

## Modeliranje i simulacija preoblikovanja metalnog diska u 3D geometriji

Dr Vlado N. Radić, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Mr Vladimir Ž. Momirović, dipl.inž.<sup>2)</sup>

Analizirano je preoblikovanje konkavnog diska realne konfiguracije koji se ugrađuje u protivtenkovsku minu. Disk se u softverskom paketu DYNA3D modelira primenom trodimenzionalnih konačnih elemenata, a njegovo preoblikovanje se pod uticajem eksplozije i produkata detonacije prati kroz vremenske sekvence. U delu softverskog paketa (pretprocesor) INGRID formira se ulazna datoteka za procesor (DYNA3D), a rezultati proračuna interpretiraju se u programu TAURUS (postprocesor). Na osnovu proračuna analiziraju se deformacije, maksimalni pritisci, brzine i naponi u čitavom disku.

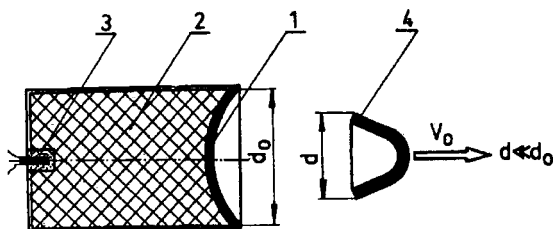
*Ključne reči:* disk, preoblikovanje, eksplozija, softverski paket, modeliranje, simulacija, jednačina stanja.

### Uvod

INTERAKCIJA metal – eksploziv često se analizira u cilju uspostavljanja određenih veza između parametara materijala i parametara eksploziva, a često se ta analiza izvodi i na realnim konstrukcijama (na primer u minskoeksplozivnim sredstvima). Primena računara tada ima smisla ako se raspolaže odgovarajućim setom podataka – o materijalu diska (cilindrična metalna ploča određenih dimenzija i mehaničkih svojstava), o eksplozivu i parametrima jednačine stanja.

U ovom radu učinjen je pokušaj da se na primeru realne konstrukcije mine, koja radi na principu Misznay-Shardinovog efekta, u 3D geometriji analizira deformacija diska u vremenskom intervalu za koji se pokazalo da verno odražava stanje kretanja i deformacije materijala diska. Do sada je analiza ponašanja diska u kontaktu sa eksplozivom prikazivana u 2D geometriji što je omogućavalo samo delimičnu sliku stvarnog ponašanja diska. Međutim, u 3D geometriji preoblikovanje diska je mnogo očiglednije, tako da se dobija stvarna slika diska koja se menja od trenutka inicijacije eksploziva do okončanja proračuna.

Misznay-Shardinov efekat karakteriše pojava odbacivanja i preoblikovanja diska koji se nalazi na jednoj strani cilindričnog eksplozivnog punjenja, a inicijacija se vrši sa druge strane (sl.1).



Slika 1. Šematski prikaz Misznay-Shardinovog efekta: 1-disk, 2-eksploziv, 3-detonator, 4-preoblikovani disk

Paralelno sa odbacivanjem diska relativno velikom brzinom (nekoliko km/s), dolazi i do preoblikovanja diska koje se odražava u izvesnom smanjenju prečnika i zakrivljenju diska. Stepenn preoblikovanja ravnog diska nije veliki i radijus zakrivljenosti diska približan je radijusu detonacionog talasa u trenutku sudara sa diskom. Ako se na čelo eksplozivnog punjenja postavi konkavni disk (kao na sl.1), pri detonaciji eksplozivnog punjenja dolazi do preoblikovanja diska sa većim stepenom deformacije u odnosu na ravan disk.

Misznay-Shardinov efekat smatra se graničnim slučajem kumulacije, jer ne dolazi do tečenja materijala obloge i formiranja kumulativnog mlaza, već do odbacivanja diska i preoblikovanja. Slično kumulativnom efektu, Misznay-Shardinov efekat je vrlo složena pojava koju je teško obuhvatiti jedinstvenim matematičkim modelom i na taj način opisati mehanizam preoblikovanja i pronaći parametre kretanja diska. U do sada poznatoj literaturi, ne postoji matematički opis ovog fenomena.

