. Naime, na

početku širenja gasova ovaj parametar može imati vrednosti koje su veće od 5, da bi se one postepeno smanjivale i pri malim pritiscima dostigle vrednost 1,4. Ako pretpostavimo da je širenje produkata detonacije sferno, kada produkti detonacije dostignu radijus r , očigledno će njihov pritisak biti određen izrazom:

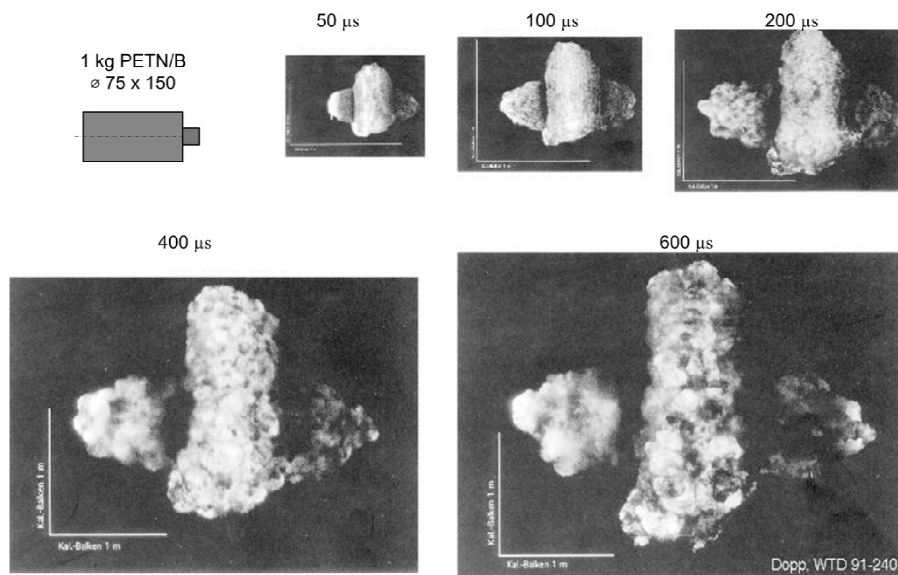
$$p = p_d \left(\frac{r_e}{r} \right)^{3\gamma} = \frac{1}{2} p_{CJ} \left(\frac{r_e}{r} \right)^9. \quad (4.7)$$

Iz prethodnog izraza se jednostavno nalazi da već pri ekspanziji produkata detonacije definisanoj odnosom radijusa $r/r_e=4$, njihov pritisak opada na vrednost manju od 1 bar. Samim tim, pritisak u produktima detonacije postaje značajno manji od pritiska u udarnom talasu koji se formira u okolnoj sredini. Istovremeno, dolazi i do značajnog pada brzine samih produkata detonacije i počinje njihovo mešanje sa okolnim vazduhom. Numeričke simulacije (CULLIS, 2001) pokazuju da na rastojanjima od 10 do 16 radijusa eksplozivnog punjenja uticaj samih produkata detonacije postaje zanemarljiv u odnosu na efekat udarnog talasa koji se, usled veće brzine prostiranja, odvaja od produkata detonacije (sl. 4.2). Na veličinu zone bliskog dejstva utiču karakteristike okolne sredine, kao i same eksplozivne materije, a naročito njen bilans kiseonika. Naime, u slučaju negativnog bilansa kiseonika, produkti detonacije mogu da reaguju sa kiseonikom iz vazduha i time znatno povećaju količinu oslobođene energije. Na sl. 4.3 predstavljena je evolucija ekspanzije gasovitih produkata detonacije 1 kg pentrita cilindričnog oblika. Izračunate vrednosti brzine širenja produkata detonacije za dva karakteristična pravca predstavljene su na sl. 4.4. Uočava se naglo smanjenje brzine ekspanzije gasovitih produkata detonacije.

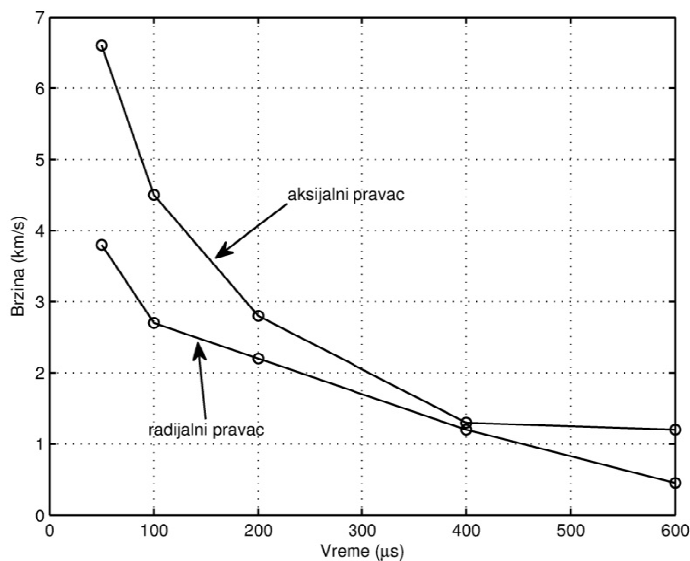


Slika 4.2. Primarna zona bliskog dejstva i generisanje udarnog talasa pri eksploziji

Balistika na cilju – Rušeće dejstvo



Slika 4.3. Evolucija širenja gasovitih produkata detonacije eksplozivnog punjenja izrađenog od pentrita (87%) i plastifikatora (13%). Punjenje ima masu od 1 kg i cilindričnog je oblika, prečnika 75 mm i dužine 150 mm



