

Dr Slavica Ristić,  
dipl. inž.  
Vojnotehnički institut,  
Beograd

## PREMAZI OSETLJIVI NA PRITISAK – NOVA MOGUĆNOST VIZUALIZACIJE STRUJANJA

UDC: 533.68 : 629.7.018

### Rezime:

*U radu je opisan novi metod vizualizacije strujanja i merenje raspodele pritisaka po površini, baziran na premazima, odnosno bojama osetljivim na pritisak – PSP. Ovi premazi nalaze široku primenu u različitim oblastima nauke i industrije. Prikazani su rezultati ispitivanja ovom metodom u svetski poznatim aerodinamičkim laboratorijama. Prelazak sa klasičnih davača pritiska na PSP tehnologiju omogućava brže i preciznije merenje pritisaka, što će omogućiti poboljšanje karakteristika aviona.*

*Ključne reči: premazi osetljivi na pritisak, aerotunel, vizualizacija strujanja, raspodela pritiska.*

---

### PRESSURE SENSITIVE PAINTS – NEW POSSIBILITY OF FLOW VISUALIZATION

#### Summary:

*The description of the new method for flow visualization and surface pressure distribution measurement, based on emulsions named pressure sensitive paints – PSP, are given in this paper. These paints have large applications in different branches of science and industry. The results of this research method from the most famous world aeronautical laboratories are presented. The switch from pressure taps to pressure sensitive paints enables fast and accurate pressure testing and finally predictable and improved aircraft performance.*

*Key words: pressure sensitive paints, wind tunnel, flow visualization, pressure distribution.*

---

#### Uvod

U okviru razmatranja mogućnosti modernizacije aviona G-4 pokazala se potreba za preciznim ispitivanjem lokalnih udarnih talasa na površini krila. U eksperimentalnoj aerodinamici postoji veliki broj metoda koje se mogu koristiti u tu svrhu [1–15]. Postoje metode ispitivanja u slobodnom letu i u aerodinamičkim tunelima. Metode mogu da se zasni- vaju na merenju raspodele pritisaka po površini modela, merenju aerodinamičkih sila i momenata ili vizualizaciju stru-

janja. Prateći savremene tendencije u svetu, koje se odnose na vizualizaciju strujanja u graničnom sloju, s ciljem da se detektuje lokacija udarnog talasa, napravljena je analiza postojećih, a naročito najnovijih metoda. Rezultati te analize omogućavaju optimalan izbor metode koja, u okviru materijalnih mogućnosti, daje najbolje rezultate.

Kratke opšte napomene i podela metoda vizualizacije strujanja uvod su u detaljniji osvrt na fizičke principe, prednosti i nedostatke metode koja koristi premaze, boje osetljive na pritisak (PSP

– Pressure Sensitive Paint). Dati su primeri primene PSP tehnologije [3, 6–10, 12–14], koja predstavlja metodu izbora za ispitivanje strujanja na krilu modela aviona G4.

Mogućnosti koje pružaju PSP su od samog njihovog pojavljivanja pre desetak godina zainteresovale istraživače u oblasti aerodinamike. Raspodela pritisaka na površini modela u aerotunelima koristi se da bi se odredili optimalni aerodinamički dizajn, pojava udarnih talasa, itd. Precizna merenja u ovoj oblasti doprinose razvoju bržih, sigurnijih i efikasnijih aviona. Avioindustrija poslednjih godina ima stroge zahteve. Konstruktori moraju brzo da prihvataju standarde i da vrše neophodna poboljšanja u snazi, manevarskim sposobnostima, sigurnosti, efikasnosti i snižavanju cene aviona.

PSP tehnologija danas je našla primenu i u drugim oblastima, kao što su: automobilska industrija, nedestruktivna ispitivanja uređaja koji rade pod pritiskom, itd.

