

Dr Vlado N. Radić,
pukovnik, dipl. inž.
Uprava za istraživanje, razvoj
i proizvodnju NVO SMO,
Beograd

ANALIZA DEJSTVA METALNOG DISKA NA OKLOPNA BORBENA VOZILA I MOGUĆNOSTI ZAŠTITE

UDC: 623.454.361.2-756.6:681.3.06

Rezime:

U radu se analizira preoblikovanje konkavnog diska realne konfiguracije koji se ugrađuje u protivtenkovsku minu i njegovo dejstvo na oklopno borbena vozilo. Disk je modeliran softverskim paketom DYNA3D primenom trodimenzionalnih konačnih elemenata, a njegovo preoblikovanje pod uticajem eksplozije i produkata detonacije praćeno je 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 analizirani su deformacije, maksimalni pritisci, brzine i naponi u čitavom disku.

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

ANALYSIS OF METAL DISC EFFECTS ON ARMOR VEHICLES AND PROTECTION POSSIBILITIES

Summary:

In this paper the deformation of a concave disc in real configuration in an antitank mine is analyzed as well as its effect on armor vehicles. The disc is modeled by three-dimensional finite elements DYNA3D in the software. The deformation of the disc by the influence of detonation products is monitored in time sequences. In the part of software called INGRID (preprocessor) the input data for the DYNA3D processor is formed and the calculation results are interpreted in the TAURUS program (postprocessor). Based on calculations strain, deformation, maximum pressures and velocities are analyzed in the whole disc.

Key words: disc, transformation, explosion, software, modeling, simulation, equation of state.

Uvod

Oklopno borbena vozila proizvod je težnje za ofanzivnim i dobro zaštićenim borbenim vozilom velike vatrene moći. Od prve pojave na bojištu, oklopna borbena vozila (prvenstveno tenkovi) predstavljaju jedinstvo vatrene moći, oklopne zaštite i pokretljivosti. Pojavom prvih tenkova nastao je problem kako zaštititi

posadu i osnovne podsisteme oružja u njemu. Naime, metalni oklop trebalo je da spreči prodor projektila streljačke i protivoklopne municije u vozilo. Prva rešenja zasnivala su se na upotrebi čeličnih ploča debljine od 3 do 8 mm.

Razvoj tehnologije uzrokovao je promenu vrste oklopa koji su se primenjivali za zaštitu. Nekada je to bio isključivo čelik, a danas se može govoriti o više različitih vrsta materijala (čelik, legure

aluminijuma, keramika, stakloplastika, kompoziti, reaktivni i aktivni oklopi).

Oklop od aluminijuma koristi se prvenstveno za zaštitu borbenih vozila od dejstva streljačke municije i fragmenata artiljerijskih projektila. Oklop od čelika visoke tvrdoće ima isti nivo zaštite od dejstva pancirne municije 7,62 mm kao i legure aluminijuma. Kombinovanjem tvrdog i žilavog sloja dobija se oklop znatno veće tvrdoće.

Kod lakog oklopa obloženog keramikom spoljni tvrdi sloj (keramika) dezintegriše projektil, a unutrašnji apsorbira kinetičku energiju. Kombinacija keramike i kevlara ili staklopoliestarske smole koristi se za oklope veće debljine. Modularni oklop predstavlja kombinaciju završenog čeličnog i kompozitnog oklopa, omogućava dopunsku zaštitu i zamenu realizovanog rešenja oklopom boljih zaštitnih svojstava.

U suštini, parametri koji određuju nivo zaštite tenka su, pre svega, oklopna zaštita, a zatim dimenzije (silueta), termička i radarska signatura, pokretljivost, NHB zaštita, protivkumulativni ekrani i protivpožarna zaštita.

Jedno od osnovnih svojstava tenka od kojeg bitno zavisi mogućnost preživljavanja u borbi jeste nivo oklopne zaštite. Većina svetskih proizvođača ne navodi dovoljno pouzdanih podataka o performansama upotrebljenih materijala i zaštitnim svojstvima realizovanih rešenja. Navodi se, uglavnom, da je oklop složen, poboljšan, laminaran ili specijalan. Inače, oklop čini oko 45% ukupne mase tenka. Kod većine savremenih tenkova za zaštitu je primenjen homogeni pancirni čelik koji sadrži ugljenik, mangan, silicijum, nikl, hrom i molibden. Razvoj oklopa na bazi titanijuma počeo je pedesetih godina XX veka, a krajem šezdesetih Britanci su

razvili višeslojni („sendvič“) oklop, tzv. Chobham, koji se sastoji od pancirnog čelika, keramike i aluminijuma. On je omogućavao bolju zaštitu od homogenog čeličnog oklopa. Poslednjih godina istraživači u mnogim zemljama posvećuju veću pažnju razvoju nove klase materijala sposobnih da se fizičkim i hemijskim promenama odupru dejstvu protivoklopnih projektila i mina.

Pojava oklopnih borbenih vozila na bojištu iziskivala je pronalaženje i uvođenje u naoružanje odgovarajućeg efikasnog borbenog sredstva koje bi im se moglo uspešno suprotstaviti. U vojnim doktrinama skoro svih zemalja protivoklopna borba zauzima veoma važno mesto, što proizilazi iz činjenice da su oklopna borbeno sredstva različitih karakteristika, mogućnosti i namene sve brojnija u arsenalima mnogih armija.

Protiv oklopnih borbenih vozila koriste se raznovrsna oružja – od ručnih protivoklopnih bombi, tromblona, protivtenkovskih mina, bestrzajnih topova, do ručnih i prenosnih protivoklopnih vođenih raketa.

