

Dijana Damljanović,
dipl. inž.
dr Slavica Ristić,
dipl. inž.
Vojnotehnički institut,
Beograd

EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE AERODINAMIČKIH KARAKTERISTIKA MODELA LASERSKI VOĐENE BOMBE

UDC: 533.665 : 623.451.74

Rezime:

U radu su prikazani rezultati merenja aerodinamičkih sila i momenata, kao i vizualizacija strujanja u graničnom sloju na krlima i krmilima modela laserski vođene bombe. Ispitivanje je izvršeno u aerotunelu T-38. Analiziran je uticaj rastojanja vrha konusa tela, u odnosu na sekciju krmila, na aerodinamičke karakteristike modela za dva Mahova broja $M_\infty = 0,8$ i $0,9$ i otklon krmila $\delta = 15^\circ$. Normalne sile koje se javljaju na modelu i krmilu merene su unutrašnjim aerovagama. Dobijeni rezultati merenja normalne sile na modelu i posebno na krmilu povezani su sa rezultatima vizualizacije strujanja metodom uljnih premaza. Priložene fotografije vizualizacije strujanja ilustruju promene strujanja oko modela i potvrđuju rezultate aerodinamičkih merenja.

Ključne reči: aerotunel, laserski vođena bomba, aerodinamički koeficijenti, vizualizacija strujanja.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE LASER GUIDED BOMB MODEL

Summary:

Aerodynamic test results and boundary layer flow visualization on the wings and fins of laser guided bomb model are presented in this article. Test was performed in the T-38 wind tunnel. Influence of fin position relative to conic top of the model on aerodynamic characteristics was analyzed. Analysis was performed on aerodynamic characteristics of the model for two Mach numbers $M_\infty = 0,8$ and $0,9$ and fin deflection $\delta = 15^\circ$. Normal forces present on the model and fin were measured by internal strain gauge balances. Obtained test results of normal force on the model and especially on the fin were associated with flow visualization results, which were performed by oil emulsion method. Presented images of flow visualization show changes of the flow around the model and confirm the results of the aerodynamic measurements.

Key words: wind tunnel, laser guided bomb, aerodynamic coefficients, flow visualization.

Uvod

Razvoj savremenih letelica i projektila zahteva široku paletu teorijskih, numeričkih i eksperimentalnih metoda ispitivanja u svim fazama projektovanja, izrade i testiranja letelica. U svetu se, i pored brze ekspanzije numeričkih metoda podržanih moćnim računarima, značajna

pažnja i ulaganja posvećuju eksperimentalnim ispitivanjima, koja se vrše u slobodnom letu ili u aerodinamičkim tunelima [1–12].

U aerodinamičkom tunelu T-38 Vojnotehničkog instituta (VTI) izvršena su eksperimentalna ispitivanja modela laserski vođene bombe (LVB) u podzvučnoj i okozvučnoj oblasti brzina strujanja

u opsegu napadnih uglova -12° do $+15^\circ$ [12]. Cilj ispitivanja bio je da se odrede aerodinamički koeficijenti modela i posebno krmila. Početna ispitivanja ukazala su na to da je potrebno izvršiti određene modifikacije na modelu, pa je on ispitan u dve različito formirane konfiguracije (osnovna i modifikovana) koja uključuje montirani prsten ispred upravljačke sekcije krmila. U ovom radu prikazani su rezultati dobijeni za koeficijente normalne sile C_z modela, C_{zk} krmila i koeficijent momenta propinjanja C_m modela.

Eksperiment je pokazao da, za osnovnu konfiguraciju modela, zavisnost koeficijenta normalne sile krmila C_{zk} od napadnog ugla modela α i ugla otklona krmila δ_4 na $M_\infty=0,8$, karakteriše glatkost krivih i jasno izražen gubitak uzgona, a na $M_\infty=0,9$ krive zavisnosti $C_{zk}=f(\alpha, \delta_4)$ nisu glatke, a gubitak uzgona se javlja na mnogo manjim napadnim uglovima.

Eksperimentalne krive zavisnosti koeficijenta normalne sile C_z osnovne konfiguracije modela LVB od napadnog ugla na Mahovim brojevima $M_\infty=0,8$ i $0,9$ ne pokazuju odstupanja u pogledu linearnosti i gubitka uzgona. Međutim, odstupanja se javljaju na koeficijentu momenta propinjanja C_m modela.

Pod pretpostavkom da je karakter krivih aerodinamičkih koeficijenata krmila i modela, u zavisnosti od napadnog ugla, posledica uticaja položaja konusnog vrha u odnosu na upravljačku sekciju krmila, izvršeno je ispitivanje modifikovane konfiguracije modela.

U program ispitivanja uključena je i vizualizacija strujanja u graničnom sloju kako bi se dobio uvid u strujanje oko modela, posebno na krmilima. U radu je

prikazana komparativna analiza rezultata merenja aerodinamičkih koeficijenata i snimaka strujnog polja.

U radu su korišćene sledeće oznake:

M_∞ – nominalni Mahov broj u radnom delu aerotunela T-38,

d – referentni prečnik modela (m),

P_o – zaustavni pritisak u radnom delu aerotunela T-38 (bar),

α_n – nominalni ukupni napadni ugao modela ($^\circ$),

α – ukupni napadni ugao modela ($^\circ$),

δ – ugao otklona krmila ($^\circ$),

δ_4 – ugao otklona mernog krmila ($^\circ$),

$\delta_{2,4}$ – ugao otklona horizontalnih krmila ($^\circ$),

C_z – koeficijent normalne sile modela,

C_{zk} – koeficijent normalne sile krmila,

C_m – koeficijent momenta propinjanja modela,

POZPRS – parametar modela,

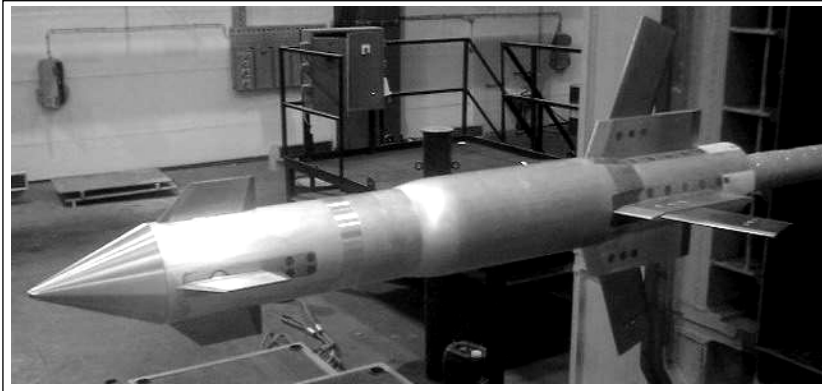
LVB – laserski vođena bomba,

∞ – oznaka za parametre neporemećenog strujanja.

