

Projektovanje i mogućnosti proračuna krutosti, čvrstoće i pouzdanosti oklopnog tela lakih brzohodnih guseničnih vozila

Dr Dušan Milutinović, dipl.inž.¹⁾
Mr Miloljub Trifunović, dipl.inž.²⁾

Projektovanje oklopnih tela borbenih vozila, posebno lakih brzohodnih guseničnih vozila, je složen zadatak. Složenost proističe iz kompleksnosti njegove namene, pošto oklopno telo predstavlja istovremeno: podsistem za vezu (objedinjavanje) svih podsistema vozila u jednu celinu, podsistem za zaštitu od dejstva neprijateljskog naoružanja i noseću konstrukciju vozila. Dat je sistematski prikaz osnovnih znanja, principa i postupaka, koji se koriste pri projektovanju oklopnih tela lakih brzohodnih guseničnih vozila. Analizirani su principi i postupci projektovanja, koji se odnose na oklopno telo kao noseću konstrukciju vozila. U završnici je dat predlog proračuna pouzdanosti oklopnog tela na bazi raspodela radnih opterećenja i kritičnih napona korišćenjem programa razvijenog za potrebe proračuna pouzdanosti elemenata guseničnog kretača.

Ključne reči: Brzohodno gusenično vozilo, borbeno vozilo, oklopno telo, projektovanje, čvrstoća, pouzdanost, proračun.

Uvod

OKLOPNO telo, kao podsistem svakog borbenog vozila pa i lakog brzohodnog guseničnog vozila, ima višestruku namenu, koja je u osnovi trojaka:

- oklopno telo je podsistem za vezu (objedinjavanje) svih podsistema vozila u jednu celinu,
- podsistem za zaštitu od dejstva neprijateljskog naoružanja i
- noseća konstrukcija vozila.

Cilj projektovanja je obezbeđenje osnovnih namena sredstva. Prikazan princip i postupak koji se primenjuje u projektovanju oklopnog tela podeljen je u tri dela. U svakom su izloženi neki osnovni principi, znanja i postupci, koji se koriste u projektovanju, i treba da obezbede takve karakteristike oklopnog tela, da ono može da ispuni svoje osnovne namene.

Treći deo se odnosi na oklopno telo kao noseću konstrukciju vozila, u kome su dati osnovni koncepti projektovanja vezani za obezbeđenje zahteva koji se odnose na krutost, čvrstoću i pouzdanost konstrukcije oklopnog tela. Posebno su razmotrene mogućnosti realizacije odgovarajućih proračuna korišćenjem savremene računarske tehnike.

Oklopno telo kao podsistem za objedinjavanje svih podsistema vozila u jednu celinu

Oklopno telo borbenog vozila je podsistem koji vezuje (objedinjava) sve ostale podsisteme vozila u jednu celinu.

Ta činjenica nameće projektantima oklopnog tela potrebu za konsultovanjem projektanata ostalih podsistema, i potrebu poznavanja uslova ugradnje svakog pojedinog sistema, što nameće potrebu za multidisciplinarnim obrazovanjem projektanata oklopnog tela.

Projektanti-konstruktori oklopnog tela najčešće rešavaju i osnovne probleme koncepcije borbenog vozila u celini, istovremeno rešavajući probleme definisanja optimalnog prostora za smeštaj posade i svih podsistema. Taj posao, koji se radi po metodi "piši pa briši" (radi se više varijanti), ukoliko nije dobro organizovan, posebno u terminima realizacije konstrukcionih rešenja pojedinih podsistema može negativno da utiče na konačni kvalitet vozila u celini.

Posao komponovanja vozila kao celine, i definisanje oblika oklopnog tela, je olakšan definisanjem idejnog rešenja vozila i projektovanja oklopnog tela korišćenjem računara i CAD softverskih paketa, koji omogućavaju jednostavnije definisanje i brže ispravke postavljenih idejnih rešenja, pa i izmene u konstrukciji oklopnog tela.

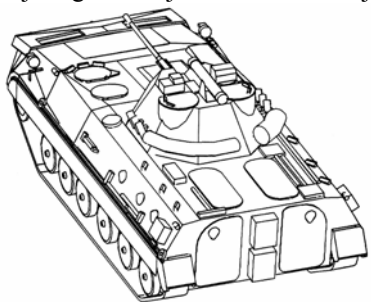
Na sl.1 prikazano je idejno rešenje (spoljašnji izgled) jednog lakog brzohodnog guseničnog vozila formirano pomoću CAD programskog paketa IDEAS na računaru VAX. Mogućnosti CAD programskih paketa, u prikazu idejnog rešenja ima drugih prednosti, kao što je, npr., mogućnost određivanja u prostoru i izbegavanje značajnih grešaka u konstrukcionoj dokumentaciji.

Postoji i mogućnost dobijanja tzv. "rendgenskih" snimaka i delimičnih preseka sa otkrivanjem. Takvi prikazi

¹⁾ Saobraćajni institut CIP, 11000 Beograd

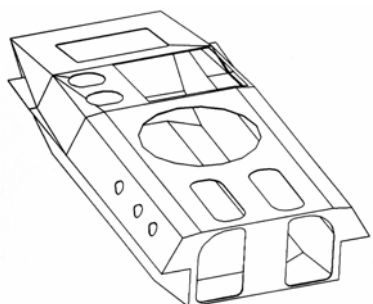
²⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

omogućuju bolje sagledavanje delova unutrašnjosti vozila.



Slika 1. Spoljašnji izgled idejnog rešenja lakog brzohodnog guseničnog vozila dobijenog pomoću programskog paketa IDEAS na računaru VAX

Na osnovu tako formiranog idejnog rešenja, može se jednostavno izdvojiti samo oklopno telo (sl.2), koje predstavlja osnovu za izradu konstrukcijske dokumentacije, sa svim potrebnim početnim dimenzionim parametrima i parametrima mase.