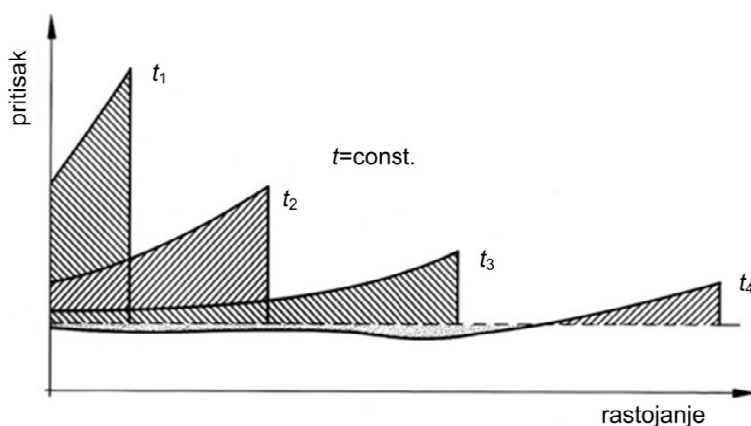
Slika 4.4. Brzina širenja gasovitih produkata detonacije 1 kg pentrita u aksijalnom i radijalnom pravcu

Zonu bliskog dejstva karakterišu visoki pritisci kako udarnog talasa, tako i samih produkata detonacije, i snažno destruktivno dejstvo. Takođe, ova zona predstavlja domen *eksplozivne propulzije*, tj. razmatrani visoki pritisci gasovitih produkata detonacije mogu da ubrzaju okolni materijal (prirodno formirane

fragmente, prethodno formirane fragmente, ostale delove projektila, delove napadnute strukture) što dovodi do parčadnog dejstva. Osim toga, u zoni bliskog dejstva gasovi imaju visoku temperaturu što u pravilu dovodi do značajnih termičkih opterećenja i izazivanja požara u slučaju zapaljivih materijala koji se nalaze u ovoj zoni.

4.3. PROSTIRANJE UDARNOG TALASA U VAZDUHU

Kao što je prethodno opisano, detonacijom eksploziva dolazi do formiranja gasovitih produkata koji počinju da se šire velikom brzinom (sl. 4.4). Ova ekspanzija takođe izaziva pomeranje sloja vazduha koji se nalazi neposredno uz produkte detonacije. Brzina kretanja ove zone vazduha je znatno veća od brzine zvuka u vazduhu, što za posledicu ima formiranja fronta udarnog talasa u vazduhu neposredno ispred samih gasovitih produkata detonacije, sl. 4.2. Kao što je poznato iz teorije udarnih talasa, ovo dovodi do praktično trenutnog povećanja pritiska vazduha u odnosu na ambijentalni atmosferski pritisak. Na sl. 4.5 predstavljeno je prostiranje udarnog talasa, tj. profil natpritiska za nekoliko vremenskih trenutaka. U trenutku t_1 , uočavamo da ispred udarnog talasa nema promene pritiska, dok natpritisak ima najveću vrednost neposredno iza udarnog talasa. Usled brzog prostiranja udarnog talasa i širenja produkata detonacije, u zoni iza udarnog talasa ka centru eksplozije natpritisak se smanjuje i njegova vrednost u centru je približno dva puta manja nego u frontu udarnog talasa. Uočavamo da u trenucima t_2 i t_3 natpritisak ima sličan profil, ali se njegova maksimalna vrednost (u frontu udarnog talasa) smanjuje sa udaljavanjem od centra eksplozije. Vazduh zahvaćen udarnim talasom kreće se u pravcu prostiranja talasa, tj. brzina *vetra udarnog talasa* ima smer kretanja talasa.



Slika 4.5. Profil natpritiska iza udarnog talasa u funkciji rastojanja od izvora eksplozije, u različitim trenucima

5. FRAGMENTACIJA I PARČADNO DEJSTVO

5.1. UVODNA RAZMATRANJA

5.1.1. Fragmentacija – pojam i primene

Fragmentacija je proces strukturne dezintegracije tela, tj. formiranja izvesnog broja parčadi usled višestrukog loma materijala fragmentacionog tela. Reč je o fundamentalnoj pojavi koja može da se odigrava u različitim prostornim i vremenskim razmerama. Fragmentacija karakteriše veliki broj raznovrsnih fizičkih procesa u prirodnim i tehničkim sistemima, kao što su: sudari različitih objekata (od elementarnih čestica, udara probojnih projektila u prepreku, pa do kosmičkih tela), kontrolisani procesi drobljenja/mlevenja materijala, različite vrste procesa indukovanih eksplozijom i sl.

Primene kontrolisane fragmentacije su brojne i mogu se s obzirom na namenu klasifikovati u dve grupe: vojne i civilne primene. Ovde ćemo se zadržati na vojnim primenama koje su u pravilu usko vezane za oblast balistike na cilju. Prirodna i kontrolisana fragmentacija predstavljaju ključne mehanizme delovanja projektila parčadnog dejstva. Videli smo da fragmentacija probojnog projektila, kao i same napadnute prepreke, predstavlja jedan od mogućih ishoda penetracionog procesa. Izučavanje fragmentacije kumulativnog mlaza je veoma važno za ocenu efikasnosti ove vrste projektila probojnog dejstva. Fragmentacija materijala prepreke na njenoj zadnjoj površini usled dejstva udara ili kontaktne detonacije (*spalling*) takođe je važan mehanizam probojnog dejstva. Konačno, proučavanje navedenih vidova fragmentacije značajno je sa stanovišta analize otpornosti i optimizacije zaštite potencijalnih ciljeva koji mogu biti izloženi parčadnom dejstvu. Najznačajnija istraživanja u domenu eksperimentalne fragmentacije, kao i najveći broj teorijskih modela fragmentacije bili su motivisani primenama u domenu odbrambenih tehnologija.