### Računarsko modeliranje i simulacija preoblikovanja diska

Za modeliranje diska i simulacija njegovog preoblikovanja, u određenom vremenskom intervalu, korišćen je poznati softverski paket DYNA3D. To je, u stvari, eksplicitni trodimenzionalni računarski kod sa konačnim elementima za nelinearnu dinamičku analizu čvrstih tela u 3D geometriji. Njegova prva verzija pojavila se 1979. godine, a inovirana je 1981. godine [1-3]. Softverski paket sadrži 15 modela materijala (npr. elastični, elastoplastični, termo-elasto-plastični, linearni

<sup>1)</sup> Savezno ministarstvo odbrane, UIRP NVO, 11000 Beograd, Birčaninova 5

<sup>2)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

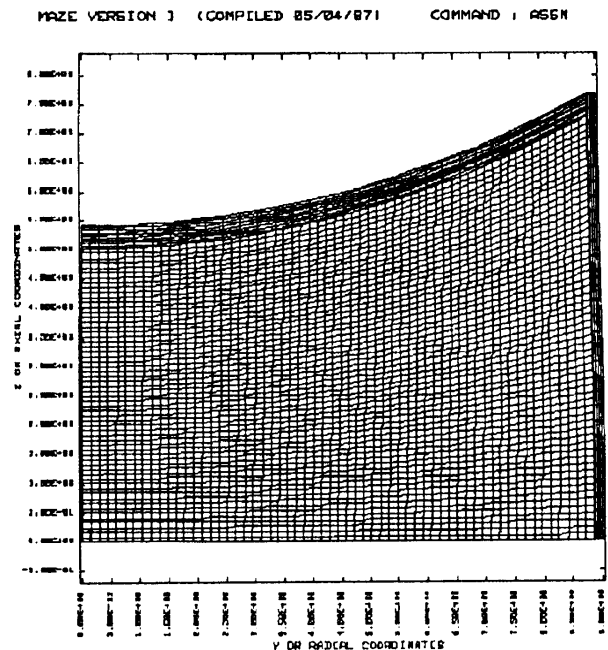
viskoelastični, izotropno-elastoplastični hidrodinamički itd.) i 9 jednačina stanja pomoću kojih je moguće izračunati parametre naprezanja i deformacije. U poznatoj laboratoriji LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) naučnici i istraživači su godinama koristili dvodimenzionalni program DYNA2D. Da bi se uverili u mogućnosti programa DYNA3D, ponovili su proračune iz programa DYNA2D u tri dimenzije.

U odnosu na metodologija modeliranja i zadavanja početnih uslova za proračun u 2D geometriji, modeliranje i simulacija u 3D geometriji su potpuno drugačiji. U ovoj geometriji nema konturnih linija nego se koriste „sektori”. Ulazna datoteka se učitava u preprocesor INGRID i tek tada se može videti da li je model adekvatno geometrijski definisan. Iz INGRID se pravi ulazna datoteka za procesor DYNA3D, u kome se vrši proračun prema zadatim parametrima. Kada se završi proračun, pravi se ulazna datoteka za postprocesor TAURUS, iz koga se dobijaju svi potrebni podaci (pritisci, brzine, deformacije, naponi, geometrijski izgled preoblikovanog diska itd.).

U analizi procesa preoblikovanja diska pod uticajem produkata detonacije eksploziva, te modeliranju i simulaciji za određeni vremenski interval, korišćena je metoda konačnih elemenata (MKE) sa 3D elementima, a za proračun maksimalnih pritisaka u interakciji metal – eksploziv, kao i brzine kretanja diska, korišćena je hidrodinamička teorija i JWL (Jones-Wilkins-Lee) jednačina stanja. JWL jednačina stanja izabrana je jer se analiziraju fenomeni detonacije i prostiranja udarnih talasa.

