



PROBIJANJE TANKIH METALNIH PLOČA

Predrag Elek¹, Slobodan Jaramaz¹, Dejan Micković¹

Izvod

U radu je razmatran problem probijanja tankih metalnih ploča cilindričnim penetratorom sa ravnim vrhom. Predstavljeni su najrelevantniji analitički modeli penetracije, analizirane su njihove osnovne karakteristike i realizovani računarski programi za svaki od modela. Izvršeno je poređenje proračunskih rezultata sa vrednostima dobijenim sopstvenim eksperimentom. Uočena je značajna saglasnost u pogledu osnovnih parametara penetracionog procesa i zaključeno je da model deformacionih talasa sa deformabilnim penetratorom najbolje predviđa ostvarene eksperimentalne rezultate.

Ključne reči: probijanje, formiranje odsečka, plastično deformisanje, analitički model, eksperimentalno istraživanje

Uvod

U ovom radu razmatraće se probijanje tankih metalnih ploča pomoću cilindričnih simulatora fragmenata. Cilindrični simulatori imaju ravno čelo i formiraju pri probijanju u slučaju normalnog udara kružni odsečak ploče približno jednak prečniku simulatora. Ovaj slučaj probijanja se javlja pri razmatranju dejstva razornih projektila na letilice, neorbena vozila, itd. Njegovo proučavanje značajno je sa stanovišta efikasnosti projektila, kao i ranjivosti i zaštite samog cilja.

Probijanje tankih metalnih ploča može se razmatrati pomoću empirijskih relacija, analitičkih modela i numeričkih metoda. Analitički modeli, koji su predmet istraživanja ovoga rada, omogućavaju mnogo pouzdanije proučavanje procesa izvan oblasti eksperimentalnih ispitivanja na bazi kojih su oformljeni u odnosu na razvijene empirijske relacije. U odnosu na numeričke metode, analitički modeli imaju manju opštost, ali omogućavaju efikasne parametarske studije, demonstrirajući jasno fizikalnost procesa i ukazujući na najvažnije aspekte. Takođe, oni generalno često omogućavaju rešenje problema u razumnom vremenu i po razumnoj ceni.

U radu su proučavani razni analitički modeli u svetlu njihove saglasnosti sa rezultatima dobijenim pri sopstvenim eksperimentalnim istraživanjima.

¹ Mašinski fakultet, 27. marta 80, 11000 Beograd

Analitički modeli penetracije

U sažetoj prezentaciji najznačajnijih analitičkih modela penetracije pretpostavlja se normalan udar krutog cilindričnog penetratora sa ravnim vrhom, mase m i prečnika $2R$, u homogenu, ravnu metalnu ploču debljine H i gustine ρ , pri udarnoj brzini v_0 .

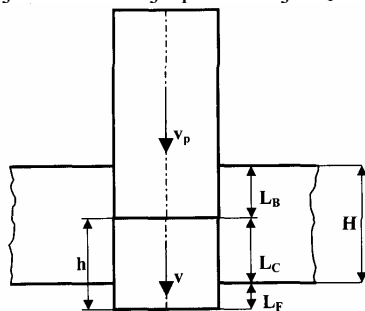
Energetsko-deformacioni model

Ovaj relativno jednostavan model penetracije [1] temelji se na primeni dva fundamentalna principa: (a) na zakonu o održanju energije sistema penetrator-prepreka, i (b) zakonu o prostiranju deformacija u materijalu prepreke. Razmatra se samo deformisanje i pomeranje cilindrične zone prepreke, koja se nalazi neposredno ispred penetratora (primarna zona), dok se preostali deo prepreke (sekundarna zona) smatra nepokretnim.

Odmah po udaru penetratora o prepreku počinje sabijanje primarne zone koje se vrši mehanizmom prostiranja kompresionog talasa. Primenom zakona o promeni količine kretanja deformisanog dela prepreke dobija se njegova brzina v u funkciji relativne deformacije ε

$$v = \frac{K\sigma_y}{\rho c_e} + \frac{2}{n+1} \sqrt{\frac{K\sigma_0 n}{\rho}} \left[\varepsilon^{\frac{n+1}{2}} - \left(\frac{K\sigma_y}{E} \right)^{\frac{n+1}{2}} \right] \quad (1).$$

Pri tome je σ_y – granica tečenja, E – modul elastičnosti, c_e – brzina elastičnih poremećaja u materijalu prepreke, $K > 1$ – faktor povećavanja plastičnog napona tečenja usled otežanog širenja odsečka zbog prisustva okolnog materijala. Parametri σ_0 i n su konstante u konstitutivnoj jednačini koja ima oblik $\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n$. Na slici 1 predstavljeni su parametri kretanja penetratora i odsečka. Pretpostavke o jednakubrzanom kretanju prednjeg, i o jednakosporenom kretanju zadnjeg dela odsečka, omogućavaju određivanje pomeranja L_F i L_B i vremena t .