Slika 2. Idejno rešenje oklopnog tela vozila

Smeštaj motora, sistema za prenos snage i hodnog sistema ima značajan uticaj na gabaritne dimenzije oklopnog tela. Analiza sila koje se prenose od elemenata hodnog sistema na oklopno telo će biti prikazano, a problemi koncipiranja i ugradnje osnovnog naoružanja se prenose na oklopno telo (npr. kupolna i kazamatska ugradnja topa kao glavnog naoružanja borbenog vozila). Specijalni uređaji takođe imaju svoje posebne uslove ugradnje (sredstava veze, nišansko osmatračke sprave, antene, protivpožarni uređaj, filtroventilacioni uređaj itd.).

U završnom delu, koji se odnosi na vezu oklopnog tela sa ostalim podsistemima vozila, biće reči o problemu realizacije zadovoljavajućih karakteristika amfibijnosti lakih borbenih vozila, a posebno borbenih vozila pešadije. Oblik i dimenzije oklopnog tela imaju jedan od odlučujućih uticaja na amfibijske karakteristike vozila. Zbog toga projektant mora da ima podatke o: otporima oklopnog tela pri plovljenju, veličini rezerve plovnosti i položaju težišta pri plovljenju.

Oklopno telo kao podsistem za zaštitu od dejstva neprijateljskog naoružanja

Veliki kadrovski i finansijski kapaciteti se angažuju na istraživanju i razvoju novih materijala za zaštitu posade u vozilu od dejstva neprijateljskog naoružanja. U toj oblasti postignuti su značajni rezultati, ali se i dalje intenzivno radi, iako je efikasnost balističkih materijala povećana za nekoliko puta u odnosu na one od pre četrdeset godina [1].

Međutim, i pored takvog napretka u razvoju materijala za oklope, intenzivan razvoj protivoklopnih sredstava onemogućio je da se na savremenim borbenim vozilima

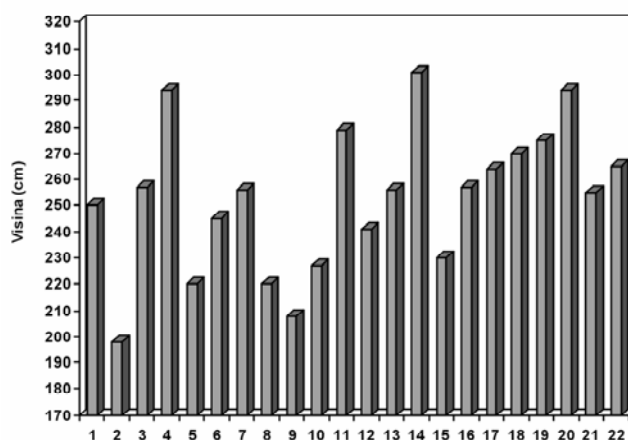
uspostave prihvatljivi odnosi između mase oklopa i svih ostalih podsistema vozila. Na tenkovima poslednje generacije udeo mase oklopa u ukupnoj masi tenka je od 20 do 30 tona.

Kvalitet materijala je prva komponenta u obezbeđenju oklopne zaštite. Druga komponenta je konstrukcija. Iznaženje najpogodnijih oblika, položaja i uglova nagiba oklopnih ploča može značajno povećati ukupnu oklopnu zaštitu. Uzimajući u obzir zajedno sve ono što omogućava koncepcija vozila kroz međusobni položaj podsistema, čini celovitu predstavu o oklopnoj zaštiti i oklopnom telu kao podsistemu za zaštitu.

Uobičajeno je da se oklopna zaštita povećava korišćenjem najpogodnijih materijala povećava ugao i debljine ploča, tako da se najveći stepen zaštite daje prednjem delu. Zavisno od mogućih pravaca dejstva protivoklopnog oružja, primenjuje se diferencijalna zaštita, odnosno različite debljine, oblici i nagibi ploča. Postoji više podataka o tome koji procenat ukupnog broja pogodaka otpada na pojedine delove (površine) borbenog vozila. Prema [2] od ukupnog broja pogodaka 45% otpada na kupolu, 13% na prednju stranu oklopnog tela, a ostatak na bočne strane.

Borbeno vozilo se teže otkriva kada je njegova visina manja, ivice zaobljene i bez isturenih površina i kada je maskirnim sredstvima prilagođeno uslovima terena. Nekada se vodila rasprava o tome, ima li smisla ići na sniženje visine vozila. Danas je opšteprihvaćen stav da borbeno vozilo mora biti što niže. Na sl. 3 i 4, može se videti kako se ukupna visina lakih brzohodnih guseničnih vozila i tenkova vremenom menjala i kako pojedine zemlje-proizvođači ovih sredstava imaju ozbiljne teškoće da visinu vozila svedu u prihvatljive granice [2]. Za razliku od tenkova kod kojih je smanjenje ukupne visine na novijim modelima uočljivo, za laka brzohodna gusenična vozila se ne bi moglo reći. Na sl.4 se vidi da je visina američkog tenka *M47* koja je iznosila 2,80 m, na najnovijem njihovom tenku *M1A2 ABRAMS* smanjena na 2,38 m.