Protivtenkovske mine

Protivtenkovske mine spadaju u najmasovnija sredstva za vođenje protivoklopne borbe na bliskim odstojanjima. Pripadaju grupi tzv. pasivnih borbenih sredstava, a koriste se za miniranje puteva i rejonu u kojima se očekuje nailazak protivničkih tenkova. Savremene protivtenkovske mine, pored niske proizvodne cene i jednostavne konstrukcije, karakteriše i sve veća upotreba elektronskih elemenata, senzora, prijemnika i predajnika, satnih mehanizama, snažnijih eksploziva, kao i primena specijalnih tehnologija u proizvodnji.

Na bojištu na kojem dominiraju oklopna borbena vozila stvaranje prepreka ima veliku ulogu u svim borbenim planovima. Veštačke prepreke mogu imati različite oblike – kanali, rovovi, betonske konstrukcije, penaste barijere, „klizava sredstva“. Međutim, najuniverzalniji oblik prepreke, koji se najčešće koristi za ojačavanje prirodnih prepreka na bojištu, jesu protivtenkovske mine. Kao protivtenkovsko oružje, protivtenkovske mine, uglavnom, koncentrišu napad na dve bitne komponente tenka – gusenice i podnu ploču.

Gusenice su u neposrednom kontaktu sa zemljištem, i obično su širine od 500 do 700 mm. Podna ploča je relativno male debljine (20 do 30 mm) i udaljena je od zemlje (stand-off distance) 400 do 500 mm. Nijedan od ovih „ciljeva“ danas nije posebno otporan na dejstvo mina. Veći deo oklopa tenka obično je koncipiran tako da zaštiti od dejstva vatre konvencionalnog oružja i zbog toga je maksimalno koncentrisan sa čela, a manje sa strana tela i kupole.

Protivtenkovske mine obično se klasifikuju prema načinu dejstva na tenkove. One koje dejstvuju na gusenice ili točkove borbenog vozila svrstavaju se u protivgusenične mine; one koje dejstvuju samo na pod vozila poznate su kao protivpodne mine, ali one nisu dovoljno snažne da bi presekle gusenice. Postoje i mine koje dejstvuju i na gusenice i na pod tenka (borbenog vozila). One su često protivpodne, ali je korektnije nazvati ih minama za dejstvo čitavom širinom.

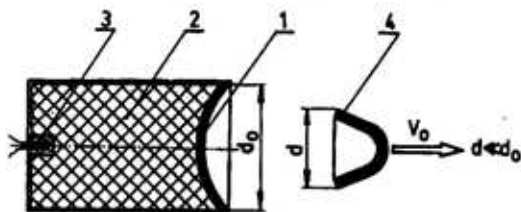
Druga vrsta protivtenkovskih mina koristi se za dejstvo van puta. Postavljaju se sa strane verovatnog pravca nailaska cilja, a deluju kroz oklop tenka (borbenog vozila) pomoću Misznay-Shardinovog ili kumulativnog efekta [1].

Dimenzije većine protivoklopnih mina limitirane su količinom eksploziva koji sadrže (zavisi od mehanizma dejstva) i načinom njihovog postavljanja ili dostavljanja. Razorne mine zahtevaju od 2,5 do 3 kg eksploziva, kako bi sa velikom pouzdanošću uništile gusenice tenka ili šasiju sa točkovima. Mine sa kumulativnim punjenjem mogu imati manju količinu eksploziva. Taj oblik dejstva često se koristi tamo gde mine moraju imati manje dimenzije zbog načina njihovog dostavljanja. One su, međutim, pogodne samo za dejstvo na pod tenkova. Mine na principu Misznay-Shardinovog efekta imaju manju masu eksploziva od razornih mina i mogu biti manje od njih. To će, međutim, smanjiti njihovu sposobnost dejstva na gusenice ili šasije sa točkovima.

Misznay-Shardinov efekat

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

Paralelno sa odbacivanjem diska relativno velikom brzinom (nekoliko km/s) dolazi i do njegovog preoblikovanja koje se odražava na izvesno smanjenje prečnika i zakrivljenje diska. Stepem preoblikovanja ravnog diska nije veliki, a radijus njegove zakrivljenosti približan je radi-



Sl. 1 – Šematski prikaz Misznay-Shardinovog efekta:

1 – disk, 2 – eksploziv, 3 – detonator, 4 – preoblikovani disk

ju su detonacionog talasa u trenutku sudara sa diskom. Ako se na čelo eksplozivnog punjenja postavi konkavni disk (kao na slici 1), pri detonaciji eksplozivnog punjenja dolazi do njegovog preoblikovanja sa većim stepenom deformacije u odnosu na ravan disk.

Miszny-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, Miszny-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.

Osnovni uslovi za nastajanje Miszny-Shardinovog efekta su konvergencija, tj. koncentracija elementarnih masa diska prema osi simetrije modela koja nastaje usled početne zakrivljenosti diska i relativno veći pritisak gasova u osi punjenja i različiti impuls pritiska koji se saopštava pojedinim elementarnim masama diska.

Na osnovu matematičkih analiza, modeliranja i simulacija, kao i eksperimenata, došlo se do sledećih zaključaka [1]:

- povećavanjem brzine detonacije i zapreminske mase eksplozivnog punjenja povećava se stepen preoblikovanja i brzina diska;

- prečnik eksplozivnog punjenja mora biti jednak, a može biti i veći od prečnika diska (povećavanjem prečnika eksplozivnog punjenja smanjuje se gradijent porasta dužine aktivnog dela punjenja, a time i stepen preoblikovanja diska);

- dužina punjenja utiče, do izvesne granice, na stepen preoblikovanja i početnu brzinu diska;

- smanjenjem radijusa zakrivljenosti diska povećava se gradijent aktivnog dela eksplozivnog punjenja između elementarnih masa, a time i preoblikovanje diska. Povećavanjem radijusa zakrivljenosti diska smanjuje se nagib tangente na disk, zbog čega dolazi do manje koncentracije elementarnih masa diska prema osi simetrije, odnosno do manjeg preoblikovanja diska;

- povećavanjem debljine diska smanjuje se stepen preoblikovanja diska.