Opis eksperimenta

Model LVB

Model LVB se sastoji od trostepenog cilindričnog tela sa konusnim vrhom, upravljačkom sekcijom i krilnom sekcijom [1]. Fotografija modela u radnom delu aerotunela T-38 prikazana je na slici 1. U upravljačkoj sekciji nalaze se četiri krmila sa mogućnošću diskretnog otklanjanja oko svoje šarnirne ose. Omogućeno je fiksno postavljanje upravljačkih krmila na sedam pozicija definisanih otklona δ u intervalu $\pm 15^\circ$ sa korakom 5° u odnosu na osu modela. Zadnja sekcija modela sastoji se od četiri nosača krila i krila postavljene



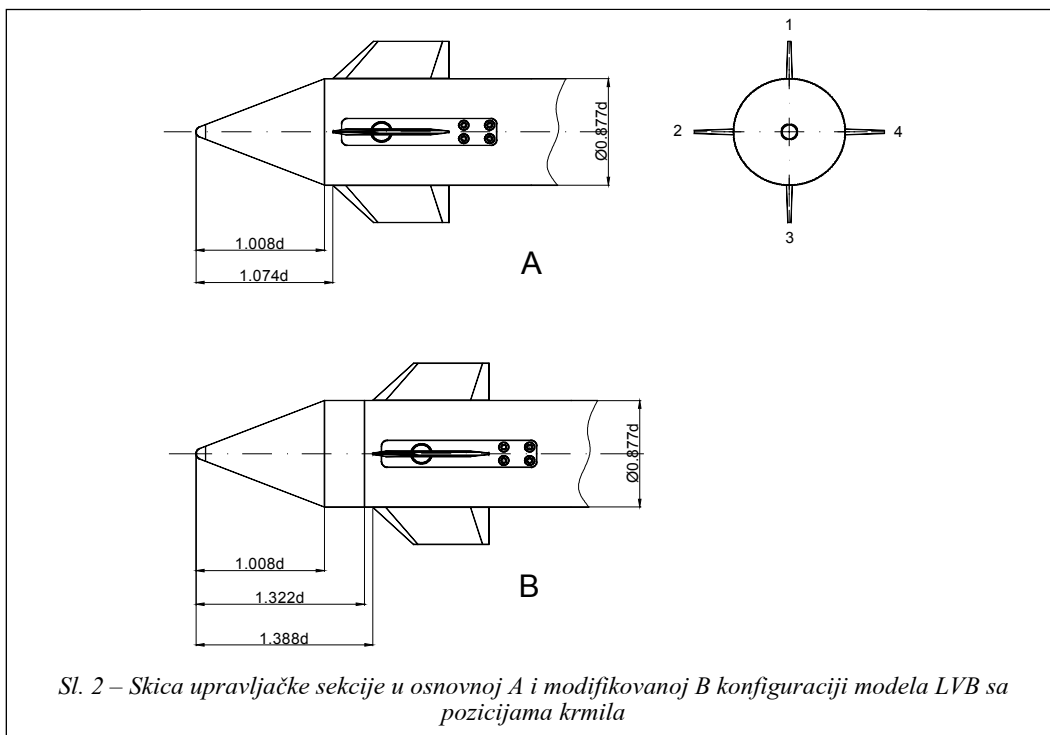
Sl. 1 – Osnovna konfiguracija modela LVB u radnom delu aerotunela T-38

nih na 90° po obimu trupa. Krilna sekcija je fiksna bez mogućnosti otklanjanja. Za nulti postavni ugao valjanja model je u tzv. „+“ poziciji.

Model je modularne konstrukcije i moguće je ispitivanje različito formiranih konfiguracija. Na slici 2 date su upravljačke sekcije krmila u osnovnoj A i

modifikovanoj B konfiguraciji modela sa pozicijama krmila.

Parametar konfiguracije modela koji označava prisustvo prstenova koji obezbeđuju potrebnu dužinu modela POZPRS je različit za ispitivane konfiguracije. Parametar POZPRS ima oznaku 23 za osnovnu (položaj upravljačke sekcije u



Sl. 2 – Skica upravljačke sekcije u osnovnoj A i modifikovanoj B konfiguraciji modela LVB sa pozicijama krmila

odnosu na vrh modela je 1,074d) i 123 za modifikovanu konfiguraciju modela (položaj upravljačke sekcije u odnosu na vrh modela je 1,388d). Prsten prečnika 0,877d i širine 0,314d montiran je ispred upravljačke sekcije i uključen je u konfiguraciju modela radi utvrđivanja uticaja konusnog vrha na aerodinamičke karakteristike krmila.

Model LVB projektovan je, proizveden, proveren i sastavljen u Vojnotehničkom institutu.

Model je preko stinga postavljen na mehanizam za promenu ugla propinjanja i valjanja u radni deo aerotunela T-38.

Aerotunel T-38

Aerotunel T-38 u VTI je prekidnog dejstva sa natpritiskom i radnim delom kvadratnog poprečnog preseka dimenzija 1,5 m x 1,5 m [2]. Opseg Mahovih brojeva koji se može postići u radnom delu je od 0,2 do 4,0 s Rejnoldsovim brojem do 115 miliona po metru. Regulacija i održavanje Mahovog broja je $\pm 0,3\%$ od zadate nominalne vrednosti.