Slika 1. Osnovni parametri kretanja sistema (energetsko-deformacioni model)

Brzina penetratora v_p može se odrediti na osnovu zakona o održanju energije u obliku

$$\frac{1}{2} m v_0^2 - \frac{1}{2} m v_p^2 = \sum_i W_i = W_C + W_K + W_S + W_F \quad (2),$$

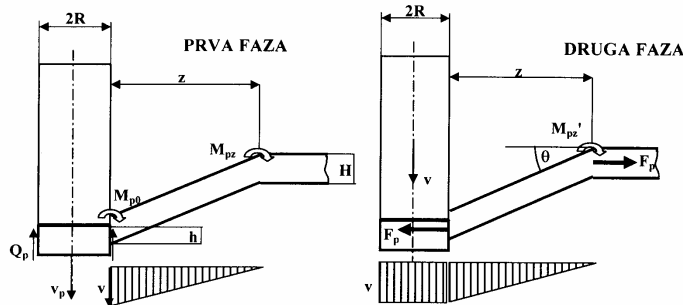
gde su W_i radovi penetratora pri savladavanju sila sabijanja, inercije, smicanja i trenja, koji se određuju na elementaran način.

Prethodna analiza karakteristična je za prvu, osnovnu fazu procesa penetracije. Ona može biti završena na dva načina: (a) probojem - čime se okončava i ceo proces - ako se ispuni uslov $L_B=H$, ili (b) realizacijom uslova $v_p=v$ pre uslova (a) čime proces prelazi u drugu fazu.

Analiza druge faze penetracije sasvim je jednostavna, budući da se penetrator i odsečak ponašaju kao jedno telo čije se kretanje lako određuje na osnovu zakona o održanju energije (2) pri čemu se izostavlja rad sabijanja odsečka.

Strukturni model

Strukturni model [2] uzima u obzir kako naprezanja i deformacije koje dovode do formiranja odsečka, tako i otpor šire strukture prepreke. Proces se može posmatrati kroz dve faze (slika 2). U prvoj, penetrator i deo materijala prepreke koji formira odsečak kreću se zajedničkom brzinom v_p , pri čemu dolazi do smicanja odsečka, uz smanjivanje kontaktne dužine h . Sila smicanja izaziva savijanje dela materijala prepreke oblika kružnog prstena čiji spoljni prečnik sve vreme raste. Kada rastuća brzina ovog dela prepreke v dostigne vrednost brzine penetratora v_p , prestaje smicanje i započinje druga faza procesa u kojoj, osim i dalje prisutnog savijanja, dominira istežanje sekundarne zone prepreke.



Slika 2. Šematski prikaz karakterističnih faza za strukturni model penetracije

Na osnovu zakona o promeni količine kretanja i momenta količine kretanja, brzina penetratora (sa odsečkom) v_p , brzina v deformisanog dela prepreke, kao i njegova dimenzija z u prvoj fazi, određuju se rešavanjem sistema jednačina

$$mv_0 - (m + \frac{1}{2} m_0 R^2) v_p = \int_0^t Q_p dt, \quad \frac{1}{2} m_0 v z (R + \frac{1}{3} z) = \int_0^t Q_p dt \quad (3)$$

$$\frac{1}{3} m_0 v z^2 (R + \frac{1}{4} z) = - \int_0^t (M_{p0} + M_{pz}) dt + \int_0^t Q_p z dt$$