U proračunima za eksploziv su usvojene sledeće karakteristike [4,6]: brzina detonacije ( $D=7900$  m/s), parametar C-J ( $p_{CJ}=0,295$  Mbar), gustina ( $\rho_e=1,717$  g/cm<sup>3</sup>), prečnik ( $d_e=177$  mm), dužina ( $l_e=73$  mm). Disk je određen sledećim parametrima u proračunu: materijal – čelik, prečnik ( $d_d=180$  mm), debljina ( $l_d=4$  mm), gustina ( $\rho_d=7,83$  g/cm<sup>3</sup>), parametar ojačavanja (hardening parameter  $\beta=1$ ), modul elastičnosti ( $E=207$  GPa), tangenti modul ( $E_T=1,0$  GPa), napon tečenja ( $\sigma_{0,2}=0,2$  GPa), Poissonov koeficijent ( $\nu=0,29$ ).

Model koji se sastoji od eksploziva, diska i obloge prikazan je u 2D geometriji (sl.2). Ovakva konfiguracija modela zahtevana je programskim rešenjem (granični i konturni uslovi) u kome metal uvek mora da bude u kontaktu sa eksplozivom. U analizi i proračunima metalna obloga je zanemarljive debljine i nije posmatrana kao uticajan čimilac u prostiranju produkata detonacije i deformacije, i preoblikovanja diska.



Slika 2. Model interakcije metal – eksploziv u 2D geometriji

U softverskom paketu postoji 9 jednačina stanja, od kojih je za proračun maksimalnih i minimalnih pritisaka u modelu, brzina odbacivanja diska, napona i deformacija, odabrana poznata jednačina JWL. Ova jednačina stanja testirana je na modelu u 2D geometriji i pokazala se kao adekvatno rešenje. Drugo, za ovu jednačinu stanja dostupni su potrebni parametri, tako da je moguće izračunati sve veličine. Za ostale jednačine stanja, koje tretiraju slične fenomene, nisu dostupni svi parametri, pa ih nije moguće koristiti za proračun parametara kretanja i ponašanja diska.