### **Opšte o vizualizaciji strujanja**

Osnovni fluidi, koji se koriste u eksperimentalnoj aerodinamici, jesu vazduh i voda. To su bezbojni fluidi čije kretanje oko letelica, ili njihovih modela, ne može biti neposredno posmatrano i snimano. Zbog toga se koriste posredne metode koje se mogu svrstati u posebnu naučnu disciplinu u okviru eksperimentalne aerodinamike, u vizualizaciju strujanja [1].

Nove naučne ideje iz ove oblasti brzo su našle put do praktičnog ostvarenja, zbog toga što je tehnologija dosegla nivo na kojem je mogla odgovoriti nauci. Poslednjih godina ova oblast je u ekspanziji, u smislu razvoja novih metoda i njihove

aplikacije u ispitivanjima složenih strujnih polja [6–15]. Nove metode vizualizacije omogućavaju „pogled u fizičke procese“ koji se ispituju u fundamentalnoj mehanici fluida, u termodinamici, toplotnim mašinama, aerodinamičkom inženjeringu, arhitekturi, medicini, testiranju proizvodnih procesa i drugim oblastima nauke i tehnike. Savremeni razvoj kompjuterske tehnike i digitalna obrada slike omogućavaju automatsku analizu efekata vizualizacije strujanja i dobijanje kvalitativne i kvantitativne vrednosti strujnih parametara, koji ne mogu da se dobiju klasičnim, konvencionalnim tehnikama merenja. Najnoviji razvoj kompjuterskih metoda dinamike fluida (CFD) često koristi rezultate vizualizacije strujanja za proveru numeričkih rezultata, kao i za komparativnu analizu eksperimenta i teorijske slike strujanja.

Posebno značajna oblast za rešavanje velikog broja tehničkih problema, jeste strujanje u graničnom sloju, koji se formira oko testiranih objekata i modela. Vizualizacija strujanja u graničnom sloju omogućava da se detaljno ispita njegova priroda, odredi debljina i područje preobrazaja. U literaturi [1, 6, 11] detaljno su opisane karakteristike graničnog sloja i metode koje se najčešće koriste u njihovom ispitivanju.

Najznačajnije metode mogu se uslovno podeliti u tri grupe: klasične, optičke i specijalne. Prva grupa metoda nazvana je klasičnom zbog toga što se koristi najduže od svih. Danas ova grupa metoda uključuje najsavremenije tehnologije, tehnike osvetljavanja, snimanja i obrade. U ovu grupu metoda mogu biti svrstane metode vizualizacije strujanja s markerima, metode s premazima i meto-

de s končićima. Optičke metode obuhvataju metod senke, šliren, interferometrijske (klasične i holografske) metode, laser doppler anemometriju, brzinsku sliku čestica, itd. U grupu specijalnih metoda svrstane su sve metode koje su kombinacija elektrohemijske i fotohemijske metode, metode s infracrvenim i ultrazvučnim zračenjem, itd.

#### *Vizualizacija premazima*

U grupi metoda vizualizacije strujanja u graničnom sloju veoma je značajna metoda premaza. Premazi mogu da detektuju strujnice u neposrednoj blizini površine modela, da prikažu raspodelu pritisaka ili temperature, zavisno od prirode procesa koji se aktivira u premazu [1, 2, 4, 11].

Najčešće i najduže se koristi metoda vizualizacije uljnim emulzijama [1]. Primenuju se u ispitivanju podzvučnih i nadzvučnih strujanja, u vazduhu ili vodi. Uljne emulzije izrađuju se na osnovu petroleuma, kerozina ili lakih transformatorskih ulja, kojima se dodaju različiti pigmenti i aditivi.

Pored uljnih emulzija, za vizualizaciju graničnog sloja koriste se i drugi premazi zasnovani na detektovanju promena temperature u neposrednoj okolini površine modela. Poznato je da se pri promeni laminarnog u turbulentno strujanje temperatura povećava, i obrnuto [1, 2]. Ako se na površinu nanese termoosetljivi premaz on će menjati boju zavisno od temperature. Opseg promena je u intervalu 100°C. Osetljiviji premazi, koji se koriste za fina, precizna ispitivanja, sadrže tečne kristale. Oni reaguju na promene temperature od oko 0,5°C. Tečni,

odnosno holesterični kristali selektivno apsorbuju i reflektuju upadnu belu svetlost, zavisno od temperature podloge, sloja i okoline.