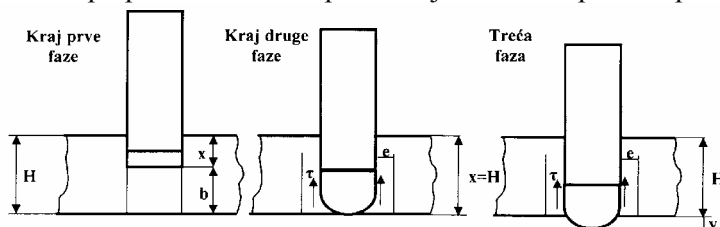
pri čemu su opterećenja (sila smicanja i momenti savijanja) definisana izrazima

$$Q_p = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sigma_y R h, \quad M_{p0} = \frac{\pi}{2} \sigma_y R h^2, \quad M_{pz} = \frac{\pi}{2} \sigma_y (R + z) H^2 \quad (4).$$

U drugoj fazi penetracije primenjuju se isti zakoni, uz modifikaciju vrednosti momenta savijanja i uvođenje sile istezanja. Do proboja prepreke dolazi kada normalna relativna deformacija usled istezanja dostigne kritičnu vrednost. Ceo proces može se okončati na jedan od tri načina: (a) probijanjem prepreke u prvoj fazi plastičnim smicanjem odsečka duž cele debljine prepreke, (b) probijanjem prepreke u drugoj fazi kidanjem odsečka usled istezanja, ili (c) zaustavljanjem penetratora zbog nedovoljne početne brzine, bilo u prvoj, bilo u drugoj fazi.

Trofazni model

Penetracioni model čija je karakteristika da, u slučaju proboja, proces uvek prolazi kroz tri različite faze, zasnovan je na primeni zakona kretanja tela promenljive mase [3,4]. Da bi se model primenio naophodno je poznavanje tri parametra samog procesa, koji se određuju eksperimentalno; to su: (a) ulazni i izlazni (odnosno srednji) prečnik otvora D u prepreci, (b) dužina odsečka b , i (c) širina zone smicanja e koja predstavlja radijalnu dimenziju deformisanog dela sekundarne zone prepreke. Na slici 3 predstavljene su faze procesa penetracije.



Slika 3. Šematski prikaz etapa penetracionog procesa prema trofaznom modelu

Osnovni mehanizam penetracije je postepeno prisajedinjavanje materijala prepreke penetratoru čija je početna masa m_0 . Koordinatu x , koja definiše dubinu prodiranja, određuje položaj prednjeg dela novopridodate mase odsečka, koji sa penetratorom čini tzv. efektivnu masu. Jednačina kretanja efektivne mase glasi

$$\frac{d}{dt}(mv) = -(F_i + F_c + F_s) \quad (5).$$

U prvoj fazi (utiskivanje odsečka) sila smicanja F_s je jednaka nuli, dok je inercijalna sila određena sa $F_i = k\rho Av^2/2$, gde je k - koeficijent koji zavisi od oblika prednjeg dela penetratora. Sila otpora sabijanju određuje se izrazom $F_c = \sigma_c A$, gde je σ_c - najveći normalni napon pri sabijanju. Transformacijom leve i desne strane jednačine (5) i njenim rešavanjem dobija se brzina penetratora v

$$v = \left[\left(\frac{m_0}{m_0 + \rho Ax} \right)^{2+k} \left(v_0^2 + \sigma_c / \rho \left(1 + \frac{k}{2} \right) \right) - \sigma_c / \rho \left(1 + \frac{k}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6).$$

Prva faza se završava realizacijom uslova $x=H-b$, što dovodi do započinjanja smicanja i promene zakona kretanja.

U fazi formiranja odsečka zakon kretanja efektivne mase ima modifikovan oblik koji, uz uvođenje sile smicanja, $F_s = \pi D \tau (x-H+b)$, pri čemu je $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$,

$\dot{\gamma} = v/e$, dovodi do diferencijalne jednačine koja se može rešiti numerički. Pri tome je τ_0 je vrednost kvazistacionarnog napona smicanja, μ je koeficijent viskoznosti materijala prepreke, dok je γ ugao klizanja. Druga faza se završava kada se ostvari $x=H$, čime je odsečak formiran i započinje njegovo istiskivanje.

U trećoj fazi penetracije posmatra se telo nepromenljive mase $m=m_0+\rho Ah$, čijem se kretanju opire samo sila smicanja, pa se jednačina kretanja lako rešava. Treća faza se završava kada ugao klizanja γ dostigne kritičnu vrednost γ_f . Proces, naravno, može biti okončan i na drugi način - zaustavljanjem penetratora u prepri, $v=0$, u bilo kojoj fazi.