5.1.2. Podela fragmentacionih procesa

Postoje brojne klasifikacije procesa fragmentacije koje su zasnovane na različitim kriterijumima. Osnovna podela fragmentacionih procesa vezana je za karakter opterećenja koja izazivaju fragmentaciju. Naprezanje, deformisanje i lom materijala mogu biti izazvani kvazistatičkim silama ili dinamičkim opterećenjem, tako da razlikujemo dva osnovna tipa procesa:

- *kvazistatičke procese fragmentacije*, kao što je drobljenje materijala, karakteriše ponovljeno dejstvo ustaljenih opterećenja koje dovodi do

sekvencijalne fragmentacije, tj. ponovljene fragmentacije već formiranih fragmenata,

- *dinamičku fragmentaciju*, koja je posledica delovanja snažnih impulsnih opterećenja koja praktično izazivaju jednovremeno formiranje izvesnog broja fragmenata; dve osnovne vrste procesa koje izazivaju dinamičku fragmentaciju su udari i eksplozije.

Sa aspekta porekla fragmenata, njihovog dejstva i zaštite od posledica fragmentacije razlikuju se:

- *primarna fragmentacija*, koja je posledica inicijalne (osnovne) eksplozije ili udara; *primarni fragmenti* nastaju kao rezultat procesa primarne fragmentacije;
- *sekundarna fragmentacija*, koja nastaje usled naknadnog dejstva primarne fragmentacije, npr. dejstvo udarnog talasa ili primarnih fragmenata može da izazove sekundarnu fragmentaciju objekata koji se nalaze u okolini.

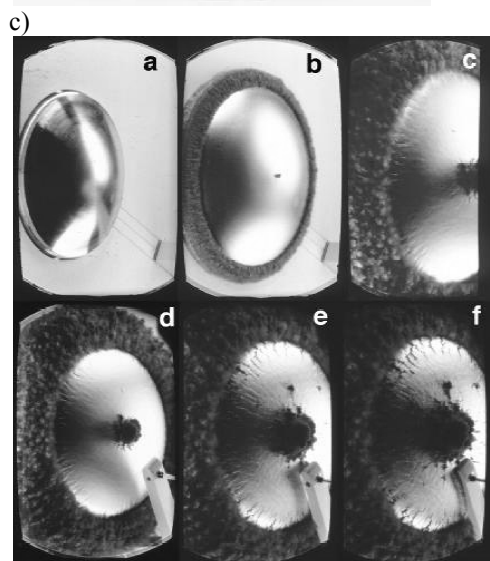
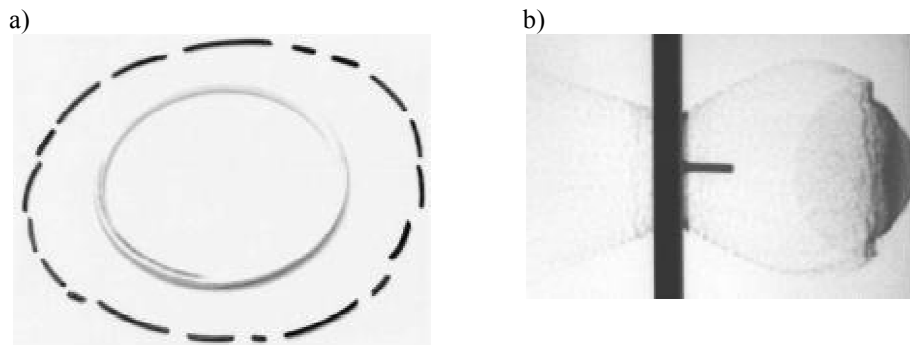
S obzirom na vrstu materijala fragmentacionog tela, sa stanovišta primene su interesantni: metali, geološki materijali, keramika i staklo. Suštinski se razlikuju procesi fragmentacije krtih i žilavih materijala.

U zavisnosti od broja prostornih dimenzija koje karakterišu fragmentacioni proces, razlikujemo jednodimenzionu (1D), dvodimenzionu (2D) i trodimenzionu (3D) fragmentaciju. Na sl. 5.1 prikazani su primeri fragmentacionih procesa različite dimenzionalnosti. U ovom poglavlju ćemo se prevashodno baviti analizom 1D, 2D i 3D dinamičke primarne fragmentacije metalnih struktura.

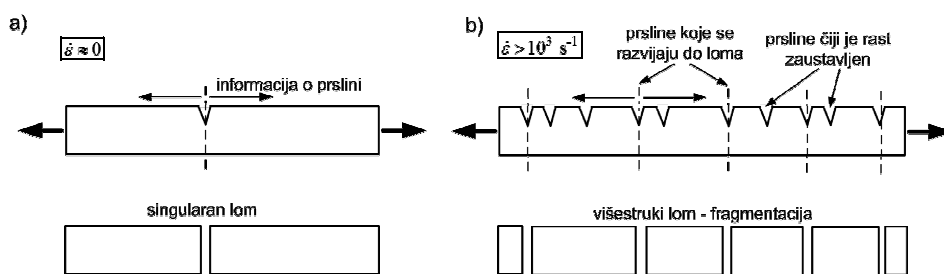
5.1.3. Osobnosti procesa dinamičke fragmentacije

Osnovna osobenost dinamičke fragmentacije i dinamičkog loma materijala u odnosu na kvazistatičke uslove je prisustvo udarnih talasa u opterećenom fragmentacionom telu. Kao što smo videli u Poglavlju 2, udarni talasi nastaju kao posledica delovanja impulsnih opterećenja – udara i eksplozija. Da bi došlo do loma neophodno je da ovi talasi izazovu naprezanja, odnosno deformacije materijala koja prevazilaze kritične vrednosti.