Numeričko modeliranje i simulacija preoblikovanja diska

Interakcija metala i eksploziva često se analizira radi uspostavljanja određenih veza između karakteristika materijala i eksploziva. Ta analiza često se izvodi i na realnim konstrukcijama (npr. minsko-eksplozivnim sredstvima). Primena računara tada ima smisla ako se raspolože 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 funkcioniše na principu Miszny-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.

Za modeliranje diska i simulaciju 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 [2-4]. Softverski paket sadrži 15 modela materijala (npr. elastični, elastoplastični, termo-elastoplastični, linearni visokoelastični, izotropno-elastoplastično hidrodinamički, itd.) i 9 jednačina stanja pomoću kojih je moguće izračunati parametre naprezanja i deformacije. U poznatoj američkoj 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 metodologiju modeliranja i zadavanja početnih uslova za proračun u 2D geometriji, modeliranje i simulacija u 3D geometriji potpuno su 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-a se generiše ulazna datoteka za procesor DYNA3D, u kojem se vrši proračun prema zadatim parametrima. Kada se završi proračun sačinjava se ulazna datoteka za postprocesor TAURUS, iz kojeg 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 metala i eksploziva, kao i brzine kretanja diska korišćena je hidrodinamička teorija i JWL (Jones-Wilkins-Lee) jednačina stanja. Jednačina stanja JWL izabrana je jer se analiziraju fenomeni detonacije i prostiranja udarnih talasa.

U proračunima za eksploziv usvojene su sledeće karakteristike [4, 6]:

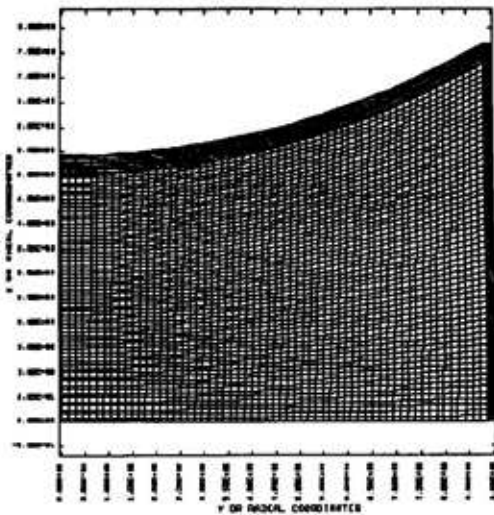
- brzina detonacije ($D=7900$ m/s)
- parametar C-J ($p_{CJ}=0,295$ Mbar),
- gustina ($\rho_e=1,717$ g/cm³),
- prečnik ($d_e = 177$ mm),
- dužina ($l_e = 73$ mm).

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/cm³),
- parametar ojačavanja ($\beta=1$),
- modul elastičnosti ($E=207$ GPa),
- tangenti modul ($E_T=1$ 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 (slika 2). Ovakva konfiguracija modela zahtevana je programskim rešenjem (granični i konturni uslovi) u kojem metal uvek mora da bude u kontaktu sa eksplozivom. U analizi i proračunima metalna obloga ima zanemarljivu debljinu i ne posmatra se kao uticajan činilac u prostiranju produkata detonacije i deformacije i preoblikovanja diska.

U softverskom paketu DYNA3D 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 te-



Sl. 2 - Model interakcije metal - eksploziv u 2D geometriji

stirana je na modelu u 2D geometriji i pokazala se kao adekvatno rešenje. Takođe, za ovu jednačinu stanja dostupni su potrebni parametri, tako da je moguće proračunati sve veličine. Za ostale jednačine stanja, koje obuhvataju 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:

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

gde su: ω , A, B, R_1 , R_2 , E_0 - ulazni parametri zavisi od vrste materijala i eksploziva.

U proračun su unete sledeće vrednosti 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 do 200 μs .

Na slikama 3a-3f prikazane su neke sekvence preoblikovanja u kojima je očigledan stepen plastične deformacije početnog oblika diska.

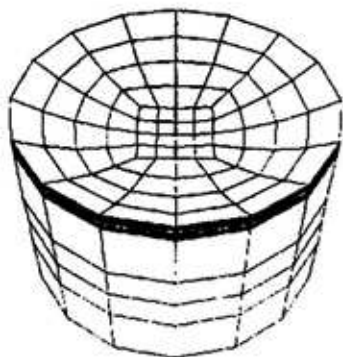
Na osnovu ovih sekvenci može se konstatovati da je plastična deformacija materijala diska vrlo velika, što je potvrđeno i u eksperimentima [8]. Oblik koji poprima disk u eksperimentima i u računom simuliranim stanjima istovetan je. Time je dokazana validnost računarskih proračuna i određenih aproksimacija, kao i metodologije izbora modela materijala, jednačine stanja i vrste konačnih elemenata kojima je modelirana interakcija metala i eksploziva.

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 (npr. pancirne ploče debljine 20 do 40 mm).

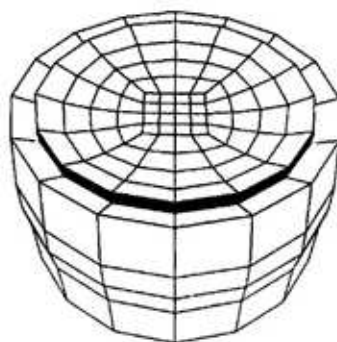
Za interval u kojem je izvršeno simulirano kretanje interakcije metala i eksploziva (0 do 200 μs) dobija se određeni set podataka, od kojih su najinteresantniji konture pritiska i mreža konačnih elemenata (slike 4a-4d).

Transformacija početnog konkavnog oblika diska može se pratiti kroz pojedine sekvence, i tada se na najbolji način sagledava sveukupna deformacija jednostavnog oblika diska do svojevrstog „projektila“ (slike 5a-5e).