Model deformacionih talasa

Ovaj teorijski pristup [5,6] razmatra kretanje primarne i sekundarne zone prepreke i uvodi složenije mehanizme penetracije u odnosu na prethodno analizirane modele. U osnovi, radi se o višefaznom procesu u kom sabijanje i smicanje materijala prepreke imaju ključnu ulogu, a s obzirom na impulsnu prirodu opterećenja, smatra se da ova naprezanja imaju talasni karakter.

Naponi pri impulsnom opterećenju definisani su konstitutivnim jednačinama

$$\sigma = \frac{1}{1-\varepsilon} [\sigma_y - B \ln(1-\varepsilon)], \quad \tau = \tau_y + \frac{1}{3} B \gamma \quad (7)$$

gde je B – koeficijent ojačavanja materijala prepreke, dok je τ_y - kvazistatički smicajni napon tečenja. Stvarna vrednost normalnog napona usled ograničenog širenja određuje se na osnovu zavisnosti $\sigma_c = K\sigma$. Usled diskontinuiteta vrednosti brzine i deformacije u zoni sabijanja i nedeformisanoj zoni, prostiranje talasa sabijanja modelira se konceptom udarnog talasa. Tipičan izgled deformacionih zona, kao i geometrija sistema penetrator-prepreka predstavljeni su na slici 4. Primenom zakona o promeni količine kretanja i veze između pomeranja i deformacija, dobijaju se zavisnosti

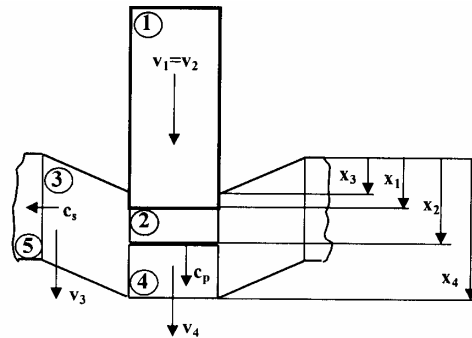
$$c_p = \frac{v_1 - v_4}{\varepsilon} + v_4, \quad \varepsilon(\sigma_c - \sigma_{yc}) = \rho(v_1 - v_4)^2 \quad (8)$$

koje omogućavaju određivanje nepoznate deformacije ε i napona σ , odnosno σ_c . U osnovnom faznom toku, prva faza traje od početnog kontakta do trenutka u kom zone 3 i 4 počinju da se kreću različitim brzinama. Jednačine kretanja u prvoj fazi imaju oblik

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= -\frac{\sigma_c A + \rho A(v_1 - v_4)^2 + 2\pi R \tau_q (x_2 - x_1)}{m + \rho A(x_2 - x_1)}, & v_1 &= v_2, \\ \dot{v}_4 &= \frac{\rho A(v_1 - v_4)^2 + 2\pi R \tau_q (x_2 - x_1) - 2\pi r H(\tau_y + \rho c_s v_3)}{\rho \pi r^2 H - \rho A(x_2 - x_1)}, & v_3 &= v_4 \end{aligned} \quad (9)$$

pri čemu je τ_q merodavni dinamički napon smicanja koji se određuje prema (7).

U drugoj fazi procesa ne pojavljuju se novi fizički procesi koji bi bitno promenili jednačine kretanja a ona se završava zaustavljanjem kompresionog udarnog talasa ($v_1=v_4$), čime penetrator i odsečak počinju da se kreću kao jedno telo.

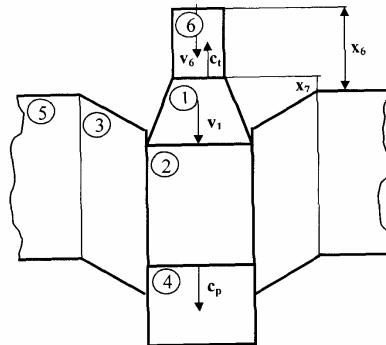


Slika 4. Geometrijska konfiguracija sistema prema modelu deformacionih talasa

U poslednjoj fazi penetracije pojavljuje se samo sila smicanja, pa se proces jednostavno modelira, uz pretpostavku o plastičnom lomu pri potpunom istiskivanju odsečka, tj. kada se zadovolji uslov $x_1 = x_3 + H$.

