

Penetracija projektila velikom brzinom u oklop velike debljine

Dr Vlado N. Radić, dipl.inž.¹⁾

Razmatrana je deformacija ciljeva (meta) velike debljine pri udaru projektila velikim brzinama. Za proračun dubine penetracije projektila korišten je dobro poznati model Tejt - Aleksejevskog. Pretpostavljeno je da je deformacija projektila rezultat formiranja otvora u cilju. Za ostvarenje maksimalne penetracije zadnji deo projektila mora da prođe kroz otvor formiran prednjim delom projektila. To definiše minimalnu brzinu udara kao funkciju gustine materijala meta i projektila i odgovarajuće čvrstoće.

Ključne reči: Projektili, udar velikim brzinama, mete velike debljine, deformacija.

Uvod

BALISTIČKA penetracija je izuzetno kompleksan mehanički proces koji se istražuje više od 200 godina. Danas su poznata tri različita pravca tih istraživanja: izvođenje empirijskih formula (koje se zasnivaju na opsežnim eksperimentima), razvoj relativno "jednostavnih" modela procesa penetracije i primena relevantnih jednačina kretanja i ponašanja materijala i numerička rešenja. Zbog potrebe za računarskim resursima i troškovima izvršenja velikog broja parametarskih istraživanja, postoji značajan interes za prelazna rešenja ili približna inženjerska modeliranja.

U poslednjih nekoliko godina publikovan je veliki broj radova iz oblasti balističke penetracije. Neki od njih sadrže detaljne opise i daju određene preporuke za različite inženjerske modele i numeričke tehnike. Aktivnosti na razvoju novih modela procesa penetracije sada su vrlo izražene: brojna istraživanja su u završnim fazama i rezultati iz njih se neprekidno pojavljuju u literaturi. Ta fluidna situacija čini teškim za predstavljanje definitivnih procena trenutnog stanja predmeta istraživanja.

Numerička simulacija balističke penetracije/perforacije

Hidrokodovi su veliki računarski programi koji se mogu koristiti za numeričku simulaciju dinamičkih pojava, posebno onih koje uključuju sudare, aproksimacijom kontinuuma u nekoj tački (*konačne razlike*) ili elementu (*konačni elementi*) i rešavanjem jednačina očuvanja (konzervacije) povezanih sa opisom materijala. Intenzivna poboljšanja hidrokodova odvijaju se kao rezultat potrebe istraživača da poboljšaju mogućnost prognoziranja (predikcije). Ta poboljšanja predstavljaju kombinaciju numeričkih tehnika i sadrže fizičke modele. U poslednjih 20-25 godina, učinjeni su veliki naponi na dobijanju modela i algoritama za simulaciju stvarne reakcije materijala pri visokobrzinskom opterećenju. Za proračun otpornosti na hidrostatičko sabijanje (kompresiju), povećanje unutrašnje energije

izazvano termodinamički nepovratnim procesima (na primer, udarno opterećenje, plastični rad) i fazne promene (iz čvrstog u čvrsto stanje, topljenje, isparavanje) potrebne su jednačine stanja EOS (equation of state), a za proračun efekata čvrstoće zahteva se konstitutivni model. Na primer, von Mises-ov kriterijum koristi se za proračun početka plastičnog tečenja. Deformaciono ojačavanje, efekti brzine deformacije, termičko omekšavanje itd., mogu se proračunati za promenljive napone tečenja. Potrebni podaci za proveru koeficijenata konstitutivnih modela često nisu poznati za velike brzine deformacija karakterističnih za pojave penetracije, tako da se za numeričke simulacije koriste elastoplastični konstitutivni modeli. Za probleme balističkog sudara, koji uključuju duktilne materijale, elastični efekti su nevažni i viskoplastični materijal može da bude pogodan za karakterizaciju.

Iako se hidrodinamički računarski kodovi koriste za simulaciju udarnih problema od 1958. god., u otvorenoj literaturi objavljeno je malo podataka o tome. Većina analiziranih problema su arhivirani u zvaničnim izveštajima ili su prezentirani na specijalizovanim konferencijama.

Osnovni model: ploča male debljine, kruti projektili

Rani modeli procesa balističke penetracije koncentrisani su na jednostavne mehanizme deformacije i krute projekte. Budući da ti modeli pretpostavljaju da nema napona ili gradijenta deformacije kroz debljinu cilja, mogu se primeniti posebno na ploče ciljeva relativno male debljine (u poređenju sa prečnikom projektila). Od poznatih modela izdvajaju se modeli Betea i Tejlora, kojima se proračunava rad izvršen u toku penetracije duktilne ploče. Još značajnije, tim modelima proračunava se rad izvršen pri probijanju otvora do njegovog konačnog radijusa; razlika između ta dva modela uglavnom je u raspodeli napona oko otvora. Brojni istraživači [1-4] imali su isti generalni pristup i detaljno su ispitivali izvršeni rad i kinetičku energiju, zajedno sa procesom penetracije za moguće

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

različite konfiguracije deformacije.