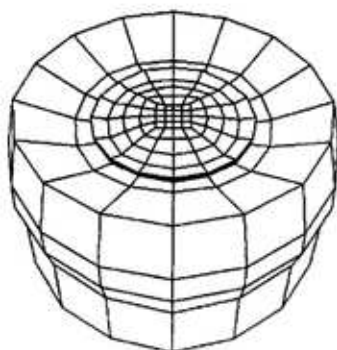
Naponsko-deformaciono stanje u preoblikovanom disku teško je opisati postulatima mehanike i dinamike udara, a transformaciju u metalurškom smislu moguće je analizirati samo na realnom sistemu posle eksperimenata [5, 6].



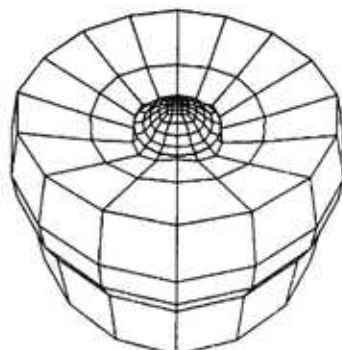
a) $t = 0 \mu\text{s}$



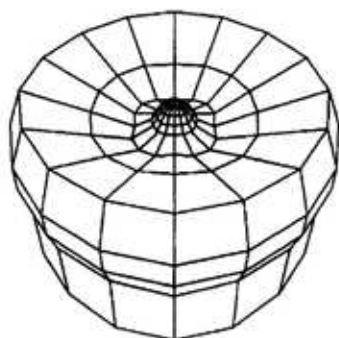
b) $t = 10 \mu\text{s}$



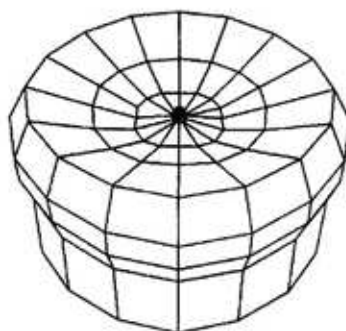
c) $t = 20 \mu\text{s}$



d) $t = 40 \mu\text{s}$

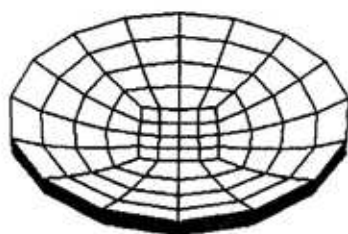


e) $t = 60 \mu\text{s}$

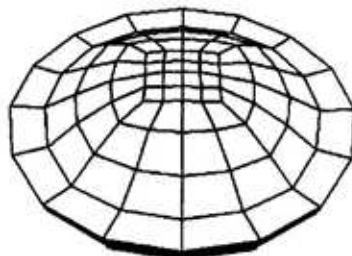


f) $t = 170 \mu\text{s}$

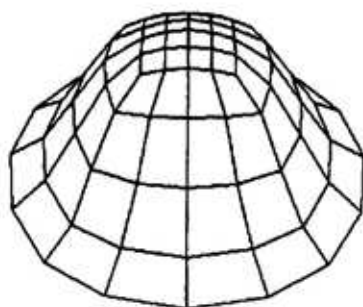
Sl. 3 - Sekvence preoblikovanja diska



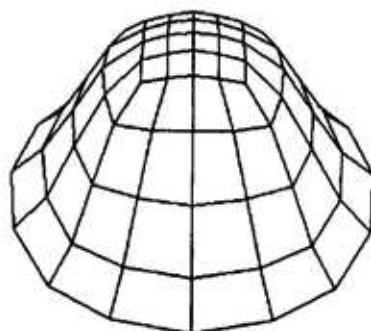
a) $t = 0 \mu\text{s}$



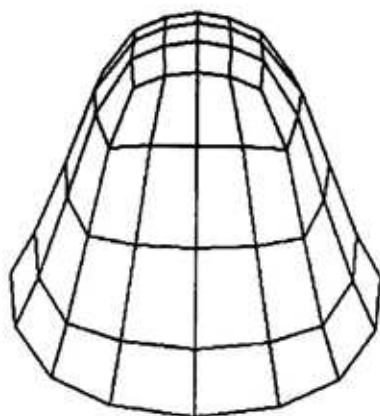
b) $t = 20 \mu\text{s}$



b) $t = 40 \mu\text{s}$



c) $t = 60 \mu\text{s}$



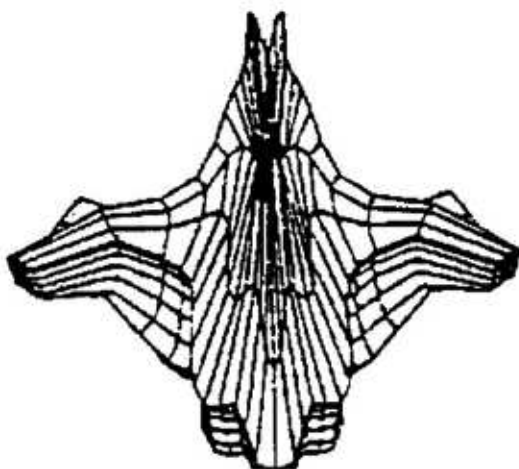
e) $t = 120 \mu\text{s}$

Sl. 5 – Transformacija diska po sekvencama

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 disk tokom preoblikovanja dobija izuzetno veliku brzinu i da raspolaže isto tako velikom kinetičkom energijom, moguće je objasniti zašto se ostvaruje proboj pancirne ploče.