Na sl.3 se vidi da se ukupna visina lakih brzohodnih guseničnih vozila nalazi u širokom dijapazonu vrednosti od svega 1,98 m (sovjetsko vozilo *BMP 1*) do 3,01 m (nemačko vozilo *MARDER 1A3*). Laka brzohodna

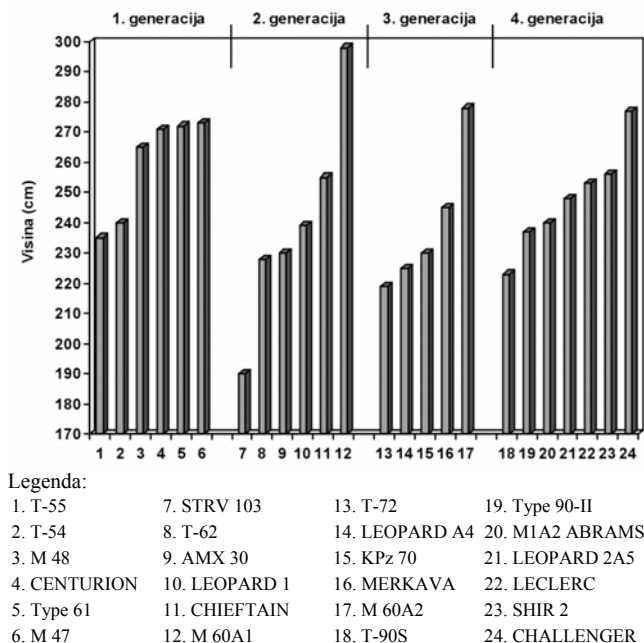


Legenda:

- | | | | |
|-------------|---------------|------------------|-------------------|
| 1. Pbv 302 | 7. M2 BRADLEY | 13. M2A2 BRADLEY | 19. TYPE 89 |
| 2. BMP-1 | 8. BVP M-80A | 14. MARDER 1A3 | 20. NOWAG TORNADO |
| 3. AMX 10P | 9. BMP-2 | 15. BMP-3 | 21. CV 90 |
| 4. MARDER | 10. MBH 1 | 16. KSPy 90 | 22. PIYYARO |
| 5. BVP M-80 | 11. WARRIOR | 17. MARS 15 | |
| 6. VCTP | 12. WZ 503 | 18. VCC 80 | |

Slika 3. Visine lakih brzohodnih guseničnih vozila

gusenična vozila sovjetskog porekla su se u svim vremenskim etapama nalazila na donjoj granici ostvarenih ukupnih visina. Novije varijante zbog sve većih zahteva koji se postavljaju pred ovu kategoriju vozila, imaju veću visinu od prethodnih.



Slika 4. Visine tenkova različitih generacija

Ukupna visina lakog guseničnog vozila i tenka uslovljena je koncepcijom u celini. Spolja gledano, ukupna visina zavisi od visine klirensa oklopnog tela, kupole i opreme, i uređaja koji se ugrađuju na kupolu. Savremena borbena vozila imaju znatno veće prosečne brzine kretanja po terenu, pa je neophodno da dinamički hodovi točkova budu što veći, što ima smisla samo ako klirens vozila to omogućuje. Time je, s druge strane, na vozilima ograničena visina oklopnog tela i kupole.

U izradi oklopnog tela koriste se dva postupka: livenje, i zavarivanje ravnih pancirnih ploča, otpresaka i odlivenih manjih delova. Manji broj zemalja je izrađivao oklopno telo livenjem, a ostale primenjuju postupke zavarivanja zbog toga što se postupkom livenja, (koji je i skuplji), zbog složenijih alata, dobija za ~ 5 do 7% manja oklopna zaštita za istu debljinu zida.

U odnosu na ukupne dimenzije, posebno treba istaći oklopno telo vozila *BMP-1* zbog njegovih veoma malih dimenzija, nastalih kao rezultat kompaktnog rešenja vozila u celini ukupne mase svega 12,6 t. Relativno malim debljinama ploča postavljenih na maloj čeonj površini, omogućeno je da se ostvari zahtevana zaštita sa prednje strane.

Oklopno telo svojim karakteristikama treba da zadovolji zahteve zaštite u širem smislu. To se, odnosi na NBH zaštitu, u okviru koje skoro sva borbena vozila poseduju filtroventilacioni uređaj, koji ostvarenjem određenog natpritiska u vozilu (3-4 mbar) sprečava ulazak kontaminiranog vazduha u unutrašnjost vozila. Zbog toga, u toku projektovanja oklopnog tela, treba posebno voditi računa o njegovoj hermetizaciji. Problemi koji se pri tom javljaju nisu beznačajni.

U okviru podsistema za NBH zaštitu svi savremeni tenkovi, a i neka borbena vozila pešadije, imaju specijalne unutrašnje obloge za zaštitu od zračenja, koje prema nekim podacima smanjuju dozu zračenja ≈ 10 puta. Najnoviji

materijali za te obloge štite i od dejstva zračenja neutronske bombe. Međutim, debljine tih obloga i odgovarajuće prilično velike mase, stvaraju posebne teškoće u projektovanju oklopnog tela i komponovanju tenka kao celine.

Oklopno telo kao noseća konstrukcija vozila

U projektovanju oklopnog tela, kao noseće konstrukcije borbenog vozila nakon definisanja idejnog rešenja, rade se proračuni krutosti i čvrstoće, a u poslednje vreme i proračuni pouzdanosti koji su posebno značajni za laka borbena vozila. Proračunima prethodi detaljna analiza radnih opterećenja, u cilju definisanja ulaznih podataka.

Postupci i rezultati analize, koja najčešće podrazumeva i odgovarajuća ispitivanja režima opterećenja sprovedena na funkcionalnom modelu vozila, biće prikazani u nastavku rada.

Radna opterećenja

Istraživanje radnih opterećenja oklopnih tela sprovode se kroz teorijske i eksperimentalne analize. Eksperimentalni deo istraživanja, tj. ispitivanja radnih opterećenja zbog njihovog izrazito slučajnog karaktera je veoma važno. Rezultati analize radnih opterećenja su osnov za statički i dinamički proračun krutosti, čvrstoće i pouzdanosti oklopnog tela.

Opterećenje oklopnog tela borbenog vozila je složenog karaktera što je posledica više različitih uticaja: konstrukcijskih rešenja, geometrijskih i težinskih parametara, tehnoloških postupaka izrade, kretanja vozila i dejstva naoružanja.