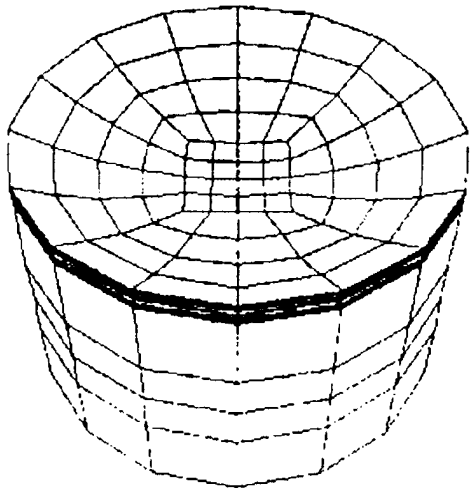
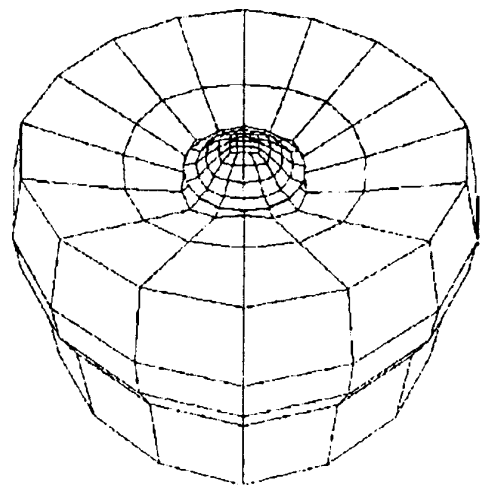
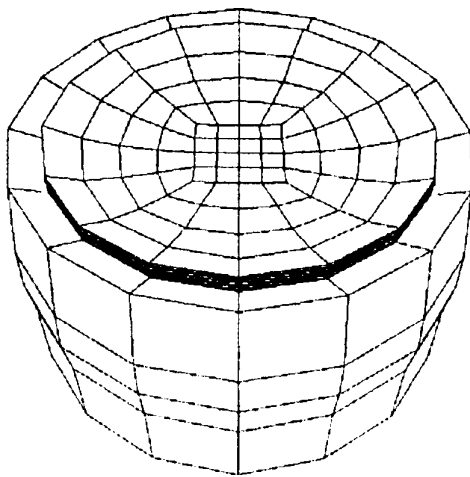
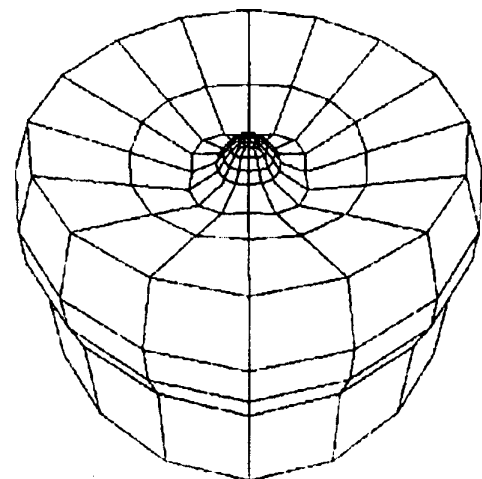
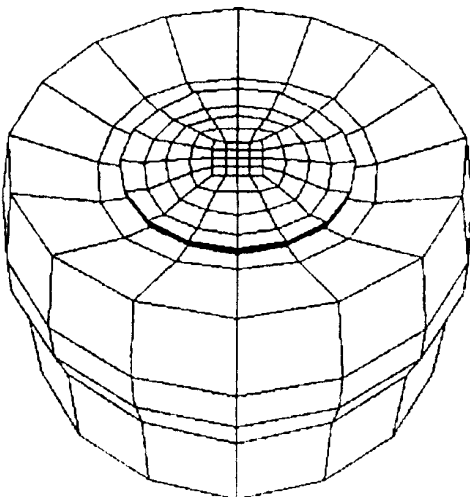
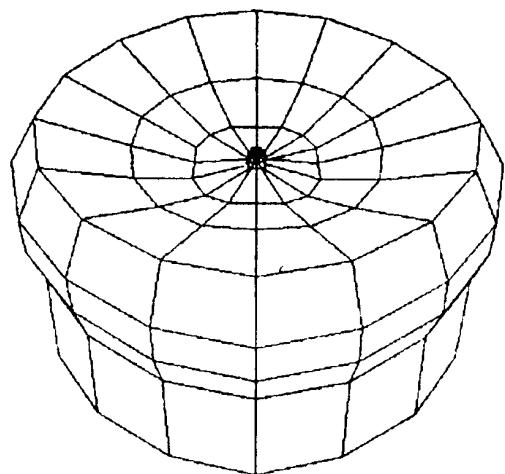
Jednačina stanja JWL definiše pritisak kao funkciju relativne zapremine ( $V$ ) i unutrašnje energije eksploziva ( $E$ ) u obliku:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

gde su:  $\omega$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $E_0$  – ulazni parametri zavisni od vrste materijala i eksploziva.

U proračun su unete sledeće vrednosti tih parametara:  $\omega=0,34$ ;  $A=5,24229$ ;  $B=0,076783$ ;  $R_1=4,2$ ;  $R_2=1,1$ ;  $E_0=0,085$  [4]. Proračun brzine diska, maksimalnog pritiska i preoblikovanja diska izvršen je u vremenskom intervalu od 0–200  $\mu$ s.