Za ploče male debljine, prednji deo projektila, domen brzina sudara i elastičnost materijala cilja su važni činioci penetracije. Zbog razlika u geometriji, generalno, zahtevano je izvršenje nekih eksperimenata kako bi se odredio primenljiv način penetracije u konkretnoj situaciji. Jednostavan mehanizam analitičkih modela povezan je sa odgovarajućim greškama, ali može da se iskoristi za proračun opadanja brzine tokom penetracije, koja je obično osnovni parametar. Za odgovarajuće mehanizme penetracije ti modeli mogu da pruže prihvatljive pretpostavke (prognoze) opadanja brzine u slučajevima krutih projektila i ploča relativno male debljine.

Ploče srednje debljine, kruti projektili

Za ploče srednje debljine, tj. ploče čija je debljina nekoliko puta veća od prečnika projektila, postoji više fizičkih mehanizama koji deluju u toku procesa penetracije. U tim slučajevima, obično se primećuje izbacivanje cilindrične ili konusne mase materijala cilja (*plugging*) u kasnijem stadijumu procesa. Ako je poznata masa čepa M_{tb} , tada se rezidualna brzina V_r može odrediti iz analize ravnoteže energije i momenta:

$$V_r = \left(\frac{M}{M + M_{tb}} \right) (V_0^2 - V_L^2)^{1/2} \quad (1)$$

gde su: M - masa projektila, V_0 - početna brzina sudara.

Ova formula je vrlo korisna ali zavisi, pored ostalog, od poznavanja mase izbačenog materijala cilja (*pluga*), balističkog limita V_L , koji je definisan kao minimalna brzina sudara potrebna za penetraciju ili kao maksimalna brzina sudara pri kojoj je rezidualna brzina jednaka nuli. Alternativne definicije za brzinu V_L vode i do različitih rezultata u realnim eksperimentima (koji, takođe, zahtevaju druge statističke definicije), ali one smanjuju istu vrednost u analitičkim izrazima. Principijelno, i masa *pluga* i balistički limit mogu da se odrede eksperimentalnim putem, ali cilj balističkog modeliranja je da se dobiju izrazi koji su samodovoljni (ako je moguće), sa minimumom izvora u empirijskim vrednostima.

Drugi korak je generisanje modela za ploče srednje debljine, koji je dobijen u jednodimenzionalnom trostepenom modelu Averbah - Bodnera. Taj model razmatra tri međusobno nevezana stadijuma sa početnim stanjem koje se karakteriše silama kompresije (F_c) i inercijalnim silama (F_i), kojima se u drugom stadijumu pridodaju sile smicanja (F_s) i treći stadijum izbacivanje *pluga* (sl.1).

Jednačina kretanja procesa penetracije je:

$$\frac{d}{dt}(mv) = -(F_i + F_c + F_s) \quad (2)$$

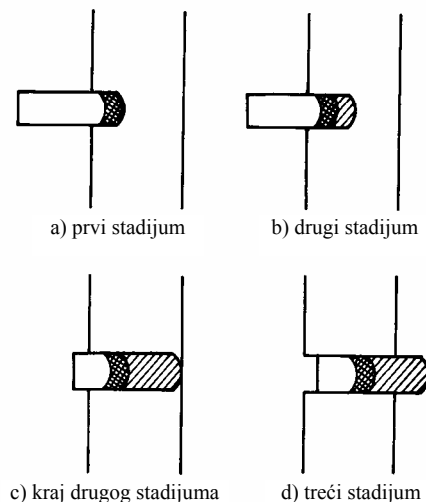
Pretpostavljajući da se u jednodimenzionalnom kontekstu plastična zona materijala cilja na vrhu projektila kreće istom brzinom kao i projektil, jednačina kretanja tada postaje:

$$\rho_t A v^2 + (m_0 + \rho_t A z) v \frac{dv}{dz} = -(F_i + F_c + F_s) \quad (3)$$

gde su: m_0 - masa projektila, ρ_t - gustina materijala cilja, z - rastojanje od površine udara do fronta kretanja materijala cilja, A - poprečni presek penetratora.

Od sile kompresije F_c zahteva se da prevede materijal cilja u neelastično stanje; inercijalna sila (F_i) zahteva da se delu materijala cilja, koji nije pobuđen, preda brzina projek-

tila; sila smicanja (F_s) pruža otpor relativnom kretanju materijala projektila i cilja. Sve tri sile prisutne su u stadijumu 3. Sile kompresije smanjuju se do nule u stadijumu 2, a u stadijumu 3 prisutna je samo sila smicanja. Sila F_c proporcionalna je zateznoj čvrstoći materijala cilja, a sila F_i proporcionalna je kvadratu brzine v . Ako se čvrstoća na smicanje uzme kao konstanta, proizlazi da je i sila smicanja konstantna. Međutim, ako su bitni efekti brzine deformacije, tada je sila smicanja, takođe, proporcionalna brzini v .