Poslednja reč tehnologije u ovoj oblasti su boje osetljive na promenu pritiska, koje mogu da se koriste kao premazi za vizualizaciju strujanja oko modela u slobodnom letu i u aerotunelima [1–15]. Osim spomenutih premaza, treba dodati da se koriste i sublimacioni premazi, premazi sa fluorescentnim dodacima, sa različitim bojama, kao i premazi sa osobinama dvojnog prelamanja [1, 2, 4, 6].

#### **Boje osetljive na pritisak**

Boje osetljive na pritisak su premazi koji mogu da daju tačnu raspodelu pritiska na površini modela gde su nanete, a samim tim i lokaciju udarnog talasa. Ova metoda se do sada nije koristila u laboratorijama VTI, a u svetu se veoma uspešno koristi poslednjih desetak godina [3, 6–15]. U nastavku je dat kratak pregled fizičkih principa i osnovnih karakteristika ove metode.

Mogućnost da generišu preciznu, prostorno kontinuiranu raspodelu pritiska i temperature na ispitivanim aerodinamičkim površinama od bitnog je značaja za njihovu primenu pri izučavanju kompleksnih strujanja i za upoređenje sa rezultatima simulacije dobijenim metodama proračunske dinamike fluida (PDF).

Konvencionalne metode merenja pritiska koriste različite tipove elektro ili mehanički skenirane davače pritiska, koji se preko cevčica povezuju do merne tačke na površini. Ova metoda je veoma precizna, ali ima niz nedostataka; daje podatke u diskretnim tačkama, narušava

konfiguraciju površine i zahteva skupu opremu za prikupljanje i obradu signala. Metoda nije pouzdana kada se radi u zagađenim sredinama i na ekstremnim temperaturama. Tipičan model za merenje raspodele pritiska po površini aviona košta prosečno od 500 000 do milion USD, od čega na instalaciju cevčica i davača pritiska otpada oko 30%. PSP tehnologija, zbog svojih mogućnosti, nameće se kao alternativna tehnika za određivanje statičkog pritiska na površinama aviona u slobodnom letu ili modela aviona u aerotunelima.

#### *Princip PSP tehnologije*

Na slici 1 šematski je predstavljen osnovni mehanizam, odnosno princip u kojem se zasniva PSP tehnologija.

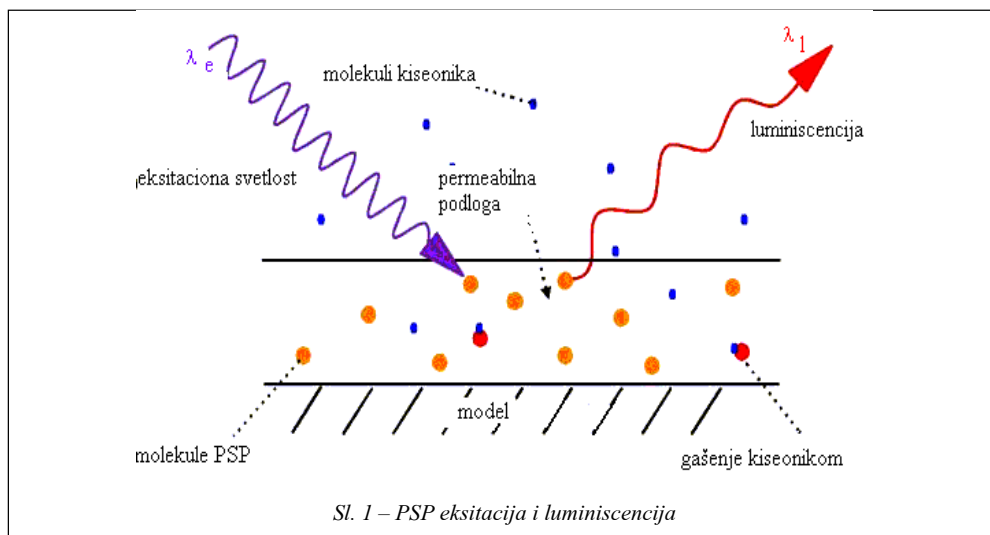
Boje osetljive na pritisak su premazi koji se sastoje od osnovnog polimera (baze) u koji su ubačene (potopljene) luminiscentne molekule. Danas se u svetu koriste različiti tipovi PSP u zavisnosti