Napominje se da postoje složeniji "scenariji" procesa, koji se slično modeliraju i detaljno su razrađeni u programskom rešenju.

Prethodna analiza podrazumevala je nedeformabilan (krut) penetrator; međutim, model je moguće proširiti i na opšti slučaj *deformabilnog penetratora* (dp) [7].



Slika 5. Model deformacionih talasa sa deformabilnim penetratorom

Ako za materijal penetratora važi konstitutivna jednačina oblika (7), primenom zakona o promeni količine kretanja na delove penetratora i prepreke podvrgnute inicijalnoj deformaciji u trenutku kontakta, može se dobiti da stvarna, redukovana početna brzina penetracije ima vrednost

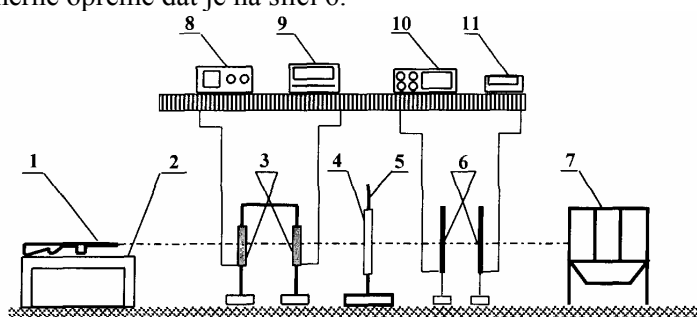
$$v' = \frac{v_0}{1 + \sqrt{q}}, \quad q = \frac{\rho(\sigma_y + B)}{\rho_p(\sigma_{yp} + B_p)} \quad (10),$$

gde je q parametar zavisian od svojstava materijala prepreke i penetratora (indeks p). Tipična konfiguracija zona pri probijanju deformabilnim penetratorom predstavljena je na slici 5. Jednačine kretanja, uslovi završetka faza i fazni tok procesa penetracije određuju se analogno modelu sa krutim penetratorom.

Svaki od prezentovanih modela predstavlja dobro analitičko rešenje određene klase problema probijanja tankih metalnih ploča. Računarski programi, koji su realizovani za svaki model, daju očekivano dobru reprodukciju literaturnih rezultata. Za izvlačenje potpunijih zaključaka svakako je od interesa i komparacija sa novim, autentičnim eksperimentalnim rezultatima.

Poređenje eksperimentalnih i proračunskih rezultata

Eksperimentalno ispitivanje probojnosti izvršeno je u balističkom tunelu Instituta za vojno mašinstvo [8]. Šematski prikaz postavke eksperimentalnih uređaja i merne opreme dat je na slici 6.



- 1 - Automatska puška ARMALITE
AR-18, 5.56 x 45 mm
- 2 - Univerzalno postolje
- 3 - Optičke barijere
- 4 - Ploča
- 5 - Noseći ram

- 6 - Kontaktni paneli
- 7 - Kutija za hvatanje penetratora
- 8 - Brojač
- 9 - Pojačavač
- 10 - Univerzalni brojač
- 11 - Posredna jedinica

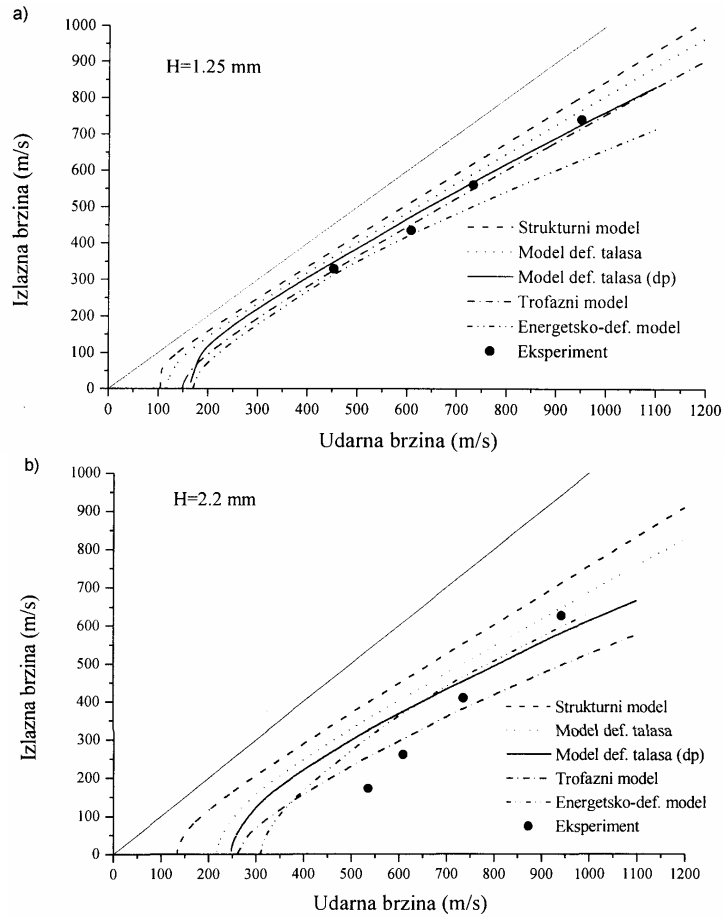
Slika 6. Prikaz postavke eksperimentalnih uređaja i specifikacija merne opreme