Slika 1. Model Averbah-Bodnera

Modeliranje sudara velikim brzinama

Fenomeni sudara velikim brzinama mnogostruko su analizirani i poznata su savremena istraživanja tog fenomena. Osim ostalih modela (Averbah, Bodner, Bekman, Goldsmit), model Tejt-Aleksejevskog pretpostavlja dubinu penetracije sa prihvatljivom tačnošću, ali ne razmatra radijus kratera. U ciljevima koji su dovoljno "meki" projektil ostaje krut tokom penetracije, ali je normalno da bude "istrošen" na delu koji udara u cilj. Kasnije je veći deo materijala projektila pronađen kao prevlaka generisanog otvora posle penetracije i radijus otvora je suštinski veći od prečnika projektila.

U modelu Tejt - Aleksejevskog kontinuirano skraćivanje projektila se usporava istovremeno kao i krutog tela. Odgovarajući rad je manji nego energija udara projektila. Znači, najveći deo energije udara predaje se deformisanom materijalu cilja. Pretpostavlja se da se projektil ponaša kao čvrsto (kruto) telo u svakom trenutku, izuzev u maloj oblasti na prednjem delu koja se kreće kao tečnost.

Veće brzine sudara, npr. veće od 1 km/s, teže da generišu hidrodinamičke efekte koji uključuju eroziju projektila i materijala cilja. Jednodimenzionalni model Tejt - Aleksejevskog postao je standardni model u analizi visokobrzinskih režima. Jednačine tog modela imaju oblik modifikovanih jednačina Bernulija:

$$\frac{1}{2} \rho_t u^2 + T = \frac{1}{2} \rho_p (v - u)^2 + Y \quad (4)$$

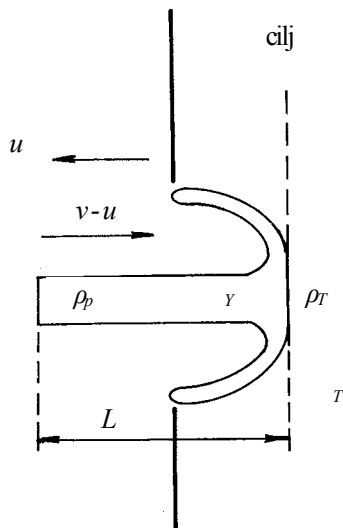
gde su: T - zatezna čvrstoća materijala cilja, Y - zatezna čvrstoća projektila, ρ_t i ρ_p su gustine materijala cilja i projektila, v - brzina zadnjeg dela projektila, u - brzina penetracije.

Na sl.2 prikazana je hidrodinamička penetracija. U stvari, sile deluju na projektil kako bi smanjile njegovu čvrstoću Y , pa jednačina kretanja postaje:

$$\rho_p l \frac{dy}{dt} = -Y \quad (5)$$

gde je: l - trenutna dužina projektila.

Dužina penetratora se menja ako su brzine v i u različite.



Slika 2. Hidrodinamička penetracija

Dvodimenzionalno modeliranje balističke perforacije

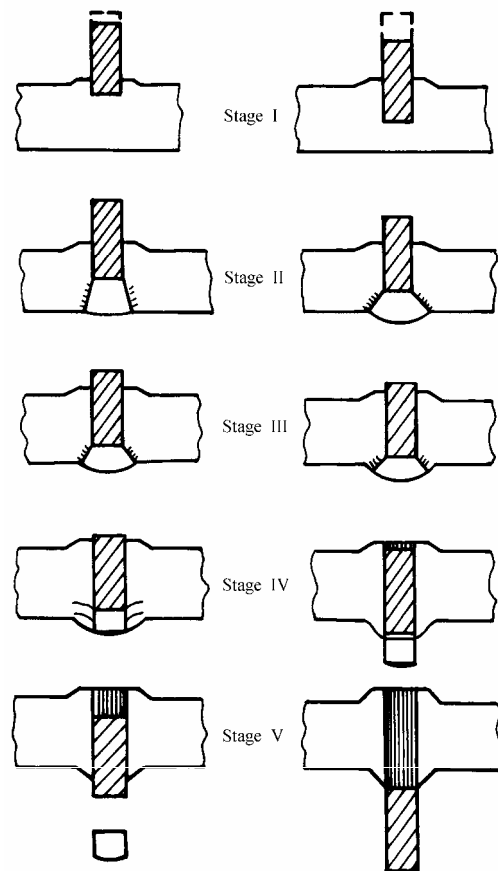
O dvodimenzionalnom balističkom modelu za ploče srednje debljine koje su pogođene čvrstim projektilom sa ravnim prednjim delom pisali su autori Ravid i Bodner u [6,7]. U tom modelu, inercijalne sile pobuđenog materijala cilja su isto toliko značajne koliko i način uzastopne deformacije ploče cilja konačne debljine. Varijaciona teorema za dinamičke plastične deformacije se koristi za određivanje veličine longitudinalne i radijalne plastične zone u početnom stadijumu. U celini, u analizama se koristi 5 sekvenci deformacije koje uključuju ispučenje materijala cilja na zadnjoj površini i izbijanje kao finalni stadijum (sl.3). Ukupne strukturne deformacije i deformisanost projektila u tim analizama nisu tretirane.