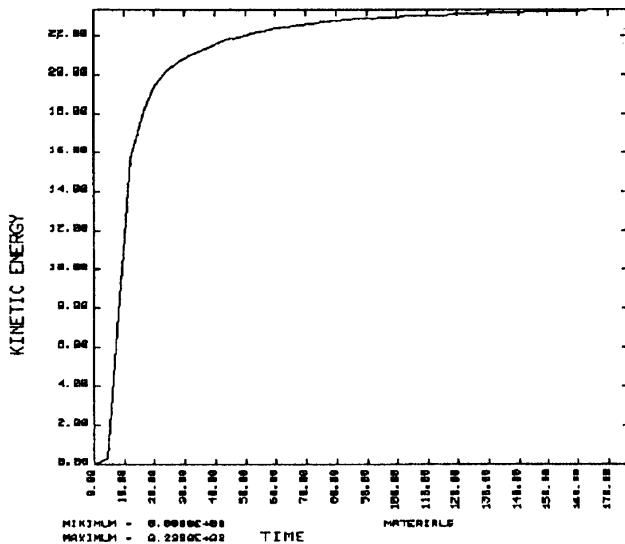
Na slikama 3–8 prikazane su neke od sekvenci preoblikovanja u kojima je oigledan stepen plastične deformacije početnog konkavnog oblika.

Slika 3.  $t=0 \mu s$ Slika 6.  $t=40 \mu s$ Slika 4.  $t=10 \mu s$ Slika 7.  $t=60 \mu s$ Slika 5.  $t=20 \mu s$ Slika 8.  $t=170 \mu s$ 

Na osnovu ovih sekvenci, može se konstatovati da je plastična deformacija materijala diska vrlo velika, što je potvrđeno i u eksperimentima [7]. Oblik koji poprima disk u eksperimentima i u računarom simuliranim stanjima je

istovetan. Time je dokazana validnost računarskih proračuna i određenih aproksimacija, kao i metodologije izbora modela materijala, jednačine stanja i vrste konačnih elemenata kojima je modelirana interakcija metal – eksploziv.

Znajući da je brzina odbacivanja diska velika (reda 2 km/s), može se zaključiti da je i kinetička energija koju disk prenosi na prepreku velika, što obezbeđuje sigurno probijanje (na primer, pancirne ploče debljine 20-40 mm). Na sl.9 prikazan je dijagram kinetičke energije u zadatom intervalu.



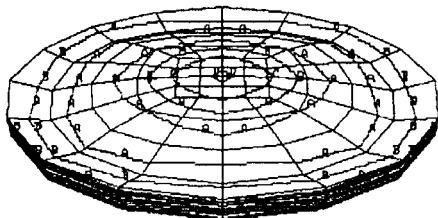
Slika 9. Distribucija kinetičke energije u intervalu 0-200  $\mu$ s

Za vremenski interval u kojem je izvršeno simulirano kretanje interakcije metal – eksploziv (0-200  $\mu$ s) dobija se određeni set podataka, od kojih su najinteresantniji: konture pritiska (*contours of pressure*) i mreža konačnih elemenata.

Na slikama 10-13 prikazane su konture maksimalnih pritisaka (Mbar) u konkretnoj sekvenci simulacije:

TIME = 0.20000E+02  
 CONTOURS OF PRESSURE  
 MIN = 0.257E-02 IN ELEMENT 1004  
 MAX = 0.169E-01 IN ELEMENT 945

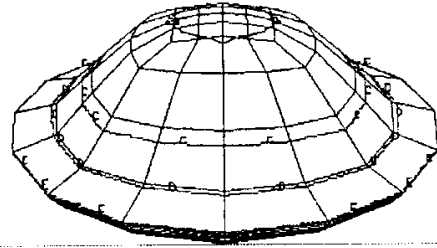
CONTOUR VALUES  
 A = 7.17E-04  
 B = 1.24E-03  
 C = 3.28E-03  
 D = 5.15E-03  
 E = 7.11E-03  
 F = 9.07E-03  
 G = 1.10E-02  
 H = 1.30E-02  
 I = 1.49E-02



Slika 10. Konture pritiska ( $t=20 \mu$ s)