Postavlja se pitanje koja je osnovna razlika u mehanizmima koji sa jedne strane dovode do tipičnog kvazistatičkog loma materijala, a sa druge strane do fragmentacije u uslovima dinamičkog loma. Razmotrimo najpre kvazistatički lom (sl. 5.2a). Pri postepenom povećavanju opterećenja u slučaju zategnutog štapa, pri određenoj kritičnoj vrednosti napona dolazi do formiranja inicijalne prsline (u slučaju krtih materijala) ili lokalizovanog tečenja materijala koje dovodi do kontrakcije poprečnog preseka štapa (za slučaj žilavih materijala).



Slika 5.1. Primeri procesa dinamičke fragmentacije različite dimenzionalnosti:
 a) jednodimenziona fragmentacija prstena, prikaz nefragmentisanog prstena i fragmenata generisanih putem elektromagnetnog opterećenja,
 b) radiografski snimak trodimenzione fragmentacije usled udara aluminijumskog projektila u tanku aluminijumsku prepreku pri brzini od $\sim 7\text{km/s}$,
 c) dvodimenziona fragmentacija dela tanke sfere pod dejstvom produkata detonacije, snimci dobijeni ultrabrzom fotografijom



Slika 5.2. Fenomenologija nastanka loma materijala: a) kvazistatičko opterećenje dovodi do klasičnog singularnog loma, b) impulsno opterećenje izaziva dinamička naprezanja i dovodi do višestrukog loma materijala, odnosno fragmentacije

S obzirom da je brzina povećavanja opterećenja mala, informacija o formiranom “slabom” preseku stiže u sve druge preseke opterećenog uzorka pre nego što dođe do značajnog povećanja opterećenja i stvaranja novih prslina ili kontrakcija. Na taj način, dolazi do koncentracije napona na inicijalno

formiranom oslabljenom preseku. Rezultat je klasičan kvazistatički lom materijala koji rezultira formiranjem dva fragmenta.

U slučaju impulsnih opterećenja, odnosno dinamičkog loma materijala (sl. 1.2b), brzina porasta opterećenja je znatno veća od brzine prostiranja informacije o inicijalno oslabljenom preseku. Zbog toga dolazi do stvaranja veoma velikog broja oslabljenih preseka opterećenog materijala u veoma kratkom vremenskom intervalu. Zavisno od broja ovakvih preseka, intenziteta i brzine opterećenja, karaktera deformacije, kao i komunikacije između ovih oslabljenih preseka, jedan broj započetih procesa loma se zaustavlja, dok se izvestan broj oslabljenih preseka do kraja razvije do konačnog loma materijala. Tako dolazi do višestrukog loma materijala, odnosno fragmentacije.

Za proces fragmentacije su od ključnog značaja dve grupe ulaznih parametara: karakter opterećenja i osobine materijala. Jedna od najvažnijih fizičkih karakteristika procesa je brzina proizvedenih deformacija $\dot{\epsilon}$ materijala fragmentacionog tela, koja zavisi od dve pomenute grupe parametara. Procesi dinamičkog loma i fragmentacije materijala koji su od interesa za balistiku na cilju spadaju u grupu dinamičkih procesa koje karakterišu velike deformacije i velike brzine deformacija, koje pripadaju intervalu $\dot{\epsilon} = 10^3 \dots 10^5 \text{ s}^{-1}$. Iz navedenog je jasno da su zakonitosti ponašanja razmatranog materijala fragmentacionog tela u uslovima dinamičkih opterećenja od ključnog značaja za modeliranje dinamičke fragmentacije.

Za dinamičku fragmentaciju je od posebnog značaja proučavanje tri osnovna mehanizma koja dovode do dinamičkog loma materijala:

- brzo prostiranje prslina u materijalu, što karakteriše lom dominantno krutih materijala,
- brzo stvaranje, rast i spajanje mikro-šupljina u opterećenom materijalu predstavlja važan mehanizam koji dovodi do loma žilavih materijala,
- formiranje zona (pojaseva) adijabatskog smicanja predstavlja poseban slučaj loma materijala usled smicanja koji takođe karakteriše dinamička naprezanja žilavih materijala.

U praksi se često istovremeno sreću dve ili sve tri prethodno navedene pojave.

U fokusu našeg interesovanja je jedna klasa problema dinamičke fragmentacije. Reč je o fragmentaciji cilindra pod dejstvom unutrašnjeg pritiska koji stvaraju gasoviti produkti detonacije eksploziva.