Zaustavni pritisak P_0 u radnom delu može biti između 1,1 bar i 15 bar, što zavisi od Mahovog broja, sa tačnošću regulacije $\pm 0,3\%$ nominalne vrednosti. Vreme duvanja (rafala) t je od 6 s do 60 s i zavisi od Mahovog broja i pritiska duvanja.

Model je preko stinga fiksiran za sistem za promenu napadnog ugla i ugla valjanja. Ovaj mehanizam omogućava promenu napadnog ugla od -12° do $+21^\circ$ u propinjanju i od 0° do 360° u valjanju. U toku rafala model može da se kreće u kontinualnom modu ili modu „korak po korak“ (od ugla do ugla).

Instrumentacija i prikupljanje podataka

Potrebni pritisci mere se apsolutnim i diferencijalnim davačima tipa Mensor i Druck različitog opsega. Nelinearnost i histerezis ovih davača je oko 0,02% punog opsega.

Precizni davači pozicije, tzv. rizoverti, montirani su u mehanizam za promenu napadnog ugla i ugla valjanja. Tačnost sistema za očitavanje napadnog ugla je $\pm 0,05^\circ$, a za ugao valjanja $\pm 0,25^\circ$.

Za merenje aerodinamičkih sila i momenata na modelu korišćena je šestokomponentna aerovaga VTI40A, koja je montirana na sting prečnika 48 mm. Njena tačnost iznosi 0,3% punog opsega, a baždarena je pre testa [3].

Normalna sila, moment savijanja i šarniri moment na horizontalnom upravljačkom krmilu, pozicija 4 (slika 2), mereni su trokomponentnom aerovagom. Njena tačnost je 0,2% punog opsega, a baždarena je pre testa [4].

Sistem za prikupljanje podataka sastoji se od 64-kanalnog sistema tipa Teledyne pod kontrolom računara PC Compaq. Izabrano je odgovarajuće pojačanje i postavljeni su filteri odgovarajuće granične učestanosti. Podaci sa svih analognih kanala digitalizuju se A/D konvertorom rezolucije 16 bita. Svi kanali očitavani su istom brzinom od 200 podataka u sekundi.

Digitalizovani podaci primaju se na računar Compaq Alpha Server DS20E i zapisuju na disk za kasniju obradu.

Obrada podataka

Obrada podataka vrši se posle svakog duvanja standardnim softverskim pa-

ketom T38-APS za obradu merenja u aerotunelima VTI. Obrada se izvodi u nekoliko faza: čitanje zabeleženih sirovih podataka, normalizacija i prevođenje u standardni format, određivanje parametara strujanja, položaja modela i aerodinamičkih koeficijenata. Svaka faza obrade izvodi se posebnim softverskim modulom.

Aerodinamički koeficijenti modela i posebno krmila prikazani su u vezanom koordinatnom sistemu. Koordinatni početak ovog sistema je u izabranoj referentnoj tački modela, odnosno krmila. Ose X_B , Y_B , Z_B su paralelne odgovarajućim osama koordinatnog sistema aerovaga koje su vezane za model. Osa X_B je paralelna sa uzdužnom osom modela i usmerena prema njegovom zadnjem delu. Osa Z_B je paralelna sa ravni simetrije modela i usmerena nagore. Y_B osa je usmerena prema levoj strani modela i sa druge dve ose čini levi koordinatni sistem. Ugao α je ugao između X_B ose i projekcije vektora brzine strujanja na $X_B Z_B$ ravan. Ugao α je pozitivan kada je projekcija brzine vazduha na Z_B osu pozitivna.

Ugao između ravni simetrije krmila i $X_B Y_B$ ravni vezanog koordinatnog sistema krmila odgovara uglu otklona krmila δ . Otkloni upravljačkih krmila δ definisani su kao pozitivni ako se, posmatrano duž pojedinačne šarnirne ose, krmila otklanjaju suprotno od kretanja kazaljke na časovniku.

Vizualizacija strujanja

Izabrana metoda vizualizacije strujanja u graničnom sloju zasniva se na uljnim premazima. Metoda ima dugu tradiciju u eksperimentalnoj aerodinamici [5–11]. Da bi se obezbedila maksimalna vidljivost

efekata vizualizacije strujanja na ispitivnom modelu, bilo je neophodno da se model pripremi tokom izrade, odnosno da se njegova površina zacrni. Kako je vizualizacija naknadno dodata programu ispitivanja bilo je nepraktično menjati postavku i doradivati model. Zbog toga se pristupilo vizualizaciji bez prethodne pripreme modela, iako se unapred znalo da će dobijeni efekti biti manje uočljivi na fotografijama. U eksperimentu su korišćena tri tipa pigmenata: prah titanijum oksida TiO_2 , prah titanijum oksida TiO_2 sa dodatkom anilinske, ljubičaste boje i grafit.

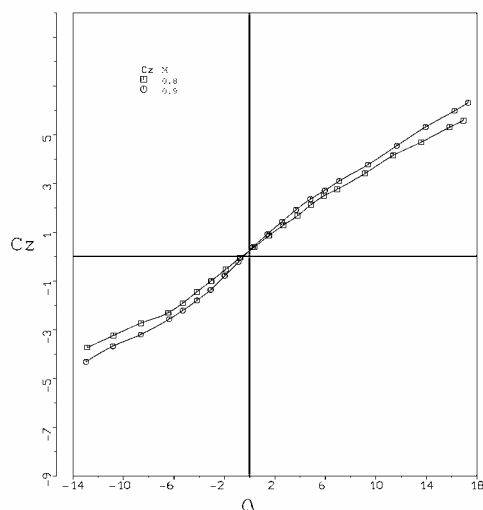
U osnovi svih premaza je parafinsko ulje i oleinska kiselina. Vizualizacija strujanja vršena je po površini celog modela. Premaz se nanosio tačkasto, diskretno pomoću četkice na desnu stranu modela i kontinuirano sunderom na levu stranu modela [11].