TIME = 0.40000E+02  
 CONTOURS OF PRESSURE  
 MIN = 0.509E-02 IN ELEMENT 956  
 MAX = 0.346E-02 IN ELEMENT 857

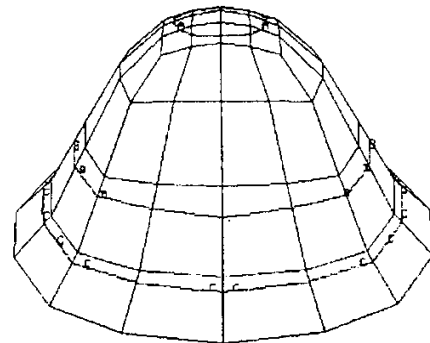
CONTOUR VALUES  
 A = 4.02E-03  
 B = 4.02E-03  
 C = 3.70E-03  
 D = 3.74E-03  
 E = 1.71E-04  
 F = 0.71E-04  
 G = 0.61E-04  
 H = 1.45E-03  
 I = 2.44E-03



Slika 11.  $t=40 \mu$ s

TIME = 0.60000E+02  
 CONTOURS OF PRESSURE  
 MIN = 0.719E-02 IN ELEMENT 935  
 MAX = 0.658E-02 IN ELEMENT 857

CONTOUR VALUES  
 A = 5.02E-03  
 B = 3.04E-03  
 C = 3.08E-03  
 D = 1.08E-03  
 E = 3.05E-04  
 F = 1.07E-03  
 G = 1.45E-03  
 H = 0.03E-03  
 I = 5.21E-03