5.1.4. Fragmentacija cilindra pod dejstvom produkata detonacije

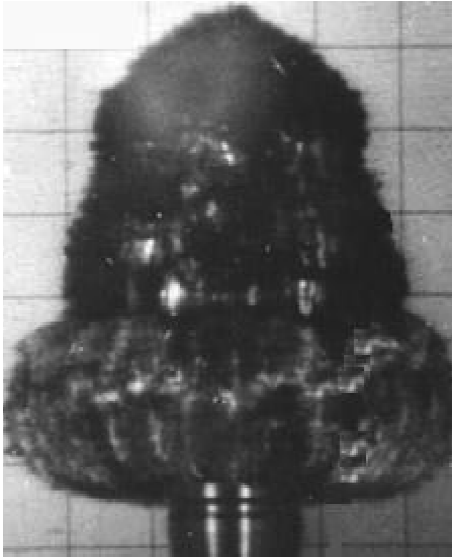
Fragmentacija je, kao što je već istaknuto, fenomen od ključnog značaja za projektovanje, redizajniranje i ocenu efikasnosti projektila parčadnog dejstva. Osnovni cilj proučavanja fragmentacije cilindra pod dejstvom produkata

detonacije je formiranje matematičko-fizičkog modela ovog procesa, koji je osnova za modeliranje fragmentacije košuljice razornih projektila.

Treba svakako napomenuti da u novije vreme sve značajnije mesto u klasi projektila parčadnog dejstva imaju konstrukcije sa prefragmentisanim parčadima, kao i košuljice kod kojih se ostvaruje tzv. kontrolisana fragmentacija. Na ovaj način se obezbeđuje optimizacija mase i oblika formiranih fragmenata. Međutim, klasično rešenje košuljica koje se rasprskavaju putem prirodne fragmentacije i dalje predstavlja dominantan pristup iz više razloga, od kojih su najznačajniji: (i) strukturna otpornost u uslovima velikih ubrzanja u fazi kretanja kroz cev, odnosno lansiranja projektila, (ii) jednostavnost i tehnološkičnost konstrukcije, te njena pouzdanost i cena.

Detonacijom eksploziva u košuljici projektila formiraju se gasoviti produkti čiji pritisak iznosi nekoliko stotina hiljada bara. Ovaj pritisak izaziva izuzetno snažna impulsna naprezanja i deformacije materijala košuljice i konačno dovodi do gubitka strukturne celovitosti košuljice, tj. do njene fragmentacije. Sam proces traje veoma kratko – od trenutka inicijacije detonacije do formiranja parčadi prođe vreme reda nekoliko desetina mikrosekundi. Usled dejstva udarnih talasa i pritiska košuljica se najpre plastično deformiše poprimajući karakterističan kruškast oblik, pri čemu se prečnik košuljice značajno povećava (približno se udvostručava). Ovi procesi imaju kompleksnu talasnu prirodu i dovode do stvaranja složenog, prostorno nehomogenog naponsko-deformacionog polja u materijalu košuljice. Pri dovoljno velikim vrednostima napona, odnosno deformacija, praktično istovremeno, dešavaju se dva procesa: (i) usled zateznih napona dolazi do formiranja aksijalnih prslina, odnosno do objedinjavanja mikro-šupljina na spoljašnjoj površini košuljice, i (ii) usled snažnog sabijanja na unutrašnjem delu košuljice formiraju se zone smicanja. U zavisnosti od debljine košuljice presudnu ulogu na iniciranje prslina i zona smicanja imaju intenzitet i frekvencija oscilacija napona (deblje košuljice), odnosno strukturna nehomogenost materijala (tanke košuljice). Broj prslina, odnosno objedinjenih mikro-šupljina, kao i zona smicanja raste progresivno i to po različitim pravcima – po dužini košuljice, njenom obimu, u pravcu pod uglom od 45° u odnosu na prethodna dva. Na taj način karakter, raspored i broj krtih i plastičnih prslina, odnosno zona smicanja na košuljici određuju veličinu, masu i oblik formiranih fragmenata. Na sl. 5.3 predstavljena je ekspandirana košuljica razornog projektila u toku procesa fragmentacije, kao i izgled dela generisanih fragmenata.

S obzirom da su vrednosti energije koja se predaje materijalu u toku procesa širenja košuljice značajno veće od energije koja se utroši na deformisanje materijala i formiranje fragmenata, fragmenti nakon formiranja raspolažu značajnom kinetičkom energijom, odnosno brzinom (vrednosti reda 1000 m/s). Ova kinetička energija omogućava dejstvo fragmenata na cilju.



Slika 5.3. Snimak ultrabrzom kamerom ekspanzirane košuljice raznog projektila u toku procesa fragmentacije koji karakteriše početak isticanja gasovitih produkata detonacije (levo), i izgled dela fragmenata dobijenih fragmentacijom cilindra (desno)

Osnovni cilj modeliranja fragmenatacije košuljice projektila (kao i modeliranje fragmentacionih procesa uopšte) podrazumeva utvrđivanje raspodele mase (odnosno veličine) i oblika generisane parčadi, definisanje njihove raspodele u prostoru, kao i određivanje brzine razletanja fragmenata.

5.1.5. Pristupi modeliranju dinamičke fragmentacije

Proučavanja dinamičke fragmentacije u osnovi pripada domenu primenjene mehanike čvrstog tela u uslovima velikih brzina deformacije. Reč je o suštinski interdisciplinarnoj oblasti koja pored mehanike deformabilnog tela zahteva primenu rezultata iz mnogih naučnih domena: mehanike loma, teorije udarnih talasa, fizike eksplozije, dinamike gasova, nauke o materijalima, itd.