Motivacija za razmatranje dvodimenzionalnog stanja sa njegovim dopunskim računarskim komplikacijama bila je razvoj modela sa minimalnim fizičkim neodređenostima i empirijskim činionicima koji je sposoban za dalju karakterizaciju. U dvodimenzionalnim analizama, položaj i kretanje materijala cilja su potpuno određeni tokom celog perioda penetracije i empirijske informacije nisu potrebne. Zbog toga nisu potrebne ni pretpostavke o formiranju zone plastične deformacije i brzine u jednodimenzionalnoj analizi.

Računarsko modeliranje i ponašanje materijala

Najranije numeričke simulacije sudara i penetracije odnosile su se na visokobrzinski sudar i te rane formulacije nisu uključivale efekte čvrstoće, tako da su metali tretirani kao fluid bez viskoznosti, a izrazi "hidrodinamički računarski kodovi" korišćeni su za upućivanje na te računarske programe. Džonson i Anderson su dali kratak istorijat evolucije i razvoja hidrokodova u odnosu na probleme sudara u kojima su posebno diskutovani modeli oštećenja i duboke penetracije. Najviše korišćeni modeli za prognozu

oštećenja materijala u hidro-simulacijama zahtevali su neke kritične vrednosti napona, deformacija, plastičnog rada i ostale trenutne kriterijume.



Slika 3. Model Ravid-Bodnera: I- dinamička plastična penetracija, II- formiranje ispučenja, III- povećavanje ispučenja, IV- formiranje pluga i izlaza, V- prolazak projektila

Da bi se mogli opisati različiti fenomeni koji se odvijaju tokom balističke penetracije, potrebno je da se izvrši karakterizacija ponašanje materijala u uslovima udarnog opterećenja koje generiše velike brzine deformacije. Karakterizacija uključuje ne samo reakcije napon-deformacija pri velikim deformacijama, različitim brzinama deformacije i temperaturama, već i akumulaciju oštećenja i način oštećenja. Tako kompleksno ponašanje materijala uključuje i prskotine, koje je teško opisati analitičkim modelima. U numeričkim simulacijama, konstitutivni modeli bilo kojeg stepena kompleksnosti mogu da se inkorporiraju u kod. Međutim, iako su prisutne mnoge poteškoće u dobijanju konstanti za dinamičko ponašanje materijala, inženjerski modeli su u prednosti za sofisticiranije modele.

Prvi razmatrani test problem je penetracija cilja (mete) od aluminijuma penetratorom od volframa; drugi problem je penetracija čelične mete penetratorom od bakra a treći problem uključuje eksplozijom oblikovane projekte. Rezultati tih problema su u dobroj korelaciji sa eksperimentima.

Proračun penetracije ploče od aluminijuma penetratorom od volframa

Prvi test problem je proračun penetracije polubeskonačnog bloka od aluminijuma penetratorom od volframa (prečnik $d=10$ mm, dužina $l=100$ mm i brzina $v=3,4$ km/s). Dobijene eksperimentalne podatke publikovali su Holer i

Stilp u [8,9], a računarske simulacije izvršavali su Kulis i Neš [10].

Jednačina stanja za volfram i aluminijum ima kvadratni oblik :

$$P = [A_1 \mu + A_2 \mu |\mu| + (B_0 + B_1 \mu + B_2 \mu^2) \varepsilon + (C_0 + C_1 \mu) \varepsilon^2] / (\varepsilon + D_0) \quad (6)$$

Parametri za volfram su: $A_1 = 21,67419$; $A_2 = 14,93338$; $B_0 = 10,195827$; $B_1 = 12,263234$; $B_2 = 9,3051515$; $C_0 = 0,33388437$; $C_1 = 0,48248861$; $D_0 = 7,0$; $\rho_0 = 19,17$.

Parametri za aluminijum su: $A_1 = 1,1867466$; $A_2 = 0,762995$; $B_0 = 3,4447654$; $B_1 = 1,5450573$; $B_2 = 0,96429632$; $C_0 = 0,43381656$; $C_1 = 0,54873462$; $D_0 = 1,5$; i $\rho_0 = 2,806$.

Konstitutivne relacije za modul smicanja (G) i napon tečenja (Y) su:

$$G = G_0 \left\{ -1 + b \frac{P}{\eta^{1/3}} + h \left[\frac{E - E_0(x)}{3R'} \right] \right\} \exp \left[- \frac{fE}{F_m(x) - E} \right] \quad (7)$$

$$Y = Y_0 (1 + \beta e)^n \left\{ 1 + qb \frac{P}{\eta^{1/3}} + h \left[\frac{E - E_0(x)}{3R'} - 300 \right] \right\} \exp \left[- \frac{gE}{Em(x) - E} \right] \quad (8)$$