Prva dva uticaja uglavnom zavise od zahteva koji se postavljaju pred konstrukciju, pa su različiti za svaku konkretnu konstrukciju. Zajednički uticaji koji se ogledaju kroz slična konstrukciona rešenja i približno iste geometrijske i težinske parametre mogu biti obuhvaćeni analizom ostala tri uticaja.

Opšte je poznata analiza kretanja guseničnog vozila i otpora koji se pri tom kretanju javljaju. Ti otpori se mogu izračunati za sve slučajeve kretanja: vuča, kočenje, pa i zaokret, kada je proračun nešto složeniji.

Problem se usložnjava kada dejstvo tih sila treba preneti na oklopno telo, odnosno doći do sila i momenata, koji deluju neposredno na oklopno telo. Kompletna analiza se obavlja u dve faze. Prvo se nalaze opterećenja elemenata hodnog sistema koji su u neposrednom kontaktu sa oklopnim telom: torzioni štapovi, laktaste osovine i ležišta laktastih osovine, vratilo pogonskog točka; osovine vodećeg točka i osovine pridržavajućih točkova. U drugoj fazi se nalaze opterećenja na oklopnom telu na mestima neposrednog kontakta elemenata hodnog sistema sa oklopnim telom. Na sl.5 je prikazana konačno dobijena šema opterećenja oklopnog tela, a sprovedeni postupak analize omogućava i izračunavanje svake označene sile i svakog momenta.

Opterećenja pogonskog agregata se prenose preko elastičnih oslonaca, a posledica su sopstvene težine, savlađivanja momenta otpora kretanju i dejstva sila inercije. Slična opterećenja se javljaju i od sistema za prenos snage.

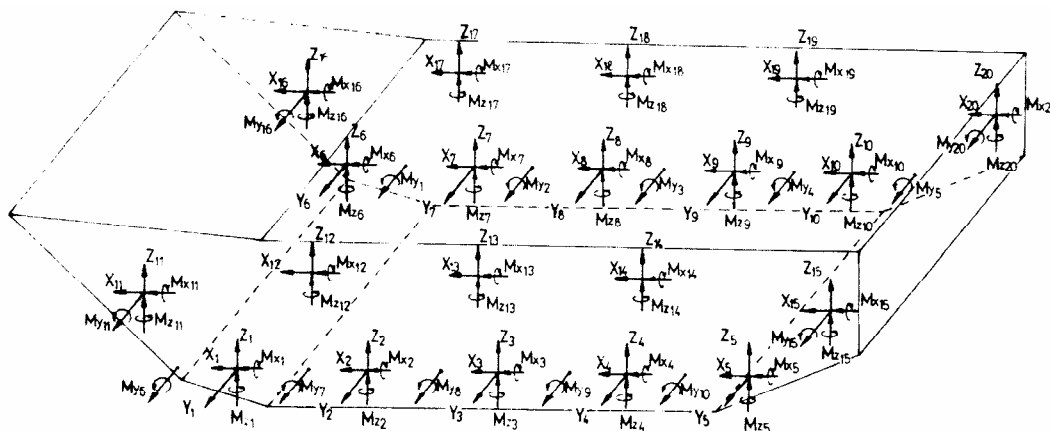
Oklopno telo prihvata i prenosi na podlogu opterećenja od dejstva sopstvenog naoružanja koja mogu biti vrlo jaka. Kod tenkova, koji danas imaju topove kalibra 120 i 125 mm, sila trzanja pri opaljenju dostiže vrednosti ~ 600 kN. Kod borbenih vozila pešadije, zbog manjih kalibara topova te sile su znatno manje, ali su opterećenja dinamička (to su automatski topovi).

Određivanje zaostalih naprezanja je poseban problem u

analizi opterećenja koja deluju na oklopno telo jednog guseničnog borbenog vozila, a javljaju se pri zavarivanju oklopnog tela. Ti zaostali naponi su često bili uzrok pojave prslina na pojedinim pločama oklopnog tela. Određivanje zaostalih napona u zatvorenoj kutijastoj strukturi oklopnog tela je složen zadatak. Danas se u svetu istražuje taj

omoguće upoređenje rezultata merenja i rezultata proračuna.

Na sl. 6 se vidi da je u okviru instalacije predviđeno merenje: vertikalne i bočne sile na oslonim točkovima i napona na pojedinim karakterističnim mestima oklopnog



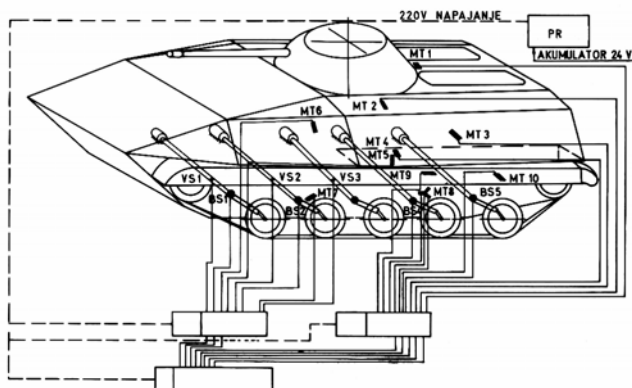
Slika 5. Šema opterećenja oklopnog tela koja se prenose preko elementa hodnog sistema

problem s ciljem definisanje tehnologije zavarivanja u konstrukciji oklopnog tela i dobijanja što manje zaostalih napona. Zaostali naponi superponirani sa naponima koji nastaju od radnih opterećenja mogu posebno u oblastima promenjene strukture materijala u blizini varova, biti uzrok pojave i zamornih prslina oklopnog tela.

Ispitivanje režima opterećenja

Radna opterećenja oklopnog tela u toku eksploatacije vozila su složena, i promenljiva, izrazito slučajnog karaktera promene. To potvrđuju sva obavljena ispitivanja [3], koja ukazuju na potrebu za daljim ispitivanjima, koja će dati realnije podatke o promenama radnih opterećenja, odnosno o režimima opterećenja oklopnih tela.