Eksperimentalni pristup predstavlja osnovni izvor kvalitativnih i kvantitativnih informacija o dinamičkoj fragmentaciji. Najčešće se izvode eksperimentalna ispitivanja fragmentacije materijala jednostavnih geometrijskih oblika (uglavnom prstenova, cilindara i sfera) u cilju određivanja mehaničkih karakteristika i fragmentacionih svojstava materijala. Pri tome se najčešće koriste tehnike zasnovane na primeni eksploziva i impulsnih elektromagnetnih opterećenja koja neposredno dovode do fragmentacije ili se primenjuju gasni topovi za ubrzavanje materijala do čije fragmentacije dolazi pri udaru u definisanu prepreku. Za beleženje i merenje relevantnih parametara procesa

fragmentacije koriste se brojne dijagnostičke i merne tehnike, kao što su: različite tehnike detekcije udarnog talasa, ultrabrza digitalna fotografija, impulsna radiografija i laserska interferometrija. Primena ovih mernih tehnika u eksperimentima omogućava sa jedne strane vizuelizaciju izuzetno brzih pojava (npr. pojava, karakter i širenje prslina, oblik deformisanog cilindra i sl.) i njihovo kvalitativno opisivanje. Sa druge strane, moguće je i merenje parametara procesa, kao što su npr. vreme trajanja procesa, pomeranja i brzine fragmentacionog tela i sl. Za prikupljanje generisanih fragmenata uz što manja sekundarna oštećenja koristi se veliki broj tehnika zasnovanih na pogodnoj primeni različitih barijera sa materijalima koji omogućavaju “mekano” zaustavljanje fragmenata (nabijeni pesak, drvena strugotina, seno, sneg, voda).

Na bazi rezultata eksperimetalnih istraživanja formirani su brojni empirijski modeli, posebno kada je u pitanju raspodela mase generisanih fragmenata. S obzirom na složenost opisanih pojava koje prate fragmentaciju, analiziranje statističkih zakonomernosti raspodele mase fragmenata dobijenih na osnovu velikog broja izvršenih eksperimenata pokazalo se kao veoma racionalan pristup. Empirijski zakoni raspodele mase fragmenata detaljno će biti analizirani u narednim odeljcima.

Postoje takođe i brojni fizički zasnovani modeli fragmentacije koji omogućavaju analitički pristup sagledavanju problema dinamičke fragmentacije. Modeli se zasnivaju na različitim teorijskim pristupima: statističko-mehanički, energetski, pristupi zasnovani na mehanici loma, termodinamici, itd.

Modeliranju dinamičke fragmentacije moguće je pristupiti uz primenu numeričkih metoda koje se zasnivaju na osnovnim zakonitostima fizike eksplozije i mehanike deformabilnog tela primenjenim na diskretizovan sistem eksploziv-obloga. Primena numeričkih kodova najčešće podrazumeva klasičnu analizu kretanja i deformisanja sistema do određenog trenutka kada se dostignu kritične vrednosti napona i deformacija koje definišu početak fragmentacije. Zatim se simulira proces fragmentacije, primenom određenih analitičkih ili empirijskih modela dinamičke fragmentacije. Referentan i savremen numerički pristup analizi fragmentacije košuljice razornih projektila podrazumeva korišćenje specijalno razvijenih hidrokodova (npr. CTH, ALE3D) ili primenu komercijalnih softverskih paketa (npr. Abaqus/Explicit ili ANSYS Autodyn).

5.2. BRZINA RAZLETANJA FRAGMENTATA

Jedna od najznačajnijih karakteristika fragmenata je njihova brzina razletanja. Zajedno sa masom fragmenta, brzina definiše njegovu kinetičku energiju, a time i efikasnost, odnosno probojnu moć.

LITERATURA

- Aurenhammer, F., Klein, R.: Voronoi Diagrams, in *Handbook of Computational Geometry* (Ed. J.-R. Sack and J. Urrutia), Amsterdam, North-Holland, 2000.
- Awerbuch J., Bodner S.R.: Experimental investigation of normal perforation of projectiles in metallic plates, *International Journal of Impact Engineering*, 1974, Vol. 10, No. 6, pp. 685-699.
- Awerbuch J., Bodner, S.R.: Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates, *International Journal of Solids and Structures*, 1974, Vol. 10, No. 6, pp. 671-684.
- Backman M.E., Goldsmith W.: The mechanics of penetration of projectiles into targets, *International Journal of Engineering Science*, 1978, Vol. 16, No. 1, pp. 1-99.
- Bai, Y., Cheng, C., Yu, S.: On evolution of thermo-plastic shear band, *Acta Mechanica Sinica*, 1986, No. 2, Vol. 1, pp. 1-7.
- Ben-Dor, G., Dubinsky, A., Elperin, T.: *High-speed penetration dynamics: Engineering models and methods*, World Scientific, Singapore, 2013.
- Bjelovuk, I., Jaramaz, S., Elek, P., Micković, D., Kričak, L.: Modelling of characteristics of a crater emerged from a surface explosion on the soil, *Combustion, Explosion, & Shock Waves*, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 395-400.
- Bulson, P.S.: *Explosive loading of engineering structures*, CRC Press, 1997.
- Campbell, G.H., Archbold, G.C., Hurricane, O.A., Miller, P.L.: Fragmentation in biaxial tension, *Journal of Applied Physics*, 2007, Vol. 101, No. 3, 10p.
- Carlucci, D.E., Jacobson, S.S.: *Ballistics: Theory and design of guns and ammunition*, CRC Press, 2008.
- Chen, X.W., Li, Q.M.: Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics, *International Journal of Impact Engineering*, 2002, Vol. 27, No. 6, pp. 619-637.
- Chi, R., Serjouei, A., Sridhar, I., Tan, G.: Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach, *International Journal of Impact Engineering*, 2013, Vol. 52, pp. 37-46.
- Chocron Benloulo, I.S., Rodriguez, J., Sanchez Galvez, V.: A simple analytical model for ballistic impact in composites, *Journal de Physique IV Colloque*, C3, 1997, pp. 821-826.
- Cooper, P.W.: *Explosives engineering*, Wiley, New York, 1996.
- Corbett G.G., Reid S.R., Johnson W.: Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 1996, Vol. 18, No. 2, pp. 41-230.
- Cullis, I.G.: Blast waves and how they interact with structures, *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 2001, Vol. 147, pp. 16-26.