$$Y_0 (1 + \beta e)^n \leq Y_{\max} \quad (9)$$

$$Em(x) = E_0(x) + 3R'Tm(x) \quad (10)$$

$$Tm(x) = \frac{Tm_0 \exp(2ax)}{(1-x)^\alpha} \quad (11)$$

$$\alpha = 2(\gamma_0 - a - \frac{1}{3}) \quad (12)$$

$$E_0(x) = \int_0^x P(x) dx - 3R'TAD \quad (13)$$

i

$$TAD = \frac{300 \exp(ax)}{(1-x)^{(\gamma_0 - a)}} \quad (14)$$

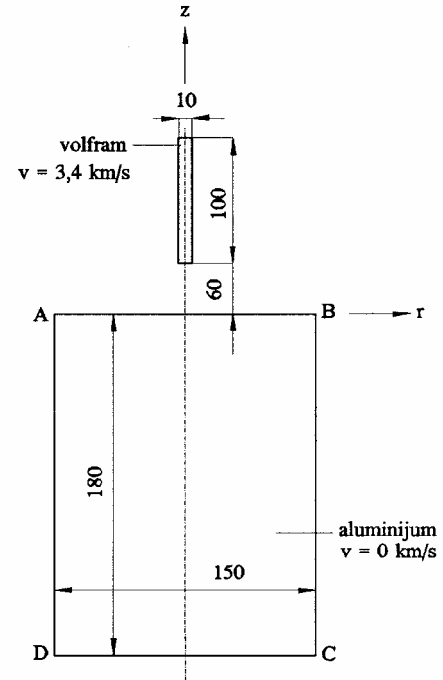
Parametri za volfram su : $G_0 = 1,6$; $Y_0 = 0,022$; $\beta = 7,7$; $n = 0,13$; $Y_{\max} = 0,04$; $b = 1,375$; $h = -0,0001375$; $q = 1,0$; $f = 0,001$; $g = 0,001$; $R' = 0,000008671$; $Tm_0 = 4520$; $\gamma_0 - a = 0,27$; i $a = 1,4$.

Parametri za aluminijum su : $G_0 = 0,276$; $Y_0 = 0,0029$; $\beta = 125,0$; $n = 0,1$; $Y_{\max} = 0,0068$; $b = 7,971$; $h = -0,0067159$; $q = 1,0$; $f = 0,001$; $g = 0,001$; $R' = 0,000008326$; $Tm_0 = 1220,0$; $\gamma_0 - a = 0,49$; i $a = 1,7$.

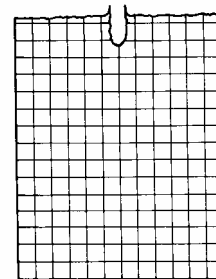
Na sl.4 je prikazana početna geometrija sa penetratorom od volframa i cilja od aluminijuma, označen sa ABCD, ima dimenzije 150 mm x 180 mm (r x z). Zbog osnosimetričnog problema, simulirana je samo poluravan.

Dimenzije kratera i dubina penetracije u vremenu $t=13 \mu s$; $26 \mu s$; $39 \mu s$ i $45 \mu s$ prikazani su na slikama 5, 6, 7 i 8. Maksimalna dubina penetracije dostiže 100 mm u vremenu $45 \mu s$, što je uporedivo sa eksperimentalnim podacima od

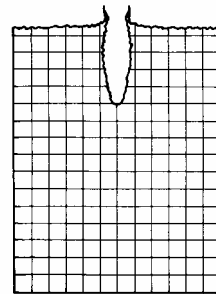
101 mm i proračunima u programskom paketu HULL (106 mm). Prečnik kratera je 14 mm, što je u dobroj saglasnosti sa proračunom u programskom paketu HULL (takođe, 14 mm), kao i eksperimentalnim rezultatima pri $80 \mu s$, dok ukupna unutrašnja energija dostiže maksimalnu vrednost $0,025 \text{ Mbar cm}^3/\text{cm}^3$.



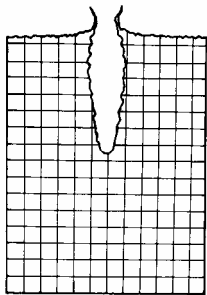
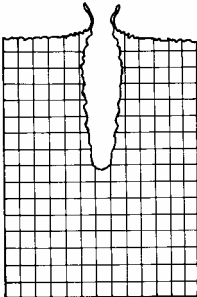
Slika 4. Početna geometrija sklopa sa penetratorom od volframa i cilja od aluminijuma