Izabrana su dva napadna ugla modela $\alpha_n=0^\circ$ i $\alpha_n=7^\circ$. Model se postavljao u željeni položaj pre nego što krene struja vazduha. U tom položaju ostaje za vreme rafala i nakon završetka rada aerotunela. Model je bio na nultom uglu valjanja tokom kompletnog ispitivanja. Ukupno vreme duvanja bilo je 25 s, što je dovoljno za razmazivanje uljnih premaza. Vizualizacija je izvršena za Mahove brojeve $M_\infty=0,8$ i $0,9$. Posle svakog rafala aerotunel se otvarao i model fotografisao digitalnim fotoaparatom.

Analiza rezultata

Analiza rezultata merenja aerodinamičkih sila i momenata

Tokom eksperimenta određeni su svi relevantni aerodinamički koeficijenti



Sl. 3 – Dijagram koeficijenta normalne sile $C_z=f(\alpha)$ za osnovnu konfiguraciju modela LVB na $M_\infty=0,8$ i $0,9$

modela, a u ovom radu analizirani su samo koeficijenti C_z , C_{zk} i C_m . Pretpostavljeno je da je poremećaj strujanja, koji se javlja oko krmila u osnovnoj konfiguraciji modela na Mahovom broju $M_\infty=0,9$, posledica uticaja konusnog vrha modela. Izvršena su ispitivanja modifikovane konfiguracije modela, sa prstenom ispred sekcije krmila, na Mahovom broju $M_\infty=0,9$ i maksimalnim otklonom horizontalnih krmila $\delta_{2,4}=\pm 15^\circ$ da bi se ustanovili registrovani efekti interferencije. Slike 3 do 8 prikazuju rezultate aerodinamičkih merenja u formi dijagrama.

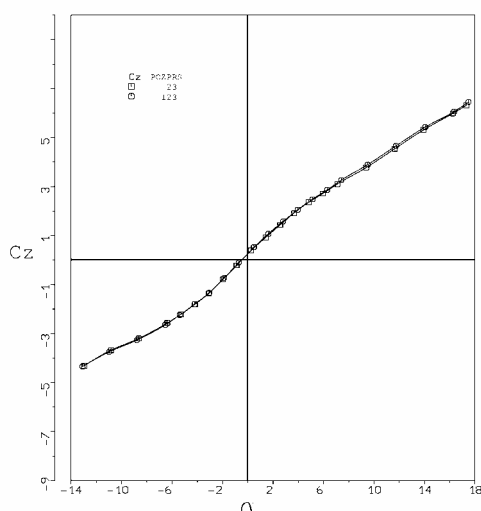
Na slici 3 prikazane su krive zavisnosti koeficijenta normalne sile modela C_z od napadnog ugla α na Mahovim brojevima $M_\infty=0,8$ i $0,9$ za osnovnu konfiguraciju modela sa otklonjenim horizontalnim krmilima $\delta_{2,4}=\pm 15^\circ$. Dobijene eksperimentalne krive su glatke i približno linearne u opsegu malih napadnih uglova.

Na slici 4 prikazane su krive zavisnosti koeficijenta normalne sile modela C_z od

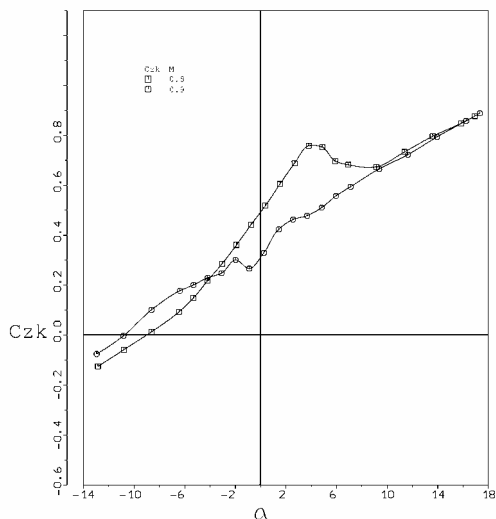
napadnog ugla α na Mahovom broju $M_\infty=0,9$ za osnovnu i modifikovanu konfiguraciju modela sa otklonjenim horizontalnim krmilima $\delta_{2,4}=\pm 15^\circ$. Dobijene eksperimentalne krive ne pokazuju značajna međusobna odstupanja. Montiran prsten ispred sekcije krmila u modifikovanoj konfiguraciji modela LVB ne utiče značajno na koeficijent normalne sile modela.

Na slici 5 prikazani su uporedni dijagrami aerodinamičkog koeficijenta C_{zk} mernog krmila sa otklonom $\delta_4=-15^\circ$ na Mahovim brojevima $M_\infty=0,8$ i $0,9$ za osnovnu konfiguraciju modela. Analiza ovih dijagrama pokazuje da je dobijena eksperimentalna kriva za $M_\infty=0,8$ glatka, približno linearna u opsegu malih napadnih uglova i sa jasno izraženim gubitkom uzgona na oko $\alpha=4^\circ$. Eksperimentalnu krivu za $M_\infty=0,9$ karakteriše promenljiv gradijent i raniji pad C_{zk} .

Na slici 6 prikazani su uporedni dijagrami aerodinamičkog koeficijenta C_{zk} krmila sa otklonom $\delta_4=-15^\circ$ na Maho-



Sl. 4 – Dijagram koeficijenta normalne sile $C_z=f(\alpha)$ za osnovnu i modifikovanu konfiguraciju modela LVB na $M_\infty=0,9$

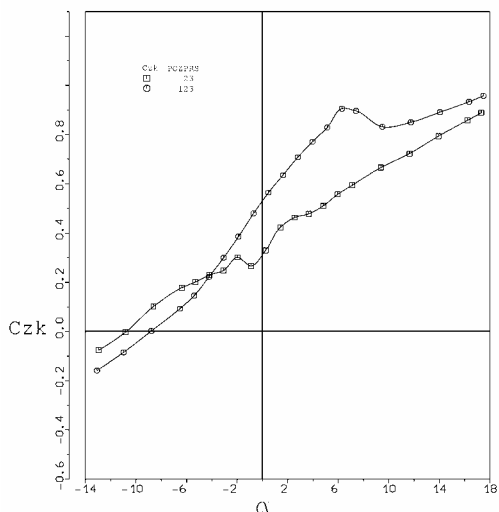


Sl. 5 – Dijagram koeficijenta normalne sile krmila $C_{zk}=f(\alpha)$ sa uglom otklona $\delta_4=-15^\circ$ za osnovnu konfiguraciju modela LVB na $M_\infty=0,8$ i $0,9$