- Curran, D.R.: Simple fragment size and shape distribution formulae for explosively fragmenting munition, *International Journal of Impact Engineering*, 1997, Vol. 20, pp. 197-208.
- Diep Q.B., Moxnes J.F., Nevstad G.: Fragmentation of projectiles and steel rings using numerical 3D simulations, *21st International Symposium of Ballistics*, 2004, Adelaide, Australia.
- Dowling, N.E.: *Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*, Prentice Hall, New York, 1998.
- Elek, P.: *Prilog proučavanju probijanja metalnih prepreka kinetičkim penetratorom*, magistraska teza, Mašinski fakultet u Beogradu, 2002.
- Elek, P.: *Modeliranje dinamičke fragmentacije u problemima balistike na cilju*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Beogradu, 2008.
- Elek, P., Jaramaz, S., Micković, D.: Modeling of perforation of plates and multi-layered metallic targets, *International Journal of Solids and Structures*, 2005, Vol. 42, No. 3-4, pp. 1209-1224.
- Elek, P., Jaramaz, S.: Modeling of fragmentation of rapidly expanding cylinders, *Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, Vol. 32, No. 2, pp. 113-130.
- Elek, P., Jaramaz, S.: Size distribution of fragments generated by detonation of fragmenting warheads, *23rd International Symposium on Ballistics*, Tarragona, Spain, April 2007, pp. 153-160.
- Elek, P., Jaramaz, S.: Fragment size distribution in dynamic fragmentation: Geometric probability approach, *FME Transactions*, 2008, Vol. 36, No. 2, pp. 59-65.
- Elek, P., Jaramaz, S.: Fragment mass distribution of naturally fragmenting warheads, *FME Transactions*, 2009, Vol. 37, No. 3, pp. 129-135.
- Elek, P., Jaramaz, S., Micković, D.: Modeling of expansion dynamics of explosively driven metal cylinders, *27th International Symposium on Ballistics*, Freiburg, Germany, April 22-26, 2013, pp. 783-794.
- Elek, P., Džingalašević, V., Jaramaz, S., Micković, D.: Determination of detonation products equation of state from cylinder test: Analytical model and numerical analysis, *Thermal Science*, 2015, Vol. 19, No. 1, pp. 35-48.
- Elek, P., Jaramaz, S., Micković, D., Miloradović, N.: Experimental and numerical investigation of perforation of thin steel plates by deformable steel penetrators, *Thin-Walled Structures*, 2016, Vol. 102, pp. 58-67.
- Forrestal, M.J., Altman, B.S., Cargile, J.D., Hanchak, S.J.: An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets, *International Journal of Impact Engineering*, 1994, Vol. 15, No. 4, pp. 395-405.
- Forrestal, M.J., Luk, V.K., Rosenberg, Z., Brar, N.S.: Penetration of 7075-T651 aluminum targets with ogival-nose rods, *International Journal of Solids and Structures*, 1992, Vol. 29, No. 14, pp. 1729 – 1736.

- Forrestal, M.J., Luk, V.K.: Penetration into soil targets, *International Journal of Impact Engineering*, 1992, Vol. 12, No. 3, pp. 427-444.
- Gold, V.M., Baker, E.L.: A model for fracture of explosively driven metal shells, *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, Vol. 75, No. 2, pp. 275-289.
- Goldsmith, W.: *Impact: The theory of physical behavior of colliding solids*, Dover publications, 2001.
- Grady, D.: *Fragmentation of rings and shells: The legacy of N.F. Mott*, Springer, 2006.
- Grady, D.E., Benson, D.A.: Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading, *Experimental Mechanics*, 1983, Vol. 23, pp. 393-400.
- Grady, D.E., Kipp, M.E.: Geometric statistics and dynamic fragmentation, *Journal of Applied Physics*, 1985, Vol. 58, No. 3, pp. 1210-1222.
- Grady, D.E., Kipp, M.E.: Mechanisms of dynamic fragmentation: Factors governing fragment size, *Mechanics of Materials*, 1985, Vol. 4, pp. 311-320.
- Grady, D.E., Olsen, M.L.: A statistics and energy based theory of dynamic fragmentation, *International Journal of Impact Engineering*, 2003, Vol. 29, pp. 293-306.
- Grady, D.E.: Local inertial effects in dynamic fragmentation, *Journal of Applied Physics*, 1982, Vol. 53, No. 1, pp. 322-325.
- Gryaznov, E.F., et al.: Acceleration of fragments from cylindrical shells by detonation products of HE charges, *23rd International Symposium of Ballistics*, Tarragona, Spain, 2007.
- Gurney, R.W.: The initial velocities of fragments from bombs, shells and grenades, *US Army Ballistic Research Lab, BRL report 405*, 1943.
- Held, M.: Fragment Mass Distribution of HE Projectiles. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1990, Vol. 15, pp. 254-260.
- Hetherington, J., Smith, P.: *Blast and ballistic loading of structures*, CRC Press, 1994.
- Hoggatt, C.R., Recht, R.F.: Fracture behavior of tubular bombs, *Journal of Applied Physics*, 1968, Vol. 39, pp. 1856-1862.
- Hutchinson, M.D.: Replacing the Equations of Fano and Fisher for Cased Charge Blast Equivalence – I Ductile Casings, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2011, Vol. 36, No. 4, pp. 310-313.
- Jaramaz, S: *Physics of explosion*, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 1997.
- Jaramaz, S: *Warhead design and terminal ballistics*, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2015.
- Jonas G.H., Zukas J.A.: Mechanics of penetration: Analysis and experiment, *International Journal of Engineering Science*, 1978, Vol. 16, No. 11, pp. 879-903.