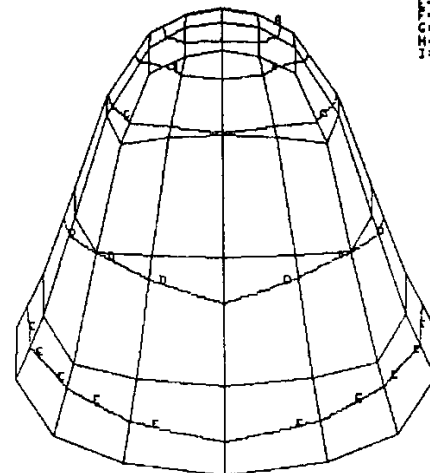


Slika 12.  $t=60 \mu$ s

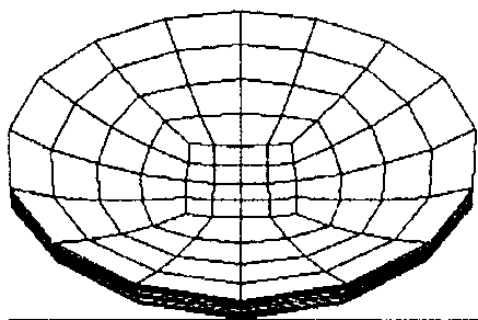
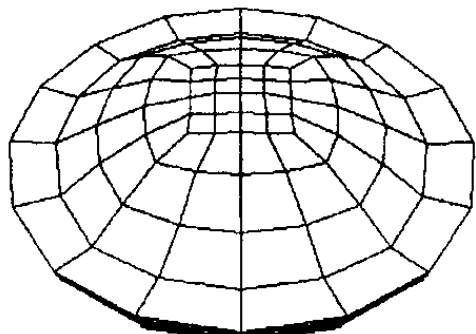
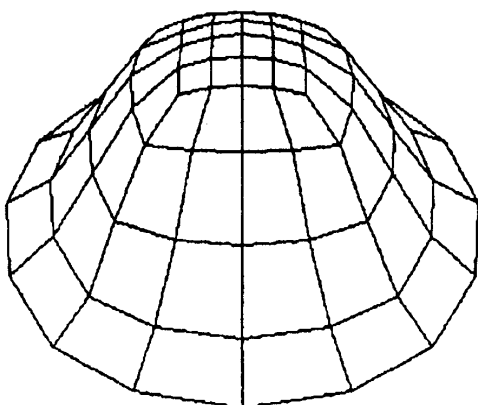
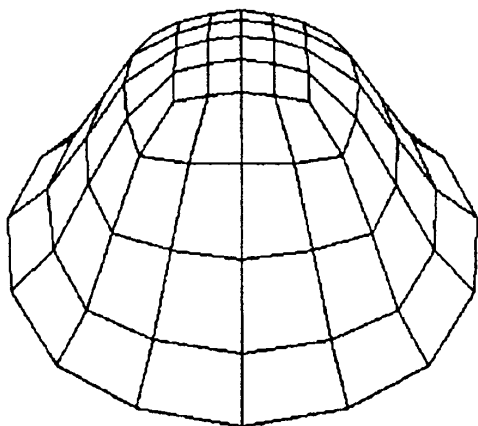
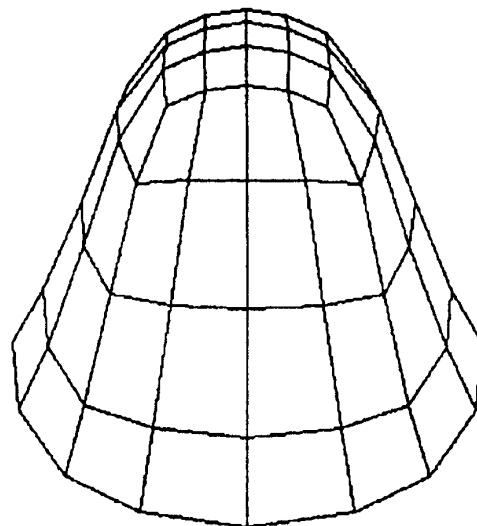
Transformacija početnog konkavnog oblika diska može da se prati kroz pojedine sekvence i tada se na najbolji način sagledava sveukupna deformacija jednostavnog oblika diska do svojevrsnog „projektila” – slike 14-18.

TIME = 0.80000E+02  
 CONTOURS OF PRESSURE  
 MIN = 0.724E-02 IN ELEMENT 652  
 MAX = 0.800E-02 IN ELEMENT 945

CONTOUR VALUES  
 A = 5.71E-03  
 B = 4.10E-03  
 C = 2.68E-03  
 D = 1.12E-03  
 E = 4.06E-04  
 F = 1.93E-03  
 G = 3.47E-03  
 H = 4.95E-03  
 I = 6.32E-03

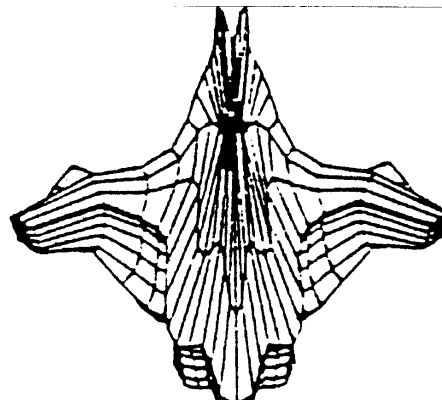


Slika 13.  $t=90 \mu$ s

Slika 14.  $t=0 \mu s$ Slika 15.  $t=20 \mu s$ Slika 16.  $t=40 \mu s$ Slika 17.  $t=60 \mu s$ Slika 18.  $t=120 \mu s$ 

Naponsko-deformaciono stanje u preoblikovanom disku teško je opisati postulatima mehanike i dinamike udara, a transformaciju u metalurškom smislu moguće je analizirati samo na realnom sistemu posle eksperimenata [5,6].