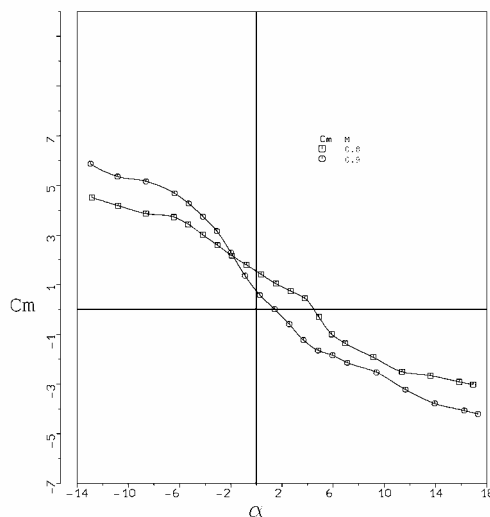
vom broju $M_\infty=0,9$ za osnovnu i modifikovanu konfiguraciju modela. Dobijene eksperimentalne krive pokazuju značajna međusobna odstupanja. Eksperimentalna kriva aerodinamičkog koeficijenta C_{zk} kr-

mila u modifikovanoj konfiguraciji modela je glatka, linearna u opsegu malih napadnih uglova i sa jasno izraženim gubitkom uzgona na oko $\alpha=7^\circ$. Gubitak uzgona na krmilu na $M_\infty=0,8$ u osnovnoj konfiguraciji modela koji se javio na $\alpha=4^\circ$ odložen je na $\alpha=7^\circ$ na $M_\infty=0,9$ u modifikovanoj konfiguraciji modela.

Na slici 7 prikazane su krive zavisnosti koeficijenta momenta propinjanja modela $C_m=f(\alpha)$ na Mahovom broju $M_\infty=0,9$. Poremećaj sile na otklonjenim krmilima uticao je na moment propinjanja modela. Dobijena eksperimentalna kriva $C_m=f(\alpha)$ na $M_\infty=0,9$ u odnosu na $M_\infty=0,8$ je blago translirana ka nižim vrednostima C_m . Za $\alpha=0^\circ$ na $M_\infty=0,9$ vrednost C_m je oko 0,8 i znatno je manja nego na $M_\infty=0,8$ gde iznosi oko 1,6.



Sl. 6 – Dijagram koeficijenta normalne sile krmila $C_{zk}=f(\alpha)$ sa uglom otklona $\delta_4=-15^\circ$ za osnovnu i modifikovanu konfiguraciju modela LVB na $M_\infty=0,9$



Sl. 7 – Dijagram koeficijenta momenta propinjanja $C_m=f(\alpha)$ za osnovnu konfiguraciju modela LVB na $M_\infty=0,8$ i $0,9$

Na slici 8 prikazane su krive zavisnosti koeficijenta momenta propinjanja modela C_m od napadnog ugla α na Mahovom broju $M_\infty=0,9$ za osnovnu i modificovanu konfiguraciju modela. Dobijene eksperimentalne krive pokazuju međusobna odstupanja. Montiran prsten ispred sekcije krmila u modificovanoj konfiguraciji modela LVB utiče na karakter krive koeficijenta momenta propinjanja modela. Krive su glatke u opsegu malih napadnih uglova. Za $\alpha=0^\circ$ na $M_\infty=0,9$ vrednost C_m osnovne konfiguracije modela je oko 0,8 dok u modificovanoj konfiguraciji iznosi oko 1,6.

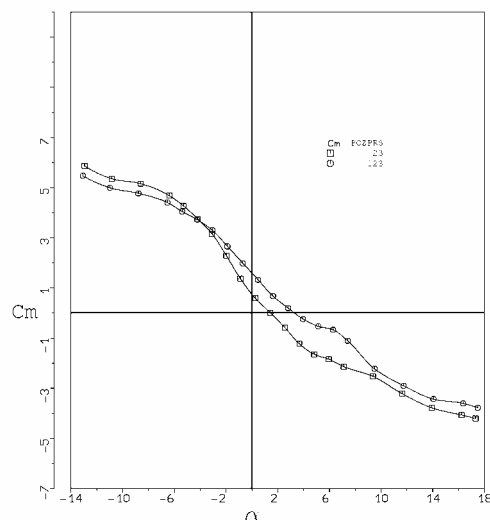
Gradijent krive koeficijenta momenta u modificovanoj konfiguraciji na $M_\infty=0,9$ je veći nego u osnovnoj konfiguraciji modela na $M_\infty=0,8$. Za $\alpha=0^\circ$ na $M_\infty=0,9$ dobijena vrednost C_m modificovane konfiguracije modela je bliska vrednosti C_m osnovne konfiguracije modela na $M_\infty=0,8$ i iznosi oko 1,6.

Analiza ovih dijagrama navodi na zaključak da su poremećaji strujnog polja izraženiji sa porastom Mahovog broja, kada se krmila nalaze bliže vrhu modela. Poremećaji strujnog polja, koji se javljaju u zoni sekcije krmila, znatno utiču na aerodinamičke karakteristike krmila i modela. Doprinos krmila ukupnom uzgonu modela je mali, ali znatno utiče na ukupni moment propinjanja.

Merenjem aerodinamičkih sila i momenata ne može se doći do preciznog uvida u fenomenologiju pojave. Zbog toga je program ispitivanja proširen uvođenjem dopunske metode koja vrši vizualizaciju strujanja oko modela LVB.