od područja primene. Lista PSP premaza je sve duža, jer se intenzivno radi na optimizaciji starih i stvaranju novih boja. Polimerna ili druga osnova boje (primer sol-gel) diktira termalne i mehaničke karakteristike, vremenski odziv boje, a doprinosi i njenoj osetljivosti.

Luminiscentni molekuli mogu biti dobijeni kao složena jedinjenja na bazi metala kao što su: rutenium (Ru), europium (Eu), platina (Pt), itd.

Kada se premaz u kojem se nalaze luminiscentne molekule osvetli ultra ljubičastom svetlošću  $\lambda_e$  (300 do 345 nm) određenom energijom, one apsorbuju svetlost i dolazi do njihove eksitacije. Vraćanje u normalno stanje vrši se reemisijom apsorbovane svetlosti. Talasna dužina luminiscencije  $\lambda_l$  kraća je od apsorbovane i nalazi se u oblasti vidljivog spektra (slika 1).

Podloga, odnosno baza u kojoj su potopljene luminiscentne molekule je permeabilna za molekule kiseonika ( $O_2$ ). Kada u boji penetriraju molekuli kiseoni-

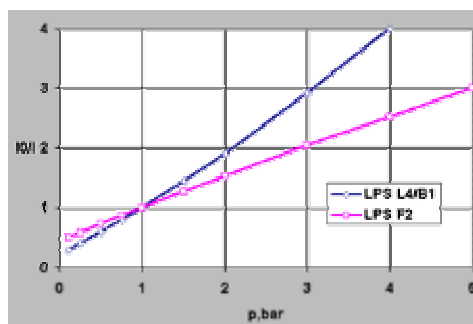


ka, dolazi do gašenja luminiscencije i smanjenja intenziteta emitovane svetlosti. Broj molekula kiseonika koji vrši gašenje direktno je proporcionalan parcijalnom pritisku vazduha, odnosno kiseonika. Intenzitet luminiscencije obrnuto je proporcionalan pritisku na ispitivanoj površini. Na ovom principu PSP mere apsolutni, lokalni pritisak. Snimanje raspodele intenziteta luminiscencije po ispitivanoj površini može da se vrši foto-aparatom, CCD ili TV kamerom. Promene u intenzitetu luminiscencije mogu biti pretvorene u promene pritiska pomoću adekvatne kalibracije [5, 7–10, 12–15].

PSP u suštini predstavljaju višeslojni premaz, a sastoje se od: bele podloge, koja daje optičku uniformnost modela i povećava intenzitet eksitacione svetlosti, adhezivnog sloja za povezivanje podloge i aktivnog sloja i aktivnog, odnosno PSP sloja osetljivog na promene pritiska vazduha. U ovom sloju često se pored osnovnog, nalazi još jedan tip luminiscentnih molekula koji služe za eliminisanje nepoželjnih uticaja temperature i intenziteta eksitacione svetlosti. Oni se pobuđuju istom talasnom dužinom, a emituju u drugom delu spektra, pa se njihovi signali lako odvajaju [12–15].