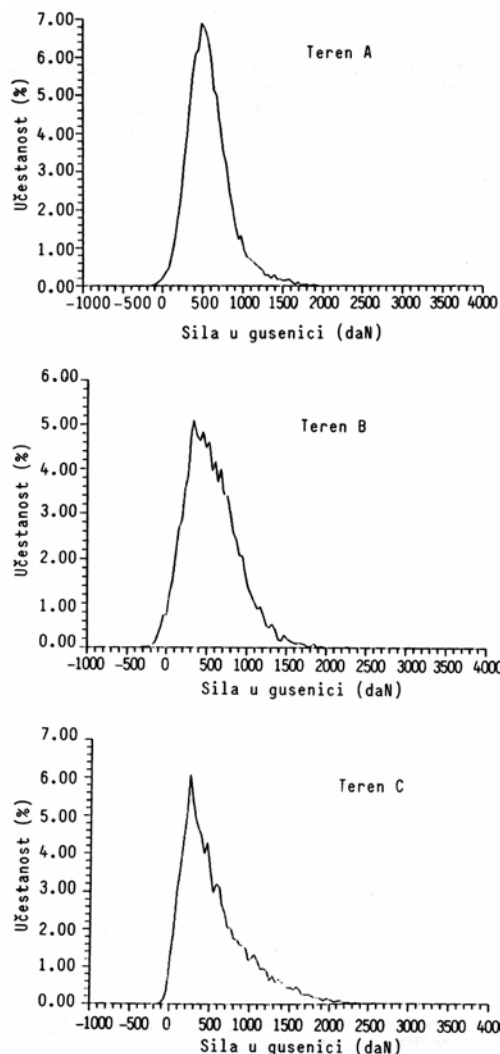
Ispitivanja opterećenja oklopnog tela se obavljaju u "realnim uslovima eksploatacije", koji približno odgovaraju uslovima u kojima će se naći vozilo pri eksploataciji. To su terenska ispitivanja, a za tu svrhu se biraju odgovarajuće tipske staze na kojima će se obaviti vožnja.



Slika 6. Šema merne instalacije za ispitivanje opterećenja oklopnog tela: VS 1-VS 3 – mesta merenja vertikalnih sila na oslonim točkovima; BS 1; 2; 4; 5– mesta merenja bočnih sila na oslonim točkovima; MT 1–MT 10– -mesta merenja napona na oklopnom telu; MP 1, MP 2– merno pojačivački uređaji; MAG– magnetni pisac; PR– pretvarač

Ispitivano vozilo se oprema odgovarajućom mernom opremom, odnosno formira se merna instalacija (sl.6) koja treba da obezbedi merenje većeg broja mernih veličina, tako odabranih da reprezentuju opterećenje oklopnog tela i

tela. Mehaničke merne veličine se obično pretvaraju u električne, i registruju.



Slika 7. Histogrami sile zatezanja u radnom delu gusenice dobijeni za različite terene: A – betonski put, B – peščana podloga i C – zemljani put

Rezultati ispitivanja se iskoriste za proračun dinamičkog ponašanja oklopnog tela u celini, ili za proračun pouzdanosti pojedinih njegovih delova. Isti rezultati se često koriste i za laboratorijska ispitivanja oklopnog tela u celini, ili uređaja u vozilu pričvršćenih za oklopno telo (u tom slučaju izmereni režimi opterećenja se koriste kao pobuda za ocenu dinamičkog ponašanja tih uređaja).

Interesantno je pokazati deo rezultata ispitivanja režima opterećenja guseničnog kretača u realnim eksploatacijskim uslovima [3]. Na sl.7 prikazani su histogrami empirijskih raspodela sile zatezanja u radnom delu gusenice (sila savijanja lakta vodećeg točka) dobijeni ispitivanjem na tri različite vrste terena. Ti rezultati, kao i većina ostalih dobijenih u okviru ispitivanja režima opterećenja guseničnog kretača, preneti na deo oklopnog tela koji prihvata te sile mogu poslužiti za proračune čvrstoće i pouzdanosti oklopnog tela.

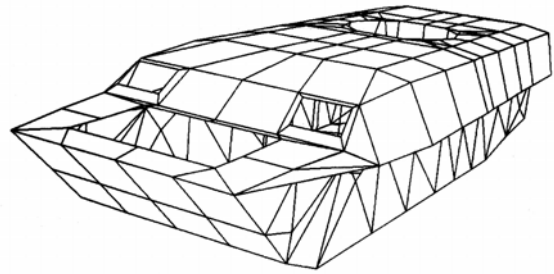
Mogućnosti proračuna krutosti, čvrstoće i pouzdanosti

Sama konstrukcija oklopnog tela predstavlja prostorni sklop međusobno zavarenih ploča, mestimično ojačan gredama u obliku otvorenih ili zatvorenih profila. Po obliku, vrsti i prirodi opterećenja, ove konstrukcije predstavljaju vrlo složene dinamičke sisteme koji se ne mogu analizirati klasičnim, analitičkim, modelima u obliku izdvojenih ploča, membrana, greda, i štapova oslonjenih i opterećenih na različite načine.

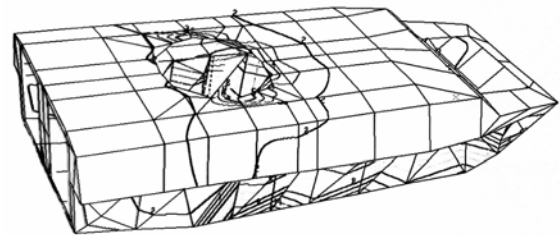
Ovako složeni dinamički i statički problemi se mogu analizirati samo preko uprošćenih matematičkih modela, pomoću kojih se dobijaju približni, ali još uvek praktično upotrebljivi rezultati.