Slika 5. Veličina kratera i dubina penetracije: $t=13 \mu s$

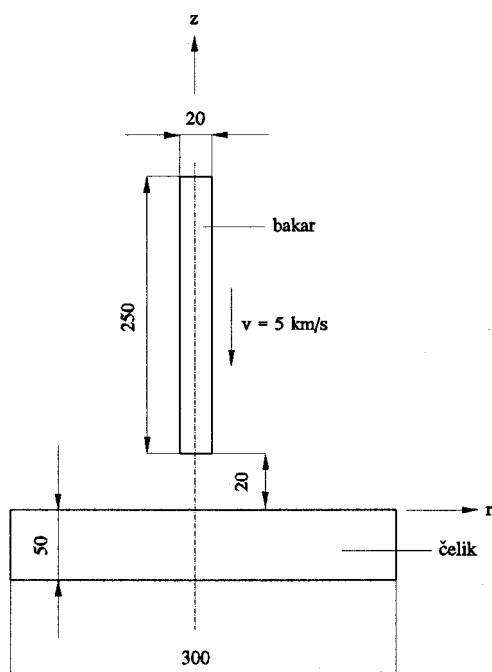


Slika 6. Veličina kratera i dubina penetracije: $t=26 \mu s$

Slika 7. Veličina kratera i dubina penetracije: $t=39 \mu s$ Slika 8. Veličina kratera i dubina penetracije: $t=45 \mu s$

Proračun penetracije čelične ploče penetratorom od bakra

Drugi problem je penetracija nepokretnog čeličnog diska debljine 50 mm i prečnika 300 mm penetratorom od bakra (prečnik $d = 20$ mm, dužina $l = 250$ mm i brzina $v = 5$ km/s). Početni uslovi i izgled modela prikazani su na sl.9. Jednačina stanja i konstitutivne relacije za modul smicanja i granica tečenja dati su izrazima (6-8).

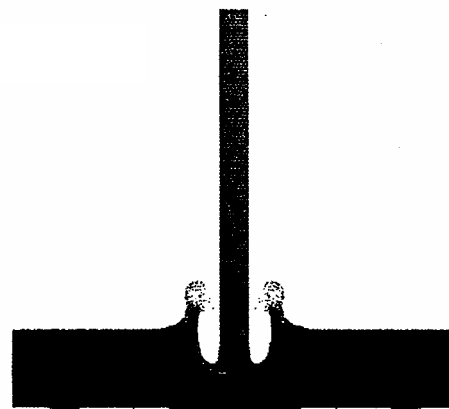


Slika 9. Početna geometrija sklopa sa penetratorom od bakra i čeličnom pločom

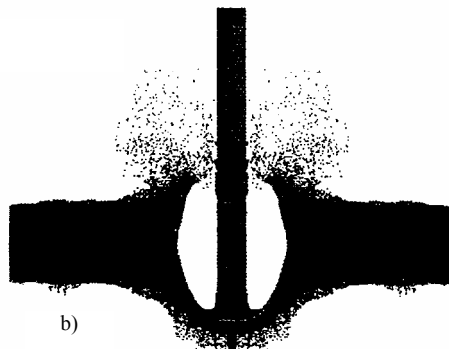
Za čelik, koeficijenti kvadratnog oblika jednačine su: $A_1 = 4,9578323$; $A_2 = 3,6883726$; $B_0 = 7,4727361$; $B_1 = 11,519148$; $B_2 = 5,5251138$; $C_0 = 0,39492613$; $C_1 = 0,52883412$; $D_0 = 3,6$; i $\rho_0 = 7,9$. Konstitutivni parametri za

čelik su: $G_0 = 0,477$; $Y_0 = 0,0012$; $\beta = 36$; $n = 0,45$; $Y_{\max} = 0,0064$; $b = 4,1446541$; $h = -0,000377358$; $q = 1,0$; $f = 0,001$; $g = 0,001$; $R = 0,00001164$; $Tm_0 = 1790$; $\gamma - a = 0,52$; i $a = 1,5$.

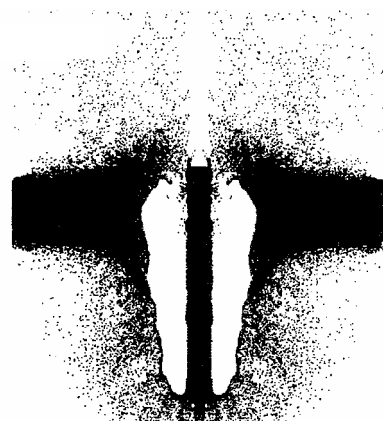
Na sl.10 su prikazani izgled projektila i mete (cilja) u vremenu $16 \mu s$ i $32 \mu s$. U vremenu od $16 \mu s$ grube (neravne) površine gornje i donje strane čelične ploče ukazuju da je odvajanje (eng. *spallation*) primećeno blizu površine ploče. Taj fenomen više je izražen u vremenu $32 \mu s$. Proračuni su zaustavljeni u vremenskom intervalu $56 \mu s$, kada je penetrator probio ploču (sl.11). Dužina penetratora od bakra posle probijanja i svih procesa kroz materijal mete (cilja) je samo $152,6$ mm, a deo koji je istrošen iznosi $117,4$ mm. Na prednjem delu penetratora vidljivi su tragovi talasa razređenja koji su uzrokovali odvajanje.



a)



b)

Slika 10. Izgled penetratora i mete pri a) $t=16 \mu s$, b) $t=32 \mu s$ Slika 11. Izgled penetratora i mete u trenutku proboja ($t=56 \mu s$)