U poređenju sa materijalom podne ploče oklopnih borbenih vozila (tenkova, borbenih vozila pešadije ili oklopnih transportera), materijal diska ima slabija mehanička svojstva. Kada se uzme u obzir da takav disk tokom preoblikovanja dobije izuzetno veliku brzinu i da raspolaže isto tako velikom kinetičkom energijom, moguće je objasniti zašto se ostvaruje proboj pancirne ploče debljine 20-40 mm. Udarni procesi praćeni velikom brzinom izučavaju se u oblasti hipervelikh brzina (*hypervelocity*), u kojoj velike brzine deformacije (*high rate of deformation*) imaju odlučujuću ulogu u transformaciji kristalne rešetke i promeni mehaničkih svojstava materijala diska [6]. Navedena konstatacija, da pri Misznay-Shardinovom efektu ne dolazi do tečenja materijala diska, navodi na zaključak da je u svojevrsnom obliku „projektila” (sl.19) koncentrisana izuzetno velika energija, čija aplikacija na prepreku dovodi do probojnog dejstva i karakteristične pojave za takve procese (ulazni otvor, probijeni deo i izlazni otvor). Rezultati eksperimenata [7] potvrdili su ovu konstataciju, a realni oblik „projektila” iz eksperimenata prikazan je na sl.20.



Slika 19. Preoblikovani disk u trenutku udara u prepreku



Slika 20. Preoblikovani disk iz eksperimenata

### Zaključak

Na realnom modelu (dimenzije diska i eksplozivnog punjenja su iz postojeće konstrukcije mine) izvršeno je računarsko modeliranje i simulacija kretanja diska u intervalu 0-200  $\mu$ s. Za razliku od postojećih modela i ostvarenih simulacija u 2D geometriji, ova analiza izvršena je prvi put u 3D geometriji. Očiglednost transformacije konkavnog diska u ovakvom obliku nije sporna, kao što nije sporna ni činjenica da je ovakva simulacija vrlo bliska realnom stanju u eksperimentalnim istraživanjima. Dobijeni rezultati proračuna ohrabruju i navode na pomisao da je moguće smanjiti broj potrebnih eksperimenata, naravno, ako se raspolaze odgovarajućim setom podataka o materijalu, eksplozivu i parametrima jednačine stanja. Rutina u generisanju konkretnih modela, odgovarajući softverski i hardverski zahtevi i neprekidna veza model – eksperiment obezbediće da validnost dobijenih rezultata proračuna bude na visokom nivou.

Sigurno je da računarsko modeliranje i simulacija,

posebno u 3D geometriji, imaju smisla i mogu da se izvedu za različite materijale (čelik, aluminijum, bakar). Tada je, uz teorijske postulate, matematičke analize i eksperimentalnu verifikaciju rezultata modeliranja i simulacija, moguće ispravno zaključivati u oblasti velikih brzina deformacije. Pored izuzetno velike baze podataka o različitim parametrima materijala i eksploziva, osnovni doprinos računarskog modeliranja i kasnijih simulacija je postizanje što veće tačnosti proračuna. To se postiže dugotrajnim radom, ne samo u delu softvera, nego i u detaljnim eksperimentima i njihovoj verifikaciji u realnim borbenim sredstvima. Naravno, tačnost proračuna odražava se i na mogućnost optimizacije konstrukcije protivtenkovskih sredstava.

### Literatura

- [1] HALLQUIST, J.O. *User's Manual for DYNA3D*. University of California, 1979.
- [2] HALLQUIST, J.O. *Theoretical Manual for DYNA3D*. University of California, 1982.
- [3] HALLQUIST, J.O. *A Procedure for the Solution of Finite Deformation Contact-Impact Problems by the Finite Element Method*. University of California, 1982.
- [4] DOBRATZ, B.M. *LLNL Explosives Handbook*. University of California, 1981.
- [5] ZUKAS, J.A. *Impact Dynamics*. New York, John Wiley & Sons, 1982.
- [6] RADIĆ, V. *Numerička simulacija kretanja i brzine ploča pri zavarivanju eksplozijom*. 21. kongres teorijske i primenjene mehanike, YUMEX, Niš, 1995, pp.106-111.
- [7] RADIĆ, V., MOMIROVIĆ, V. *Ispitivanje probojnosti funkcionalnih modela kasetne protivtenkovske mine KPTM-2*. Int. dok. VTI-02-01-0616, 2000.

Rad primljen: 20.2.2002. god