- Jovanović, R.: *Ocena pravilnosti fragmentacije projektila parčadnog dejstva primenom statističkih testova*, magistrski rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 2002.
- Karlos, V., Solomos, G.: *Calculations of blast loads for applications to structural components*, European Commission, Joint Research Centre Technical Report, 2013.
- Kennedy, J.E.: The Gurney model for explosive output for driving metal. In: *Explosive Effects and Applications*, Ed. J.A. Zukas and W.P. Walters, Springer, 2003.
- Kinney, G.F., Graham, K.J.: *Explosives shocks in air*, Springer, 2013.
- Kipp, M.E., Grady, D.E.: Dynamic fracture growth and interaction in one dimension, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1985, Vol. 33, No. 4, pp. 399-415.
- Kokinakis, W., Sperrazza, J.: *Criteria for incapacitating soldiers with fragments and flachettes*, Ballistic Research Laboratory Report No. 1269, Aberdeen Proving Ground, MD, 1965.
- La Spina, A., Paolicchi, P.: Catastrophic fragmentation as a stochastic process: sizes and shapes of fragments, *Planetary and Space Science*, 1996, Vol. 44, No. 12, pp. 1563-1578.
- Lanz, W., Odermatt, W.: Minimum impact energy of KE-penetrators in RHA targets, *European Forum on Ballistics and Projectiles*, St. Louis, France, 2000.
- Lienau, C.C.: Random fracture of a brittle solid, *Journal of Franklin Institute*, 1936, Vol. 221, pp. 458-494.
- Lloyd R.M.: *Physics of direct hit and near miss warhead technology*, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 194, 2001.
- Meyers, M.A.: *Dynamic behavior of materials*, Wiley Interscience, New York, 1994.
- Micković, D., Jaramaz, S., Elek, P., Jaramaz, D., Micković, D.: A model for shaped charge warhead design, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 2012, Vol. 58, No. 6, pp. 404-411.
- Mott, N.F.: A theory of the fragmentation of shells and bombs, British Ministry of Supply, AC 40351943, 1943.
- Mott, N.F.: Fragmentation of shell cases, *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A (Mathematical and Physical Sciences), 1947, Vol. 189, pp. 300-308.
- Neades, D.N., Prather, R.N.: *The modeling and application of small arms wound ballistics*, Ballistic Research Laboratory Report BRL-MR-3929, Aberdeen Proving Ground, MD, 1991.
- Neilson A.J.: Empirical equations for the perforation of mild steel plates, *International Journal of Impact Engineering*, 1985, Vol. 3, No. 2, pp. 137-142.

- Nixdorff K.: Discussion of two theories on the penetration of multilayer metallic targets, *Transactions of CSME*, 1987, Vol. 11, No. 3, pp. 161-178.
- Recht R.F.: Taylor ballistic impact modelling applied to deformation and mass loss determination, *International Journal of Engineering Science*, 1978, Vol. 16, pp. 809-827.
- Rosenberg, Z, Dekel, E.: *Terminal ballistics*, Springer, 2012.
- Rusinek, A., Zaera, R.: Finite element simulation of steel ring fragmentation under radial expansion, *International Journal of Impact Engineering*, 2007, Vol. 34, No. 4, pp. 799-822.
- Schäfer, F.K.: An engineering fragmentation model for the impact of spherical projectiles on thin metallic plates, *International Journal of Impact Engineering*, 2006, Vol. 33, pp. 745-762.
- Stamatović, A.: *Fizika eksplozije*, Ivexy, Beograd, 1996.
- Stamatović, A.: *Konstruisanje projektila*, Ivexy, Beograd, 1995.
- Stefanopoulos, P.K., Filippakis, K., Soupiou, O.T., Pazarakiotis, V.C.: Wound ballistics of firearm-related injuries - Part 1: Missile characteristics and mechanisms of soft tissue wounding, *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2014, Vol. 43, pp. 1445-1458.
- Stromsoe, E., Ingebrigtsen, K.O.: A modification of the Mott formula for prediction of the fragment size distribution, *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, 1987, Vol. 12, pp. 175-178.
- Taylor, G.I.: *Scientific papers of sir Geoffrey Ingram Taylor*, edited by G.K. Batchelor, Vol 3: *Aerodynamics and the Mechanics of Projectiles and Explosions*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1963.
- Vukašinović, M.: *Prilog teoriji i praksi eksperimentalnog ispitivanja parčadnog dejstva razornih projektila*, doktorska disertacija, Vojnotehnička akademija VJ, Beograd, 2000.
- Zukas J.A.: *Impact dynamics*, John Wiley and Sons, New York, 1982.
- Zukas, J.A.: *Introduction to hydrocodes*, Elsevier Science, Amsterdam, 2004.