Proračun problema preoblikovanja obloge

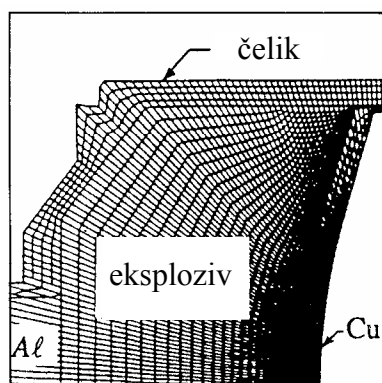
Treći problem je preoblikovanje obloge, čiji je sklop sastavljen od bakarne obloge, čeličnog kućišta i brizantnog eksploziva tipa oktol 75/25. Taj problem proračunat je korišćenjem programskog paketa DYNA i dvodimenzionalnog Lagranžeovog koda sa inicijacijom eksploziva po z - osi. Za jednačinu stanja korišćena je jednačina JWL (Jones-Wil-kins-Lee) za brizantne eksplozive i kvadratni oblik jednačine za aluminijum, čelik i bakar.

JWL jednačina stanja definiše pritisak kao :

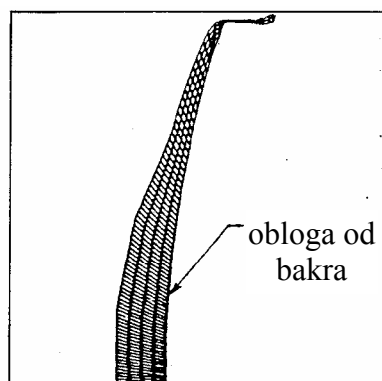
$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (15)$$

gde su: A , B - linearni koeficijenti, R_1 , R_2 - nelinearni koeficijenti, ω - nelinearni koeficijent, V - relativna zapremina, E - specifična unutrašnja energija po jedinici zapremine.

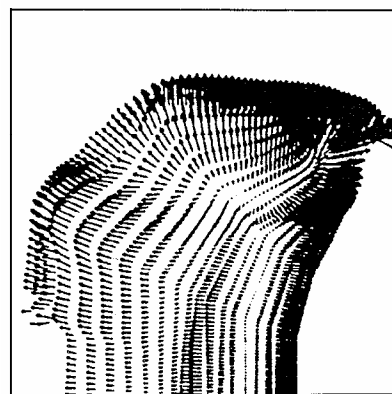
Na sl.12a je prikazana početna mreža za proračun u Lagranžeovom modu. Na sl.12b je prikazana mreža obloge od bakra u vremenu $12 \mu s$, a na sl.12c su vektori brzina za brizantni eksploziv u istom vremenskom intervalu. Na sl.12d su prikazani vektori brzina blizu gornjeg desnog ugla konfiguracije (mesto kontakta čelika, bakra i eksploziva). Na sl.13 su prikazani pojedinačni crteži preoblikovane obloge u intervalima (20, 40, 60, 80 i 100) μs . Za proračune ispitivano je i analizirano nekoliko modela za napon tečenja i modul smicanja materijala (uključujući i elastični - idealno plastični) i konstatovano je da konstitutivni modeli opisani jednačinama (7 i 8) daju najbolje rezultate.



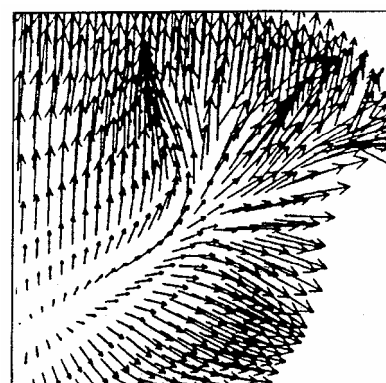
a)



b)

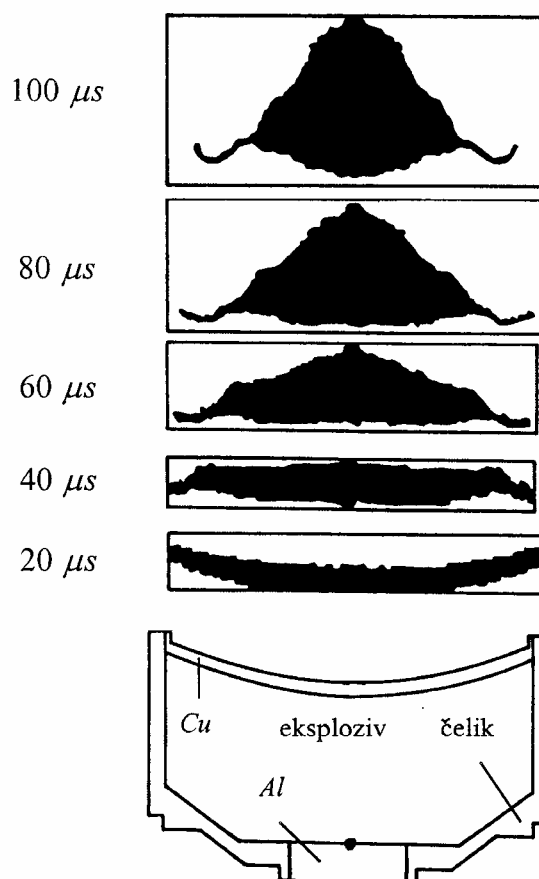


c)



d)