Analiza snimaka efekata vizualizacije strujanja

Radi sagledavanja fizikalnosti promena strujanja koje nastaju u graničnom



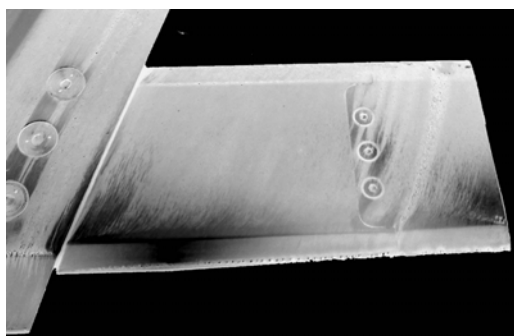
Sl. 8 – Dijagram koeficijenta momenta propinjanja $C_m=f(\alpha)$ za osnovnu i modificovanu konfiguraciju modela LVB na $M_\infty=0,9$

sloju oko modela LVB, vizualizacija strujanja izvršena je za dva Mahova broja $M_\infty=0,8$ i $0,9$ i dve konfiguracije modela LVB, osnovnu i modificovanu. Zbog tehnologije merenja aerodinamičkih sila i momenata, s jedne strane, i vizualizacije, s druge strane, ove dve metode nisu mogle biti korišćene istovremeno.

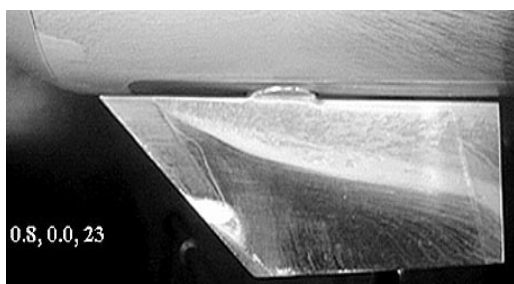
Otklon δ horizontalnih krmila u svim duvanjima tokom vizualizacije bio je 15° (izlazna ivica krmila nadole), odnosno isto kao i u ispitivanjima sa aerodinamičkim merenjima.

Za analizu strujanja oko modela LVB izabrane su vizualizirane strujne slike na gornjaci horizontalnog krila i horizontalnih krmila sa pozicijom 4 (slika 2).

Strujne slike na gornjaci krila i krmila u osnovnoj konfiguraciji modela na Mahovom broju $M_\infty=0,8$ prikazane su na slici 9 za $\alpha=0,42^\circ$ i na slici 12 za $\alpha=7,07^\circ$, na Mahovom broju $M_\infty=0,9$ prikazane su na slici 10 za $\alpha=0,29^\circ$ i na slici 13 za



a



b

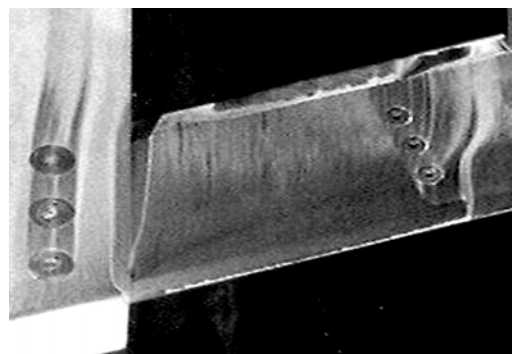
Sl. 9 – Strujna slika na krilu i krmilu modela LVB, $M_\infty=0,8$; $P_0=2,3$ bar; $POZPRS=23$; $\alpha=0,42^\circ$

$\alpha=7,22^\circ$. Na slici 11 prikazane su fotografije vizualizacije strujanja na gornjaci krila i krmila u modifikovanoj konfiguraciji modela na Mahovom broju $M_\infty=0,9$ za $\alpha=0,50^\circ$ i na slici 14 za $\alpha=7,56^\circ$.

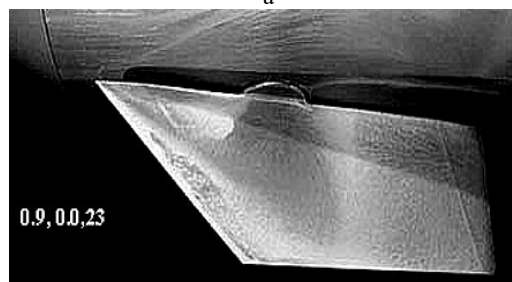
Analiza strujnih slika veoma je kompleksna. U radu su prikazani snimci strujanja oko horizontalnog krila i krmila na kojem su vršena merenja koeficijenta normalne sile C_{zk} . Treba naglasiti da se radi o trodimenzionalnom, transoničnom $M_\infty=0,8$ i $0,9$ strujanju. Krila i krmila nalaze se u zoni uticaja trupa modela i ekspanzionih talasa koji se formiraju na krajevima konusnog vrha modela.

Strujne slike na fotografijama 9, 10 i 11 razlikuju se, što je u saglasnosti sa rezultatima aerodinamičkih merenja. Posebno je izražena razlika strujnih slika na gornjaci krmila. Za nulti napadni ugao

(slika 9b) postoji veoma široka površina laminarnog strujanja (na dijagramu na slici 5 se vidi da je za $\alpha=0,42^\circ$ na $M_\infty=0,8$ C_{zk} u linearnom delu krive sa pozitivnim gradijentom). Za osnovnu konfiguraciju modela na $M_\infty=0,9$ strujanje je u najvećoj meri turbulentno. Na slici 10b se vidi da postoje dve zone otcepljenja struje, jedna na napadnoj ivici, a druga oko 50% tetive. Na dijagramu na slici 5 može se primetiti da oko ugla $\alpha=-1^\circ$ dolazi do pojave gubitka uzgona. Za modifikovanu konfiguraciju modela vrednosti C_{zk} za $\alpha=-1^\circ$ nalaze se u linearnom delu krive sa pozitivnim gradijentom (slika 6). Na slici 11b vidi se da je strujanje u najvećem delu laminarno, osim oko napadne ivice, i da je veoma slično strujanju za $M_\infty=0,8$, kada je model u osnovnoj konfiguraciji (slika 9b).