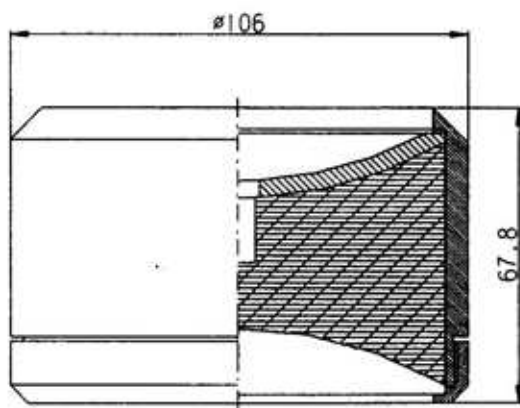
U eksperimentima je korišćen funkcionalni model kasetne protivtenkovske mine (slika 6). Mina je postavljena na zemlju, a ploča na određenom rastojanju (300 do 500 mm). U eksperimentima je korišćen isti model mine, ploče debljine 20 mm, 30 mm i 40 mm, a varirano je i rastojanje mine od ploče. U pogledu efekta dejstva diska na ploču ostvareni su različiti rezultati – od proboja do ispuščenja zadnje površine ploče [8]. Ukupne strukturne deformacije nisu posebno tretirane.

Udarni procesi praćeni velikom brzinom izučavaju se u oblasti hipervelikih brzina, u kojoj velike brzine deformacije imaju odlučujuću ulogu u transformaciji kristalne rešetke i promeni mehaničkih svojstava materijala diska [6]. Navedena



Sl. 7 – Specifičan oblik diska u trenutku udara u prepreku

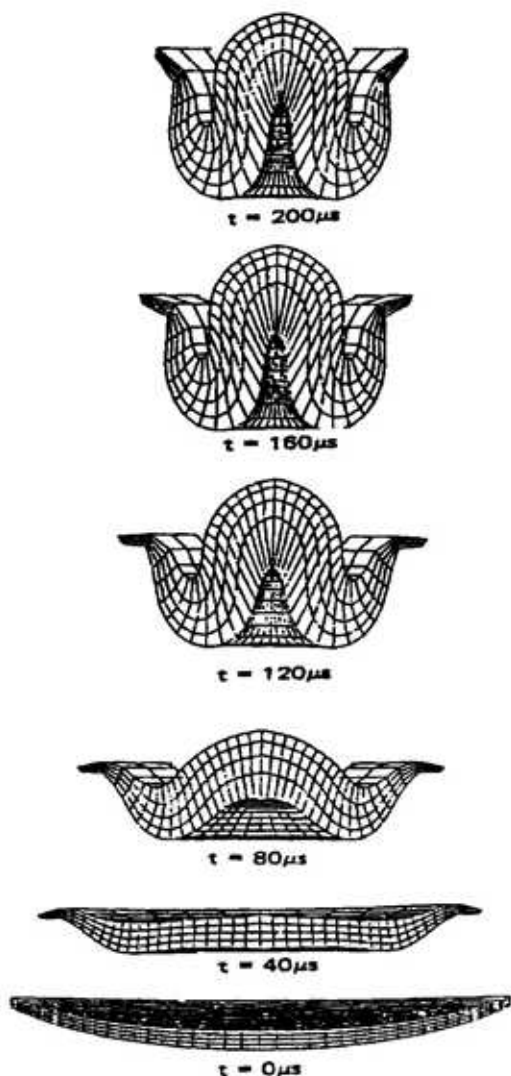
konstatacija da pri Misznay-Shardinovom efektu ne dolazi do tečenja materijala diska navodi na zaključak da je u svojevrsnom obliku „projektila“ (slika 7) koncentrisana izuzetno velika energija, čija aplikacija na prepreku dovodi do probojnog dejstva i karakteristične pojave za takve procese (ulazni otvor, probijeni deo i izlazni otvor). Rezultati eksperimenata [8] potvrdili su ovu konstataciju, a realni oblik „projektila“ iz eksperimenata



Sl. 6 – Funkcionalni model kasetne protivtenkovske mine



Sl. 8 – Realan izgled preoblikovanog diska („projektila“)



Sl. 9 – Proces preoblikovanja diska po izabranim sekvencama

prikazan je na slici 8. Čitav proces preoblikovanja, po nekim sekvencama, prikazan je za interval 0–200 μ s na slici 9.

Zaštita oklopnih vozila od dejstva mina

Priroda i područje opasnosti od mina znatno su promenjeni poslednjih godina.

Kao posledica toga, oklopna borbena vozila postala su osetljivija i ukazala se potreba da se poboljša njihova zaštita od većine protivtenkovskih mina koje se nalaze u upotrebi. Privremeno izbacivanje tenka, npr. iz borbe, znači stvaranje povoljnih uslova za njegovo uništenje drugim vatrenim sistemima. Tenk sa oštećenom gusenicom na otvorenom zemljištu je otkrivena meta, što u taktičkom smislu nije zanemarljivo (slika 10).

Generalno gledano oštećenje šasije oklopnih borbenih vozila točkaša od dejstva mina prihvaćeno je kao neminovno. Mere preduzimane protiv protivtenkovskih mina sastojale su se, uglavnom, od različitih oblika razminiranja sa ciljem da se izbegne ili smanji rizik od oštećenja. Međutim, na poboljšanje zaštite tela oklopnih borbenih vozila od eksplozije protivtenkovskih mina usmereni su veliki istraživački resursi.

Mere za zaštitu tenkova od stvarnog kontakta sa minama sastoje se u postavljanju oklopnih ploča ispod trupa koje su dovoljne debljine da izdrže eksploziju mina. To uslovljava primenu ploča manje debljine nego što su bočne stranice tenka i prednjih ploča izrađenih od mekšeg i mnogo elastičnijeg čelika radi smanjenja rizika od proboja.