Pri različitim udarnim brzinama (400-950 m/s), standardnim čeličnim penetratorom vršeno je probijanje čeličnih ploča manje i veće debljine (1.25 mm i 2.2 mm). Osnovne osobine penetratora i ploče predstavljene su u Tabeli 1.

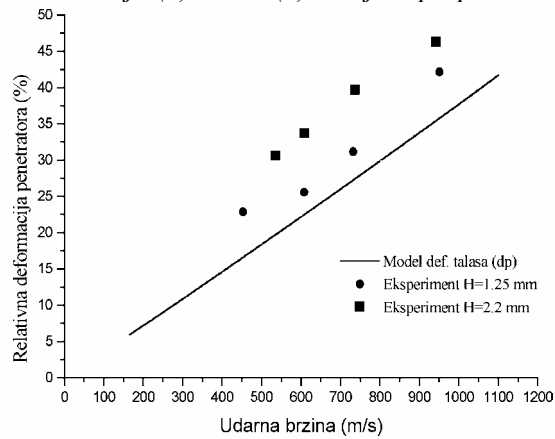
Tabela 1. Osnovne karakteristike penetratora i ploče korišćenih u eksperimentu

PENETRATOR		PLOČA	
Materijal	Č.1731	Materijal	Č.0143
Tvrdoća (HB)	243	Tvrdoća (HB)	80
Masa (g)	1.411	Norm. napon tečenja (MPa)	320
Maksimalni prečnik (mm)	5.71	Poprečne dimenzije (mm)	400 x 400

Mereni parametri procesa relevantni za upoređivanje sa proračunskim rezultatima su: izlazna brzina (brzina penetratora posle probijanja ploče) koja se meri pomoću kontaktnih panela i relativna deformacija prečnika penetratora usled sabijanja. Na slikama 7 i 8 uporedno su date eksperimentalno utvrđene vrednosti navedenih parametara i rezultati dobijeni računarskom simulacijom baziranom na različitim analitičkim modelima. Eksperimentalni rezultati su u stvari osrednjene vrednosti većeg broja merenja izvedenih pod "istim" uslovima.



Slika 7. Promena izlazne brzine penetratora u zavisnosti od udarne brzine za manju (a) i veću (b) debljinu prepreke



Slika 8. Relativna deformacija prečnika penetratora u funkciji udarne brzine

Na slici 7 prikazana je promena izlazne brzine penetratora u funkciji njegove udarne brzine. Ova zavisnost, sa stanovišta praktične primene i ocene efikasnosti (probojnosti), predstavlja osnovni i najmerodavniji pokazatelj upotrebljivosti analitičkog modela. U slučaju prepreke manje debljine (1.25 mm) uočava se da praktično svi analitički modeli daju prihvatljive procene izlazne brzine (slika 7a). Eksperimentalni rezultati omeđeni su proračunskim vrednostima strukturnog (gornja granica) i energetsko-deformacionog modela (donja granica), dok preostala tri modela daju veoma mala odstupanja u odnosu na merene izlazne brzine. Imajući u vidu činjenicu da trofazni model koristi određene eksperimentalno utvrđene parametre, može se smatrati da model deformacionih talasa sa deformabilnim penetratorom predstavlja najkorisniji analitički prediktivni alat, što je i očekivano s obzirom na njegovu kompleksnost. Situacija je, međutim, bitno drugačija u slučaju prepreke veće debljine (2.2 mm) - praktično nijedan model ne daje zadovoljavajuće rezultate (slika 7b). Razloge za relativno velika odstupanja proračunskih vrednosti, naročito u oblasti malih izlaznih brzina (odnosno balističkog limita), treba pre svega tražiti u činjenici da prepreke veće debljine pripadaju gornjoj graničnoj zoni kategorije tankih prepreka i prelaze u oblast prepreka srednje debljine, za koje važe drugačiji modeli penetracije. Razmotreni analitički modeli, dakle, daju odlične procene vrednosti izlazne brzine, ali samo do izvesne gornje granice debljine prepreke.