Sadašnji nivo znanja i razvoja računarske tehnike i tehnologije omogućio je stvaranje vrlo kvalitetnih numeričkih alata za proračune složenih struktura. Ovde se prvenstveno misli na metodu konačnih elemenata koja je u ovom trenutku nezaobilazna, ukoliko se vrši bilo kakva detaljnija analiza deformacionog i naponskog stanja i dinamičkog ponašanja složenih nosećih konstrukcija.

Statička ili kvazistatička analiza u cilju analize deformacionog ili naponskog stanja oklopnog tela metodom konačnih elemenata još uvek podrazumeva prilično složen posao, koji uzima u obzir sve rezultate prethodno naznačenih analiza radnih opterećenja. Na sl.8 je, na primeru, prikazan relativno jednostavan model oklopnog tela pripremljen za proračun (246 čvorova, 404 elementa i 1476 stepeni slobode). Nakon unošenja opterećenja i sprovođenja proračuna dobijene su naponske slike za slučajevne dejstva različitih opterećenja kada vozilo stoji i kada se kreće. Na sl.9 je prikazana naponska slika na oklopnom telu (pogled spolja) za slučaj opterećenja kada vozilo stoji. Vide se oblasti sa maksimalnim naponima oko ležišta torzionih štapova, odnosno laktastih osovin.



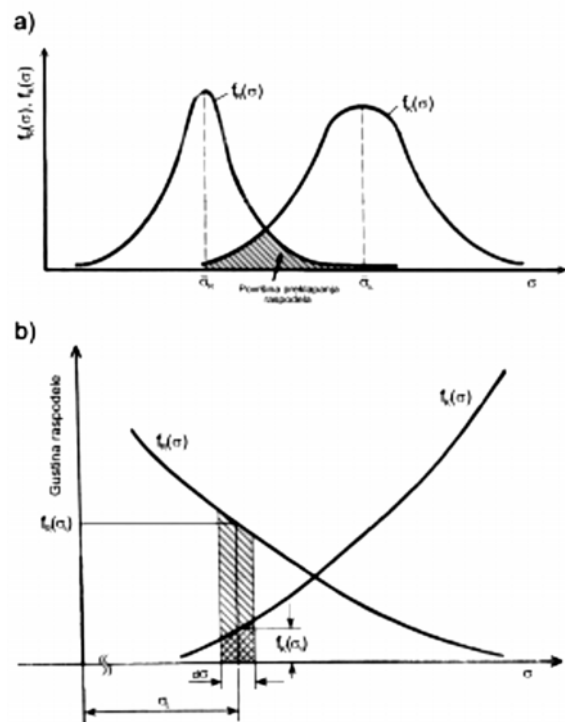
Slika 8. Model oklopnog tela za proračun metodom konačnih elemenata



NAPONI U daN/cm²
 1 - 10; 2 - 145; 3 - 280; 4 - 415; 5 - 550; 6 - 680
 7 - 820; 8 - 955; 9 - 1090; 10 - 1225; 11 - 1360; 12 - 1495

Slika 9. Naponsko stanje oklopnog tela u slučaju statičkog opterećenja

Dinamički proračun tako složenih nosećih konstrukcija kao što je oklopno telo je moguć, ali zahteva veća znanja i rad koji se mora planirati u okviru istraživačkih aktivnosti. Oblast dinamičkog proračuna složenih nosećih konstrukcija metodom konačnih elemenata je jedan od pravaca na kome treba raditi (u svetu se intenzivno radi), jer će u toj oblasti sve manje biti problem brzi računari i dobar softver, a sve više ljudi koji će znati da ih koriste za dobijanje upotrebljivih rezultata.



Slika 10. Preklapanje raspodela radnih i kritičnih napona: a) opšti prikaz raspodela, b) površina preklapanja u uvećanoj razmeri

Na osnovu raspodela radnih opterećenja oklopnog tela

dobijenih ispitivanjima opisanim u prethodnoj tački mogu se realizovati i savremeni proračuni pouzdanosti. Pouzdanost tj. verovatnoća bezotkaznog rada elementa može se oceniti i na osnovu poznatih raspodela slučajnih veličina radnih σ_R i kritičnih* σ_K napona, tj. njihovih funkcija gustine raspodele $f_R(\sigma)$ i $f_K(\sigma)$ prikazanih na sl.10a.

Kao što je poznato verovatnoća bezotkaznog rada se određuje postavljanjem jednog od tri uslova verovatnoće P [4]:

$$P(\sigma_K > \sigma_R), P(\sigma_R < \sigma_K) \text{ ili } P(\sigma_K - \sigma_R > 0) \quad (1)$$

Korišćenjem prvog uslova i dijagrama preklapanja raspodela radnih i kritičnih napona prikazanog na sl. 10b, može se doći do izraza za izračunavanje verovatnoće bezotkaznog rada. Osnovni deo te slike predstavlja površinu preklapanja raspodela u uvećanoj razmeri i odatle se vidi da je verovatnoća toga da se neka vrednost radnog napona σ_R nalazi u malom intervalu oko napona σ_0 širine $d\sigma$:

$$P_1\left(\sigma_0 - \frac{d\sigma}{2} < \sigma_R \leq \sigma_0 + \frac{d\sigma}{2}\right) = f_R(\sigma_0) d\sigma \quad (2)$$

Verovatnoća da kritični napon σ_K prevazilazi neku vrednost radnog napona σ_R , odnosno σ_0 , može da se odredi pomoću izraza:

$$P_2(\sigma_K > \sigma_0) = \int_{\sigma_0}^{\infty} f_K(\sigma) d\sigma \quad (3)$$

Verovatnoća da istovremeno vrednost radnog napona bude u malom intervalu $d\sigma$ i vrednost kritičnog napona σ_K prevazilazi radni napon σ_0 zadat tim intervalom, uz uslov da su obe slučajne veličine (radni i kritični napon) nezavisne, može da se izračuna preko sledećeg izraza:

$$P = P_1 P_2 = f_R(\sigma_0) d\sigma \cdot \int_{\sigma_0}^{\infty} f_K(\sigma) d\sigma \quad (4)$$

Verovatnoća bezotkaznog rada, odnosno pouzdanost R , je verovatnoća da kritični napon σ_K prevazilazi radni napon σ_R za sve moguće vrednosti radnog napona σ , odgovarajući izraz ima sledeći oblik:

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(\sigma) \left[\int_{\sigma}^{\infty} f_K(\sigma) d\sigma \right] d\sigma \quad (5)$$

Isti izraz za verovatnoću bezotkaznog rada može se dobiti i iz uslova da radni napon bude manji od kritičnog ili da razlika kritičnog i radnog napona bude veća od nule [5].