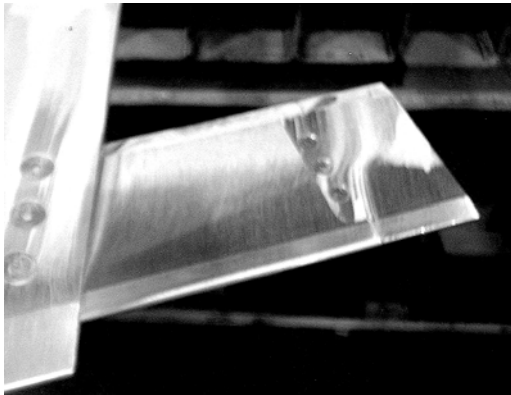


a

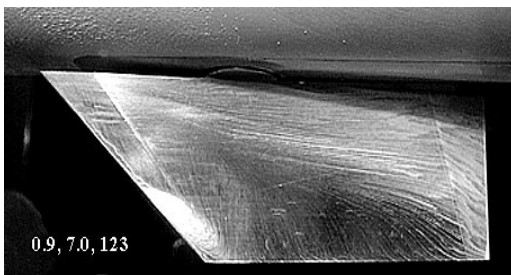


b

Sl. 10 – Strujna slika na krilu i krmilu modela LVB, $M_\infty=0,9$; $P_0=2,3$ bar; $POZPRS=23$; $\alpha=0,29^\circ$



a



b

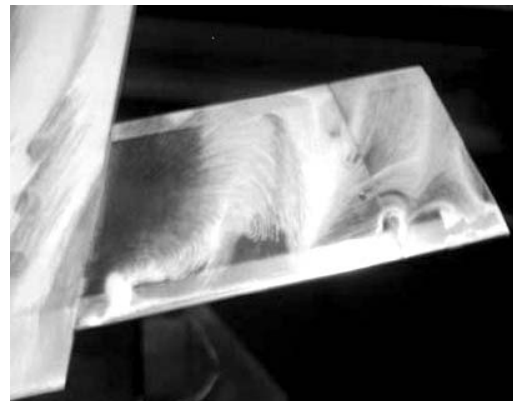
Sl. 11 – Strujna slika na krilu i krmilu modela LVB, $M_\infty=0,9$; $P_o=2,3$ bar; $POZPRS=123$; $\alpha=0,50^\circ$

Time se potvrđuje da je ubačeni prsten ispred krmila odložio gubitak uzgona. Analiza strujne slike na krilima (slike 10a–11a), pre i posle ubacivanja prstena, pokazuje da ne postoji značajan uticaj na strujanje oko krila, što je u saglasnosti sa rezultatima merenja normalne sile na modelu (dijagram na slici 4).

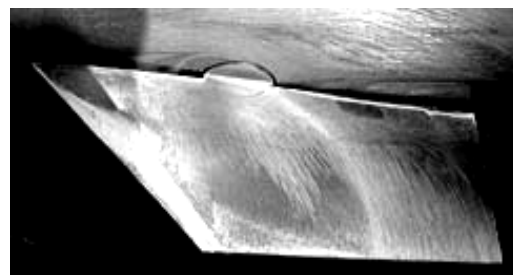
Na slici 5 vrednost C_{zk} krmila u osnovnoj konfiguraciji modela na $M_\infty=0,8$ i uglu $\alpha=0,42^\circ$ iznosi 0,519. Na slici 6 vrednost C_{zk} krmila u modifikovanoj konfiguraciji modela na $M_\infty=0,9$ i uglu $\alpha=0,50^\circ$ iznosi 0,565. Sličnost strujanja na priloženim fotografijama (slike 9b i 11b) potvrđuje malu razliku numeričkih vrednosti C_{zk} .

Za $M_\infty=0,8$ i $0,9$ na $\alpha=7,07^\circ$ strujanje je komplikovanije, kako na krilima, tako i na krmilima u odnosu na strujanje kada je $\alpha\sim 0^\circ$. Slike 12a–14a pokazuju da je strujanje na gornjaci krila u najvećem delu turbulentno, da se javljaju lokalni udarni talasi i da ne postoji znatna razlika između osnovne i modifikovane konfiguracije. Na dijagramu na slici 4 takode se vidi da ne postoji razlika u koeficijentu C_z za ispitivane konfiguracije.

Strujanje na gornjaci krmila koje je prikazano na slikama 12b–14b, pokazuje da odvajanje graničnog sloja nastaje na samoj napadnoj ivici. Granični sloj je turbulentan na najvećem delu površine krmila. Prelivanje sa donjake izraženo je na izlaznoj ivici i sve to doprinosi padu koeficijenta C_{zk} koji se može uočiti i na dijagramu na slici 5.



a

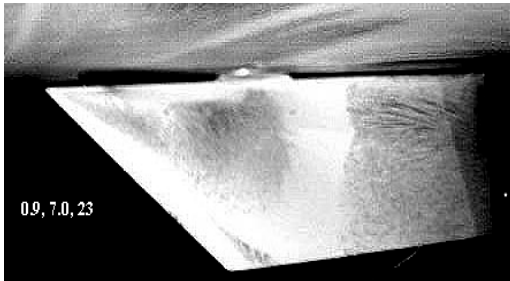


b

Sl. 12 – Strujna slika na krilu i krmilu modela LVB, $M_\infty=0,8$; $P_o=2,3$ bar; $POZPRS=23$; $\alpha=7,07^\circ$



a



b

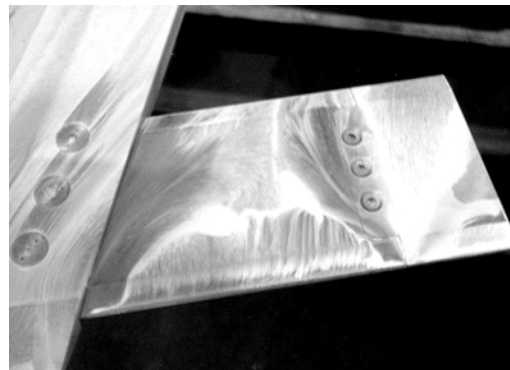
Sl. 13 – Strujna slika na krilu i krmilu modela LVB, $M_\infty=0,9$; $Po=2,3$ bar; $POZPRS=23$; $\alpha=7,22^\circ$

Koeficijent normalne sile krmila C_{zk} (slika 6) na $M_\infty=0,9$ i uglu $\alpha=7,22^\circ$ ima vrednost 0,594 za osnovnu i na uglu $\alpha=7,56^\circ$ vrednost 0,896 za modifikovanu konfiguraciju modela. Na fotografijama se vidi da je strujanje u graničnom sloju laminarno na većoj površini krmila u modifikovanoj konfiguraciji (slika 14b) u odnosu na strujanje na krmilu u osnovnoj konfiguraciji (slika 13b). Slike strujanja (13b i 14b) potvrđuju razliku numeričkih vrednosti C_{zk} .