Slika 12. a) Lagranžeove mreže za aluminijum, čelik, eksploziv i oblogu od bakra, b) mreža za oblogu od bakra, c) vektori brzina za eksploziv, d) vektori brzina blizu gornjeg desnog ugla konfiguracije



Slika 13. Računarska simulacija preoblikovanja obloge od bakra u intervalima 20 μ s, 40 μ s, 60 μ s, 80 μ s i 100 μ s

Zaključak

U radu je prikazano poređenje rezultata dobijenih analitičkim modelima i njihova numerička simulacija početnog stanja sudara velikim brzinama. Uopšte, poređenje je veoma dobro. U analitičkom pristupu učinjene su određene aproksimacije kako bi se problem učinio mogućim za rešavanje. Numeričke simulacije odvijaju se sa karakterističnim problemima, zbog tendencije da se proračunska mreža interakcije projektil / meta prekine, tj. dovede do neregularnosti u proračunu. U numeričkim simulacijama, rad (do danas) ukazuje na *a priori* primarni mod oštećenja (defekata), kao što su odvajanje ili erozija. Trenutni naponi usmereni su na kombinovanje *plugginga* i erozije unutar istog proračunskog okvira.

Značajan aspekt balističkog modeliranja u poslednje vreme je analiza sistema oklopa. Keramike dobijaju značajnu ulogu u oklopnoj zaštiti, mada je njihova dinamička reakcija još nedovoljno poznata. Uopšte, sposobnost da se izvrše tačne prognoze inženjerskih i numeričkih modela zahteva obuhvatanje odgovarajućih dinamičkih reakcija materijala pri velikim brzinama deformacije, pojavu i prostiranje oštećenja (grešaka).

Literatura

- [1] BACKMAN,M.E., GOLDSMITH,W. The mechanics of penetration of projectiles into targets, *Int. J. Engng Sci.*, 1978, vol.16, p.1 – 99.
- [2] JONAS,G.H., ZUKAS,J.A. Mechanics of penetration: analysis and experiment, *Int. J. Engng Sci.*, 1978, vol.16, p.879 – 904.
- [3] ZUKAS,J.A., NICHOLAS,T., SWIFT,H.F., GRESZCZUK,L.B. CURRAN,D.R. *Impact Dynamics*. John Willey and Sons, New York, 1982.
- [4] WILKINS,M.L. Mechanics of penetration and perforation, *Int. J. Engng Sci.*, 1978, vol.16, p.793 – 807.
- [5] ANDERSON,C.E. An overview of the theory of hydrocodes, *Int. J. Impact Engng.*, 1987, vol.5, p.33-59.
- [6] RAVID,M., BODNER,S.,R. Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles. *Int. J. Eng. Sci.*, 1983, vol.21, p.557 – 591.
- [7] RAVID,M., BODNER,S.R.. Analysis of very high speed impact. *Int. J. Eng. Sci.*, 1987, vol.25, p.473 – 482.
- [8] HOHLER,V., STILP,A. *Influence of the length to diameter ratio in the range from 1 to 32 on the penetration performances of rod projectile*. Proceedings of 8th International Symposium on Ballistics, Orlando, Florida, USA, 1984.
- [9] HOHLER,V., STILP,A.J. *Penetration of steel and high density rods in semi-infinitive steel targets*. Proceedings of 3rd International Symposium on Ballistics, Karlsruhe, Germany, 1977.
- [10] CULLIS,I.G., NASH,M.A. *The importance of after flow in high mismatch penetration*. Proceedings of 9th International Symposium on Ballistics, Shrivenham, England, 1986.
- [11] GEHRING,J.W. *Theory of impact of thin targets and shields and correlation with experiment*. In High Velocity Impact Phenomena, p.105 - 156, Academic Press, New York, 1970.
- [12] DEHN,J.T. A unified theory of penetration. *Int. J. Impact Engng.*, 1987, vol.5, p.238 – 248.
- [13] LISS,J., GOLDSMITH,W., KELLY,J.M. A phenomenological penetration model of plates. *Int. J. Impact Engng.*, 1983, vol.1, p.321-341.
- [14] ALEKSEEVSKII,V.P. Penetration of a rod into target at high velocity. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Faraday Press, New York, 1966, vol.2, p.63-66.
- [15] TATE,A. A theory for the deceleration of long rods after impact. *J. Mech. Phys. Solids*, 1967, no.15, p.387-399.
- [16] TATE,A. Further results in the theory of long rod penetration. *J. Mech. Phys. Solids*, 1969, no.17, p.141-150.
- [17] DOBRATZ,B.M. *LLNL explosive handbook - properties of chemical explosive and explosive simulants*. UCRL-52997, 1981.
- [18] *...Hypervelocity impact*. Proceedings of the 1998 Symposium, Elsevier Science Ltd, 1999.

Rad primljen: 30.6.2000.god.