Ma koja debljina donjih ploča da se primeni, to donosi veliku korist, naročito zbog smanjenja rizika od proboja i letalnih efekata usled dejstva natpritisaka unutar borbenog vozila. Da bi se što više smanjio rizik od oštećenja, bočne ploče na britanskim tenkovima Centurion, Chieftain i ostalima nagnute su pod uglom od 12° prema unutrašnjosti. Donje ploče kod tenkova T-54 i kasnijih modela ruski stručnjaci oblikuju iz jednog dela i zavaruju samo po bočnim stranama. Koncept MEXAS (Modular Expandable Armor



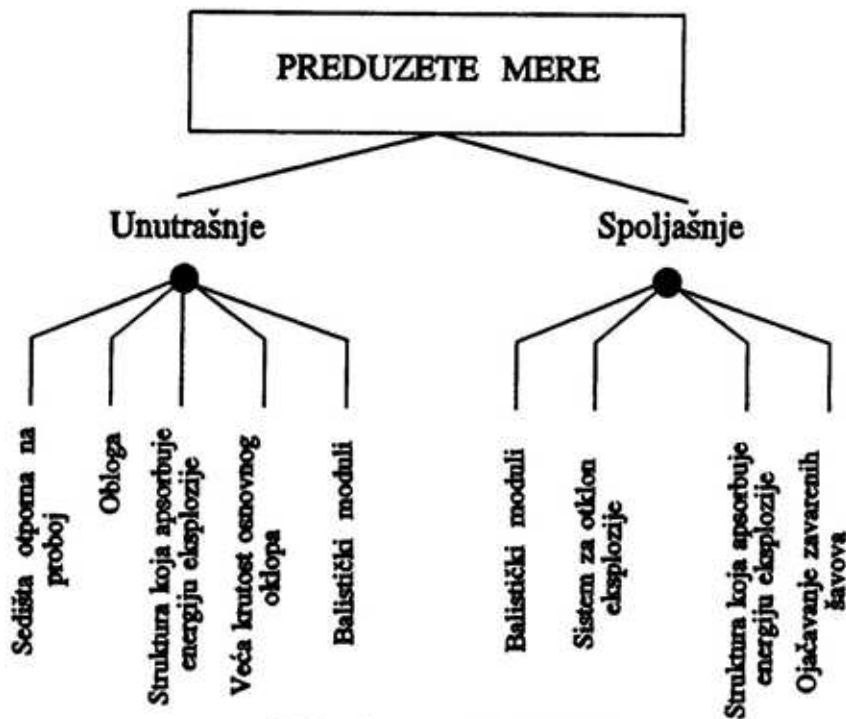
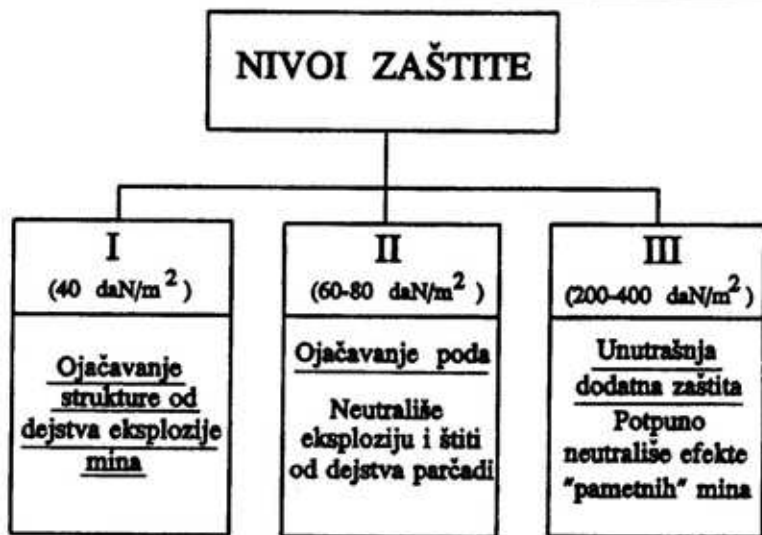
Sl. 10 – Oštećenje tenka od dejstva protivtenkovske mine

System), koji nudi nemačka firma IBD Diesenthal Engineering (slika 11), odražava trenutni nivo zaštite od mina na oklopnim borbenim vozilima. Čak iako su relativno tanke, donje ploče treba da imaju što veću krutost kako bi se smanjio štetan uticaj natpritiska. Kao primer može poslužiti britanski tenk Chieftain, na kojem je donja ploča u obliku plitkog slova V, a čija je krutost znatna. Sličan efekat postigli su izraelski stručnjaci na tenkovima Merkava, koji imaju V oblik donje ploče, koji je oblikovan savijanjem jedne umesto zavarivanja dve ploče. To poskupljuje tenk, ali eliminiše osetljivost zavarenih spojeva.

Ruski konstruktori koriste alternativni put ukrućenja donjih ploča tenkova – od tenka T-62 pa nadalje. To podrazumeva izradu ploča sa poprečnim žlebovima umesto ravne i glatke površine, koja je pogodnija jer lakše klizi preko blata (kala, gliba), mekog zemljišta i savlađuje prepreke. Nasuprot tome, proizvodnja relativno velikih ploča debljine 20 mm talasastog oblika znatno je skuplja.

Kako opasnost od mina postaje sve veća i ne podrazumeva samo eksploziju ispod gusenica nego i ispod poda tenka, ruski konstruktori su dodavanjem potpornih nosača ukrutili prednji deo donjih ploča. To je urađeno na tenkovima T-54 AM i T-62M tokom 1983. godine, a kasnije je primenjeno i na ostale tenkove, uključujući i T-80U. Tenkovi T-54AM i T-62M opremljeni su razmaknutim pločama, čineći tako dvostruki pod, mada na račun smanjenja klirensa. Međutim, takav način povećanja zaštite tenkova od eksplozije mina nije primenjen na tenkovima T-72M1 i T-80U, kao i najnovijem T-90.

U Izraelu je na tenku Merkava od početka proizvodnje ugrađivan razmaknuti oklop na dodatnim donjim pločama veće debljine. Rastojanje između dve ploče bilo je u početku iskorišćeno za rezervoare za gorivo, ali je to na tenku Merkava 3 izostavljeno, jer je dokazano da je vazduh efikasniji od tečnosti (goriva) u slabljenju udarnog talasa generisanog eksplozijom mine.