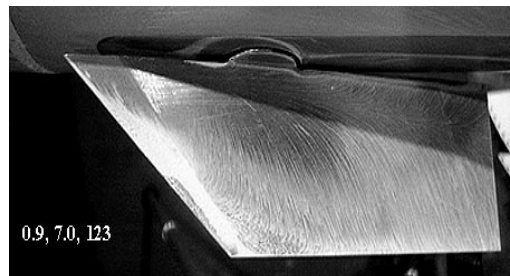
Detaljnija analiza strujne slike zahteva variranje većeg broja parametara tokom eksperimenta i mogućnosti da se koriste i upoređuju rezultati bar dve metode vizualizacije strujanja. To bi olakšalo tumačenje eksperimentalnih slika, identifikaciju svih pojava i otklanjanje nedostataka svake metode.

Zaključak

Eksperimentalna ispitivanja u aerotunelu omogućila su određivanje aerodinamičkih koeficijenata modela LVB i vizualizaciju strujanja. Rezultati su još jednom pokazali da su eksperimentalna ispitivanja nezaobilazni deo razvoja novih sredstava naoružanja. Merenje aerodinamičkih sila i momenata modela vršeno je savremenim unutrašnjim aerovagama. U ovom radu razmatrani su rezultati dobijenih koeficijenata normalne sile C_z na modelu i C_{zk} na horizontalnom krmilu za različite konfiguracije modela. Pokazano je da karakter eksperimentalno dobijenih krivih $C_z=f(\alpha)$ za ceo model LVB ne pokazuje odstupanja, dok $C_{zk}=f(\alpha)$ za krmilo u osnovnoj konfiguraciji modela na Mahovom broju $M_\infty=0,9$ odstupa od karaktera krive na



a



b

Sl. 14 – Strujna slika na krilu i krmilu modela LVB, $M_\infty=0,9$; $Po=2,3$ bar; $POZPRS=123$; $\alpha=7,56^\circ$

$M_\infty=0,8$. Odstupanja se manifestuju promenljivim gradijentom, nelinearnošću u opsegu malih napadnih uglova i ranijim padom uzgona. Poremećaji strujnog polja na $M_\infty=0,9$ utiču na koeficijent momenta propinjanja modela C_m .

Pretpostavka da su odstupanja aerodinamičkih koeficijenata krmila i modela rezultat uticaja konusnog vrha, odnosno pozicije upravljačke sekcije, pokazala se tačnom, jer je montaža prstena između konusnog vrha i sekcije krmila delimično eliminisala poremećaje strujanja. Za ovu konfiguraciju, za $M_\infty=0,9$, dijagram koeficijenta normalne sile na krmilu približio se očekivanom obliku.

Vizualizacija strujanja u graničnom sloju metodom uljnih emulzija dala je kompletnu sliku strujanja oko modela u graničnom sloju i potvrdila rezultate dobijene merenjima aerovagom. Fotografije snimljene pri uslovima pada C_{zk} , pokazuju da je strujanje na gornjaci krmila veoma složeno i većim delom turbulentno. Zone otcepljenja strujanja, za $M_\infty=0,9$, veoma su blizu napadne ivice krmila. Veliki deo krmila nalazi se u zoni ekspanzionih talasa formiranih na kraju konusnog vrha. Strujne slike na krilima ne pokazuju znatne razlike za promenu M_∞ i za promenu konfiguracije dodavanjem prstena.

Uporedna primena više komplementarnih tehnika tokom eksperimentalnog ispitivanja modela u aerotunelima i u ovom slučaju pokazala se veoma korisnom. U nastavku istraživanja modela LVB planira se uvođenje šliren-metode za vizualizaciju kompletnog strujnog polja i numerička obrada komercijalnim paketima proračunske dinamike fluida.

Literatura:

- [1] Damljanović, D.: Ispitivanje modifikovanog modela laserski vođene bombe na Mahovim brojevima 0,5 do 0,9 u aerotunelu T-38, VTI, Beograd.
- [2] Elfstrom G. M., Medved, B.: The Yugoslav 1,5m Trisonic Blowdown Wind Tunnel, AIAA Paper 86-0746-CP.
- [3] Janjikopani G.: Baždarenje aerovage VTI40A, Vojnotehnički institut, Beograd.
- [4] Marinkovski, D., Damljanović, D.: Proračun i baždarenje trokomponentne aerovage na krmilu modela laserski vođene bombe, Vojnotehnički institut, Beograd.
- [5] Marzkirich, W.: Flow visualization, Academic Press, New York, 1977.
- [6] Yang, W. J.: Flow visualization III proc. of 3. International Symposium, An Arbor MI, 1983, Hemisphere, New York, 1985.
- [7] Ristić, S.: Flow Visualization Technics in wind tunnels, VTI VJ 1996, skripta.
- [8] Ristić, S.: Vizualizacija strujanja u aerodinamičkim tunelima, Glasnik RV i PVO, 1990, 1, 16–24.
- [9] Ristić, S.: Pregled metoda za vizualizaciju strujanja u aerodinamičkim tunelima, kumnti, VTI VJ, 1999.
- [10] Ristić, S.; Vitić, A.; Matić, D.: Vizualizacija i numerička simulacija oko prednjeg dela modela torpeda, 29. Hipnef 2004, Zbornik radova, str. 267–273.
- [11] Ristić, S.: Vizualizacija strujanja oko modela laserski vođene bombe u aerotunelu T-38 uljanim premazima, VTI, 2004.
- [12] Ristić, S.; Damljanović D.: Normal force coefficient C_z determination and flow visualization on fin of laser guided bomb model in wind tunnel T-38, STR (in printing).