Relativno povećanje prečnika penetratora u zavisnosti od udarne brzine predstavljeno je na slici 8. Jedini model koji ne podrazumeva krut penetrator je model deformacionih talasa sa deformabilnim penetratorom. Kvalitativno, sa povećanjem udarne brzine relativna deformacija raste, pri čemu su proračunske vrednosti niže od eksperimentalnih. Osim toga, model daje istu vrednost relativne deformacije bez obzira na debljinu prepreke. Očigledno je bi modifikacija modela u smislu povećanja sile otpora prepreke (u slučaju deblje prepreke) dovela do smanjenja razlike između eksperimentalnih i proračunskih rezultata, kako u pogledu relativne deformacije, tako i izlazne brzine.

Na osnovu iznesenog jasno je da poređenje sa eksperimentalnim podacima favorizuje model deformacionih talasa sa deformabilnim penetratorom kao najrelevantnije analitičko rešenje problema probijanja tankih metalnih ploča.

Zaključak

Prethodna razmatranja upućuju na sledeće zaključke:

- Modeliranje procesa probijanja tankih metalnih ploča od velikog je praktičnog značaja, kako sa stanovišta optimalne konstrukcije projektila, tako i sa aspekta pancirne zaštite.
- Analitički modeli ukazuju na suštinski važne mehanizme i pojave pri penetraciji, a kompjuterski programi za simulaciju probijanja, zasnovani na

najrelevantnijim analitičkim pristupima, obezbeđuju proračun ključnih parametara procesa.

- Poređenje eksperimentalnih i proračunskih rezultata daje zadovoljavajući nivo korelacije i upućuje na model deformacionih talasa sa deformabilnim penetratorom kao nejefikasniji.
- Dobijeni rezultati omogućavaju sagledavanje prednosti i nedostataka svakog od modela, njihovo modifikovanje i kombinovanje, kao i kreiranje poboljšanog analitičkog modela.

Literatura:

[1] Woodward, R.L., de Morton, M.E.: Penetration of targets by flat-ended projectiles, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, 1976, pp. 119-127

[2] Woodward, R.L.: A structural model for thin plate perforation by normal impact of blunt projectiles, *Int. J. Impact Engng*, Vol. 6, No. 2, 1987, pp.129-140

[3] Awerbuch, J., Bodner, S.R.: Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 10, 1974, pp. 671-684

[4] Awerbuch, J., Bodner, S.R.: Experimental investigation of normal perforation of projectiles in metallic plates, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 10, 1974, pp. 685-699

[5] Liss, J., Goldsmith, W., Kelly, J.M.: A phenomenological penetration model of plates, *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 1, No. 4, 1983, pp. 321-341

[6] Jenq, S.T., Goldsmith, W.: Effect of target bending in normal impact of a flat-ended cylindrical projectile near the ballistic limit, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 24, No. 12, 1988, pp. 1243-1266

[7] Liss, J., Goldsmith, W.: Plate perforation phenomena due to normal impact by blunt cylinders, *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 2, No. 1, 1984, pp. 37-64

[8] Jaramaz, S., Micković, D.: Istraživanje probojnosti metalnih ploča korišćenjem simulatora fragmenata razornih bojevih glava, TR-171/2000, Institut za vojno mašinstvo, Beograd, 2000.

Abstract

This paper considers penetration of thin metallic plates by blunt cylindrical penetrators. The most relevant analytical penetration models are presented, their basic characteristic are analyzed and computer programs for each model are developed. Computation results are compared to our own experimental data. Significant correspondance of basic parameters of penetration process is noted. It is concluded that deformation waves model with deformable penetrator gives the best prediction of experimental results.

Keywords: penetration, plug formation, plastic deformation, analytical model, experimental investigation