Sl. 11 – Koncept zaštite MEXAS

Godinama se oklopna borbeno vozilo suočavaju sa opasnostima koje izazivaju mine. Odgovor usvojen u konstruk-

ciji oklopnih borbenih vozila mase veće od 10 tona okarakterisan je na primeru oklopnog transportera Saracen, koji se

koristi u britanskoj armiji. Tom 6-točkaškom vozilu su sa donje strane dodate čelične ploče debljine 12 mm, kako bi izdržalo eksploziju mine sa masom eksploziva od 9 kg ispod jednog od točkova.

Opasnost nije ograničena samo na eksploziju mine. Laka oklopna borbena vozila i tenkovi mogu se suočiti i sa kumulativnim punjenjima ili sa minama na principu Misznay-Shardin. One neće otkinuti samo gusenicu ili uništiti točkove, već će perforirati oklop debljine 50 do 70 mm na distanci koja odgovara klirensu oklopnih vozila.

Za zaštitu tenkova od dejstva takvih mina zahteva se ugradnja ekstraoklopnih ploča debljine 70 mm, koje imaju masu skoro 5 tona. To može, eventualno, biti prikladno rešenje za specijalna inženjerska vozila, ali ostala oklopna vozila zahtevaju drugačiji pristup. Ako je zaštita od mina ograničena na odeljenje posade, masa ekstraoklopa mora se smanjivati, naročito ako je on sofisticiranijeg tipa od običnog čeličnog oklopa. Takav pristup prihvatila je nemačka kompanija Kraus-Mafaj u razvoju višenamenskog transporta ATF, koji je balistički minski zaštićeno vozilo.

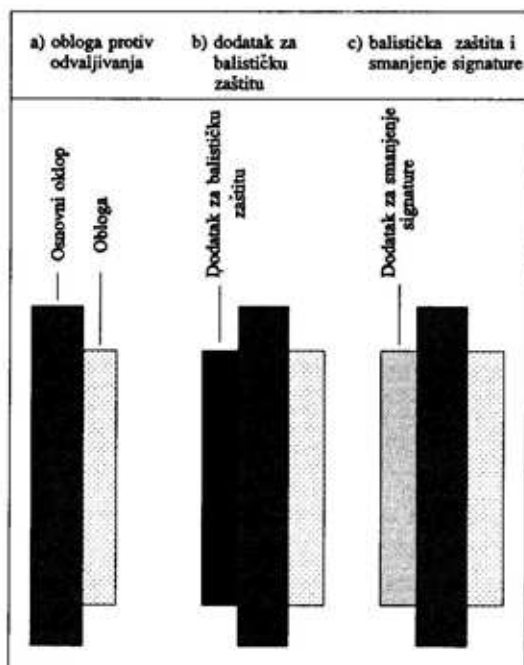
Želja da se što više smanji broj žrtava stavlja u prvi plan zaštitu članova posade univerzalnih i specijalnih vozila. Kamioni i inženjerska vozila opremljeni su oklopom koji efikasno štiti od dejstva malokalibarskih zrna i fragmenata, uključujući i one od mina Claymore. U mnogim slučajevima ta poboljšanja ili modernizacije podrazumevaju dodatni oklop za zaštitu od mina koje eksplodiraju ispod vozila. Iako takva rešenja povećavaju preživljavanje posade, ona ne mogu da obezbede nivo zaštite poput vozila namenski projektovanih da budu otporna na dejstvo mina. Prema mišljenju stručnjaka iz juž-

noafričke odbrambene organizacije ARMSCOR, efikasna minska zaštita zahteva nekoliko komplementarnih prilaza, koji, pored ostalog, uključuju:

- otklon (skretanje) eksplozije i njenu apsorpciju,
- zaštitu od penetracije,
- obezbeđenje adekvatne visine vozila iznad tačke eksplozije,
- obezbeđenje dovoljne i pravilno raspoređene mase (za stabilizaciju vozila),
- ugradnju sigurnih i bezbednih sedišta za posadu,
- zaštitu vitalnih komponenti i tereta,
- izvođenje kvalitetne obuke.

Obezbeđenje zaštite oklopnog borbenog vozila od dejstva mina ojačavanjem poda (patosa) zavarenim oklopnim čeličnim pločama može samo parcijalno da štiti strukturu, ali to ne smanjuje efekat detonacije mine na posadu, instalacije i uređaje u unutrašnjosti vozila. Velika buka, udar, pritisak i sekundarni fragmenti ostaju kao opasnost. Elastična deformacija poda prouzrokuje da se sklopovi i agregati, montirani ili postavljeni na dnu borbenog odeljenja, usmeravaju u projektele brzinom od 300 m/s. Otuda ovaj pristup ne vodi rešenju problema i ne donosi željene rezultate.

Radi razvijanja efikasne zaštite od mina potrebno je jasno definisati koji se standardi moraju stvarno ispuniti. Nije dovoljno samo izbegavati perforaciju poda (patosa). Minska zaštita mora biti projektovana tako da pruži efikasnu zaštitu od efekata tradicionalnih razornih mina sa sadržajem 15 kg TNT, protiv mina sa eksplozijom oblikovanim projektilima sa više od 7 kg TNT, kao i od dejstva mina usmerenog dejstva. U slučaju kumulativnih mina njihova efika-



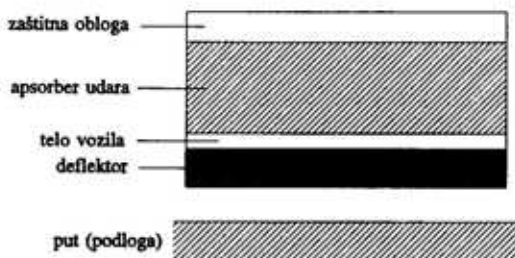
Sl. 12 – Šema hibridne minske zaštite

snost mora se smanjiti za najmanje 75%. Ispitivanja u nemačkoj kompaniji IBD koja su se odnosila na hibridnu minsku zaštitnu šemu integrisanu u eksperimentalno vozilo i tenk Leopard 1, pokazala su da ti zahtevi mogu biti ispunjeni (slika 12).