Za poznate teorijske raspodele radnih i kritičnih napona postoje izvedeni analitički izrazi za izračunavanje pouzdanosti, dok se za proizvoljni oblik tih funkcija i empirijske raspodele dobijene ispitivanjima u određenim uslovima eksploatacije, procena verovatnoće bezotkaznog rada može izvršiti po posebnom postupku. Taj postupak podrazumeva izračunavanje funkcija G i H :

$$G = \int_{\sigma}^{\infty} f_K(\sigma) d\sigma = 1 - F_K(\sigma),$$

$$H = \int_0^{\sigma} f_R(\sigma) d\sigma = F_R(\sigma) \quad (6)$$

gde su $F_R(\sigma)$ i $F_K(\sigma)$ funkcije raspodele radnih i kritičnih napona. Korišćenjem definisanih funkcija G i H , verovatnoća bezotkaznog rada može da se izračuna preko izraza:

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(\sigma) [1 - F_K(\sigma)] d\sigma = \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(\sigma) G d\sigma = \int_0^1 G dH \quad (7)$$

Prethodni izraz, uz korišćenje odgovarajućeg programa za računar [4], omogućava proračun pouzdanosti svake mašinske konstrukcije, pa i oklopnog tela ako se raspolaže podacima na osnovu kojih se mogu definisati raspodele radnih opterećenja i kritičnih napona.

Radni naponi u oklopnom telu lakog borbenog vozila se javljaju kao posledica izrazito slučajno promenljivih spoljnjih opterećenja koja zavise od uslova eksploatacije. Na osnovu raspodela radnih opterećenja i proračuna naponskog stanja (metodom konačnih elemenata) mogu se dobiti raspodele radnih napona na kritičnim mestima oklopnog tela.

Raspodele radnih napona merodavnih za proračun pouzdanosti formiraju se na bazi Huber-Mizes-Henkijeve hipoteze o razaranju materijala, koja se koristi za izračunavanje tzv. idealnih (ekvivalentnih) napona na osnovu podataka o komponentnim naponima (σ_x , σ_y , i τ - za ravansko naponsko stanje). Ovo je urađeno u cilju obezbeđenja mogućnosti upoređenja vrednosti radnih napona i podataka o kritičnim naponima na istezanje. Tako se aproksimira uticaj složenog naponskog stanja i izbegavaju se teškoće vezane za njegovu analizu.

Izračunavanje idealnih napona u oklopnom telu na osnovu vrednosti sila i momenata, kao spoljnjih opterećenja, predstavlja rešenje samo prvog dela problema, određivanja raspodele idealnih napona čije rešavanje započinje primenom metode konačnih elemenata (utvrđivanje kritičnih mesta na oklopnom telu na kojima se javljaju maksimalni naponi). U nastavku se, u poseban program za proračun pouzdanosti za sve vrste opterećenja, unosi matrica tzv. naponskih koeficijenata, koji predstavljaju naponu za jedinične vrednosti sila, dobijene proračunom pomoću metode konačnih elemenata.

Kompletan postupak formiranja raspodele idealnih napona na kritičnom mestu točka može se sprovesti na računaru korišćenjem programa POUZD.M [5], a ulazni podaci su matrice već pomenutih naponskih koeficijenata i matrice sa podacima o teorijskim (mogu se dobiti na osnovu empirijskih raspodela korišćenjem posebnog potprograma) ili empirijskim raspodelama merodavnih sila i momenata dobijenih ispitivanjem. U okviru programa postoji i poseban potprogram MIX, koji obezbeđuje komponovanje ili "mešanje" raspodela radnih opterećenja dobijenih na osnovu rezultata ispitivanja na različitim deonicama pruge sa različitim procentualnim učešćima, koja se unose kao ulazni podaci u program.

Izlazni rezultat ovog dela programa je matrica sa podacima o konačnoj raspodeli idealnih napona na

* Pojam "kritični napon" podrazumeva karakteristike čvrstoće materijala konstrukcije bitne za njeno dimenzionisanje.

kritičnom mestu monoblok točka, koja je deo posebno formirane datoteke u spoljnoj memorijskoj jedinici računara.

U vezi sa izborom, odnosno određivanjem raspodele kritičnih napona materijala oklopnog tela, treba reći da su podaci o njima u dostupnoj literaturi vrlo oskudni, tako da je praktično nemoguće dobiti Gudmanove dijagrame [6] ili dijagrama iste verovatnoće razaranja [7], iz kojih bi se na jednostavan način mogla definisati raspodela trajnih dinamičkih čvrstoća materijala točka, kao raspodela kritičnih napona. Proizvođači čelika takve dijagrame raspodele trajne dinamičke čvrstoće rade samo po specijalnoj narudžbi, pošto sprovođenje odgovarajućih ispitivanja po bilo kojoj od tzv. "ubrzanih" metoda (metoda "gore-dole", Proova metoda i dr. [7, 8]) traje vrlo dugo (nekoliko meseci za dovoljno dobre rezultate), pa su potrebna i znatna finansijska sredstva. S druge strane, za složenu zavarenu konstrukciju kao što je oklopno telo, neophodno je formirati Gudmanove dijagrame za niz epruveta koje predstavljaju različite zavarene spojeve (čeonni var, ugaoni var, pločica sa zavarenim tuljkom itd.) [9].