Kompletna minska zaštita odnosi se na pokrivanje celokupne dužine vozila i dela bočnih stranica. Zavareni šavovi u patosu moraju se zaštititi kosim (nagnutim) pločama, kako bi se sprečilo probijanje prouzrokovano strukturnim promenama susednih šavova. Pod vozila mora da ima nekoliko slojeva od različitih materijala, sposobnih da efikasno apsorbuju buku i udarne talase. Ekstremno velika tvrdoća ploča mora da obezbedi da se udarni talas prenese na strukturu poda kako ne bi prouzrokovao odvajanje opreme i pomoćnih uređaja. Pomeranje poda prema unutrašnjosti vozila zbog

elastične deformacije ne sme preći više od 150 mm, a usled plastične deformacije ne sme biti veće od 50 mm. Funkcija zaštite mora se sačuvati čak i pri višestrukim detonacijama. Otvori u podu tenka, ukoliko se ne mogu izbeći, moraju se proračunati i tako ojačati da onemoguće dejstvo projektila prema unutrašnjosti vozila.

U rešavanju visokih zahteva oklopne zaštite hibridni sistemi, koji su integrisani unutar i spolja osnovnog oklopa, optimalno su rešenje. Spoljni čvrsti deflektor (otklonski sistem), koji se dodaje na osnovni oklop, usmeren je na defokusiranje koncentrisane energije detonacije. Preko osnovne oklopne zaštite preostala energija ulazi u kombinovani sistem sa dinamički nelinearnim elementima i na taj način se redukuju apsorbovanjem. Jedan deo takvog apsorpcionog sistema jesu vrlo krute komponente male gustine. Prema borbenom odeljenju tenka obloge apsorbuju udar i na taj način kompletiraju zaštitni sistem (slika 13).



Sl. 13 – Apsorpcioni sistem za eliminisanje efekata dejstva protivtenkovske mine na oklopno vozilo

Zaključak

Oklopna borbeno vozila, posebno tenkovi, „ranjivi“ su na dejstvo protivtenkovskih mina. Materijal diska ima slabija mehanička svojstva od podne ploče, ali sa velikom brzinom odbacivanja i veli-

kom kinetičkom energijom deluje razorno na ploču. Dimenzije ploče limitirane su taktičko-tehničkim zahtevima, posebno manjom masom i većom pokretljivošću. Pošto disk ima specifičan oblik, primeren već poznatim principima preoblikovanja, njegova transformacija pod dejstvom produkata detonacije je očigledna.

U radu su upoređeni rezultati eksperimentalnih istraživanja sa numerički modeliranim i simuliranim dejstvom diska na metalnu ploču. Numeričke simulacije odvijaju se sa karakterističnim problemima zbog tendencije da se proračunska mreža interakcije disk – ploča prekine, tj. dovede do neregularnosti u proračunima.

Na realnom modelu (dimenzije diska i eksplozivnog punjenja su iz postojeće konstrukcije mine) izvršeno je računarsko modeliranje i simulacija kretanja diska u intervalu od 0 do 200 μ 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 činjenica da je ovakva simulacija vrlo bliska realnom stanju u eksperimentalnim istraživanjima. Dobijeni rezultati proračuna ohrabruju i navode na mogućnost smanjenja broja potrebnih eksperimenata, ukoliko 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, čak se mogu izvesti i za različite materijale (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 jeste 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.

Iz analize se vidi da protivtenkovska mina sigurno probija podnu ploču tenka, a iz načina na koji se to ostvaruje (u statičkim i u realnim uslovima) očigledno je da se proboj ne može u potpunosti sprečiti. Međutim, novije modifikacije oklopnih borbenih vozila uključuju različite načine kojima se smanjuje efekat dejstva protivtenkovskih mina. Jedan od njih je postavljanje dodatne pancirne ploče ispod postojeće, a drugi je postavljanje ploča pod određenim uglom, tako da se eliminiše direktno dejstvo mine na podnu ploču.

Ove mere se primenjuju na postojećim konstrukcijama, a u novim konstrukcijama to se realizuje dopunskim ojačanjima, poprečnim gredama, podizanjem podne ploče na viši nivo, pomeranjem sedišta iz centra i delimičnim smanjenjem direktnog dejstva mine, ojačavanjem ugradnjom modularnih ploča (keramika, kompoziti, višeslojni čelični oklop), ili primenom hibridnih sistema sa velikim faktorom zaštite.

Literatura:

- [1] Radić, V.: Minsko ratovanje, Monografija, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 2001.
- [2] Hallquist, J. O.: User's Manual for DYNA3D, University of California, 1979.
- [3] Hallquist, J. O.: Theoretical Manual for DYNA3D, University of California, 1982.
- [4] Hallquist, J. O.: A Procedure for the Solution of Finite Deformation Contact-Impact Problems by the Finite Element Method, University of California, 1982.
- [5] Dobratz, B. M.: LLNL Explosives Handbook, University of California, 1981.
- [6] Zukas, J. A.: Impact Dynamics, New York, John Wiley & Sons, 1982.
- [7] Radić, V.: Numerička simulacija kretanja i brzine ploča pri zavarivanju eksplozijom, 21. Kongres teorijske i primenjene mehanike, YUMEX, Niš, 1995, 106-111.
- [8] Radić, V., Momirović, V.: Ispitivanje probojnosti funkcionalnih modela kasetne protivtenkovske mine KPTM-2, stručni izveštaj VTI-02-01-0616, 2000.
- [9] Radić, V.: Modeliranje i simulacija odziva materijala na dejstvo eksplozije, Naučnotehnički pregled, 4, 1998, 48-57.
- [10] Radić, V.: Penetracija projektila velikom brzinom u oklop velike debljine, Naučnotehnički pregled, 4-5, 2000, 18-24.