Zbog toga je najrealnije da se raspodela kritičnih napona (trajnih dinamičkih čvrstoća) materijala oklopnog tela dobije na osnovu podataka iz dostupne literature, a da se uzme u obzir pretpostavka da se na raspodelu trajnih dinamičkih čvrstoća može uspešno primeniti normalan zakon raspodele [4,7,8,10,11]. Dakle, problem se svodi na određivanje matematičkog očekivanja i standardnog kvadratnog odstupanja (standardne devijacije), kao parametara normalne raspodele.

Matematičko očekivanje može da se odredi na osnovu podataka za materijal oklopnog tela, ili sličan, za koji postoji Smitov dijagram [12] formiran na osnovu podataka o granici razvlačenja materijala i podataka o srednjem naponu određenom iz raspodele idealnih napona (osnove za proračun treba da budu režimi opterećenja dobijeni u okviru programiranih istraživanja). Standardno kvadratno odstupanje se može odrediti korišćenjem empirijskog izraza zavisnosti verovatnoće razaranja od posmatranog broja ciklusa do razaranja N i odnosa amplitudnog napona (dinamičke čvrstoće za naizmenično promenljivo opterećenje) σ_a i zatezne čvrstoće σ_m [7]:

$$P = 1 - \exp \left\{ - \left[\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_m} - 8,53 N^{-0,386} \right) / 0,233 \right]^{11,9} \right\} \quad (8)$$

Korišćenjem ovog izraza može se za svako N dobiti raspodela dinamičkih čvrstoća materijala, a za $N=10^7$ i raspodela trajnih dinamičkih čvrstoća.

Na osnovu prethodnih podataka i podataka o maksimalnoj i minimalnoj vrednosti trajne dinamičke čvrstoće (ove vrednosti su definisane kao: matematičko očekivanje \pm četvorostruko standardno kvadratno odstupanje [4]), korišćenjem odgovarajućeg potprograma u okviru programa POUZD.M, mogu se formirati podaci o raspodeli kritičnih napona za proračun pouzdanosti oklopnog tela i dalju analizu uticaja režima opterećenja na njegovu pouzdanost.

Zaključak

Projektovanje oklopnih tela borbenih vozila, a posebno lakih brzohodnih guseničnih vozila, karakteriše:

- primena spektra naučnih disciplina, koje se moraju primenjivati u toku istraživanja i razvoja oklopne zaštite, i potreba za multidisciplinarnim obrazovanjem stručnjaka koji rade neposredno na projektovanju oklopnih tela,
- složenost postupaka projektovanja zbog veze oklopnog tela sa svim ostalim podsistemima vozila,
- primena savremenih metoda proračuna zbog obezbeđenja zahteva koji se odnose na krutost, čvrstoću i pouzdanost.

Proračuni krutosti i čvrstoće oklopnog tela mogu da se brzo i efikasno realizuju pomoću (sada već masovno primenjene) metode konačnih elemenata, uz obezbeđenje podataka o merodavnim opterećenjima koji se mogu dobiti kao rezultat teorijske analize i ispitivanja na vozilima iste vrste i kategorije u realnim eksploatacijskim uslovima.

Ispitivanja u eksploataciji su uslov za realizaciju proračuna pouzdanosti. Na osnovu podataka ispitivanja mogu da se formiraju raspodele opterećenja, a korišćenjem izloženih postupaka i podataka o raspodelama kritičnih napona primenjenih materijala sprovedu proračuni pouzdanosti, korišćenjem već razvijenog programa POUZD.M. Postupak zahteva proveru u toku posebnog istraživačkog projekta koji treba realizovati.

Literatura

- [1] LAIBLE R.C. *Balistic materials and penetration mechanics*, Elsevier scientific publishing company. Amsterdam - Oxford - New York, 1980.
- [2] DRAGOJEVIĆ, M. *Tenkovi i borbeno vozila pešadije*. Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, 1986.
- [3] MILUTINOVIĆ, D. Režimi opterećenja guseničnog kretača brzohodnih guseničnih vozila u realnim uslovima eksploatacije. *Naučnotehnički pregled*, 1989, vol. XXIX, no.3, p.3-11.
- [4] KAPUR, K., LAMBERSON, L. *Reliability in Engineering Design*. John Wiley & Sons, New York, Santa Barbara, London, Sydney, Toronto, 1977.
- [5] MILUTINOVIĆ, D. Program POUZD.M za analizu odnosa režima opterećenja i pouzdanosti. *Naučnotehnički pregled*, 1997, vol. XLVII, no.3, p.7-12.
- [6] KECECIOGLU, D. *Pouzdanost, predviđanje pouzdanosti, ispitivanje pouzdanosti i konstruisanje po principima pouzdanosti* (prema predavanjima D. Kececioglua, profesora Univerziteta Arizone, Tucson, USA, održanim na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu od 7. do 13. maja 1972. godine), Beograd, 1972, Saobraćajni fakultet.
- [7] COLLINS, J.A. *Failure of Materials in Mechanical Design - Analysis, Prediction*. Prevention, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1981.
- [8] VEJBULL, V. *Uсталostnye ispytaniya i analiz ih rezul'tatov* Moskva, Mašinstroenie, 1964.
- [9] LELUAN, A., RIMBAUD, M., TOURRADE, J.C. Vers une codification du dimensionnement des bogies ferroviaires. *Revue générale des chemins de fer*, 1994., octobre.
- [10] KOGAEV, V.P. *Rasčety na pročnost' pri naprjaženijah, peremennyh vo vremeni* Moskva, Mašinstroenie, 1977.
- [11] DALJA, V., grupa autora pod red. *Povedenie stali pri cikličeskijh nagruzah*. Moskva, Metallurgija, 1983.
- [12] TRBOJEVIĆ, M.D. *Osnovi konstruisanja* Mašinski fakultet, Beograd, 1968.