PSP mogu biti proizvedeni u obliku spreja ili kao samolepljive trake. Njihova debljina ne prelazi 100  $\mu\text{m}$ . U tabeli 1 dat je pregled karakteristika nekoliko tipova PSP koje proizvodi firma Optrod [13]. Oznake LPS B1, LPS B1T (T oznaka za traku), LPS L4 i LPS L4T namenjene su za ispitivanja u stacionarnom strujanju sa transoničnom i supersoničnom brzinom u aerotunelima ili u slobodnom letu, a LPS F2 LPS F2T za hipersonične brzine, udarne cevi i nestacionarna strujanja.

Na slici 2 prikazana je kalibraciona kriva osetljivosti PSP (odnos eksitacionog i emisionog intenziteta) u funkciji pritiska na temperaturi od 20°C [13].



Sl. 2 – Kalibraciona kriva PSP na  $T=20^{\circ}\text{C}$

#### *Prednosti i nedostaci PSP tehnologije*

PSP imaju niz prednosti u odnosu na konvencionalne metode merenja raspodele pritiska na modelima. Osnovna prednost je što omogućavaju kontinuirano određivanje pritiska po celoj površini sa velikom prostornom rezolucijom. PSP su neinvazivna tehnika i, ako se pravilno nanose (debljina premaza je oko 1  $\mu\text{m}$ ), ne remete strujanje u graničnom sloju oko modela. Njihov vremenski odgovor je praktično trenutni, tako da mogu da se koriste i za nestacionarna strujanja [7–10, 12–14]. Proces luminiscencije je reverzibilan tako da se mogu koristiti u toku više testova.

Korišćenje PSP eliminiše potrebu da se rade modeli sa rupicama i kanalima za instalaciju cevčica i merača pritiska, pa se zbog toga skraćuje vreme izrade modela i smanjuje njihova cena. Istovremeno, povećava se čvrstina modela, što omogućava ispitivanje na većim Rejnoldsovim brojevima. Ovi modeli mogu da se koriste i u ispi-

tivanjima sila i momenata, što znači da su univerzalni, a ne za samo jednu upotrebu [7, 12–15]. PSP zahtevaju relativno jeftinu dodatnu opremu za razliku od drugih metoda merenja raspodele pritiska.

U projektovanju aviona, PSP štede i vreme i novac, jer njihova primena daje veliki broj informacija o pritisku i opterećenjima pojedinih delova aviona ili projektila, što ubrzava projektovanje i izradu modela, odnosno letelica.

Nažalost, PSP imaju i svoje nedostatke [12–14]. Jedna mana PSP tehnologije je što premazi „stare“, odnosno degradiraju tokom vremena. To se događa zbog fotohemijskih reakcija koje se odvijaju na molekulama tokom ekspozicije na eksitacionim talasnim dužinama. Ova karakteristika je bitna za velike modele.

hu koji vrše inhibiciju luminiscencije. Traži specijalnu pripremu modela, čišćenje, odmašćivanje i nanošenje adhezivne podloge. Obično se nanosi na belu podlogu kako bi se obezbedilo maksimalno iskorišćenje eksitacione svetlosti. Jedan premaz može se koristiti nekoliko sati, za više ponovljenih ispitivanja, ali se mora voditi računa o starenju premaza, jer to dovodi do promene njegovih karakteristika.

#### *Primena PSP u aerodinamičkim ispitivanjima*

Na slici 3a šematski je prikazana osnovna postavka za primenu PSP u eksperimentima, a na slici 3b izgled modela koji je premazan sa PSP [3, 5, 7–14].

*Tehnički podaci PSP proizvoda firme Optrod [13]*

*Tabela 1*

Tip PSP	Pmax (bar)	Osetljivost <sup>a)</sup> (%/bar)	Temp. opseg (°C)	Temp. <sup>b)</sup> koeficijent. (%/°C)	Vreme <sup>c)</sup> odgovora (s)	Efikasnost <sup>d)</sup> (%)	Opseg luminiscencije (nm)
LPS B1/B1T	5	70	-20÷60	0,35	0,5	10	425÷550 odnosno: 610÷640
LPS L4/L4T	5	70	-20÷60	0,35	0,5	10	425÷550
LPS F2/F2T	10	55	0÷100	0,2	0,005	6	425÷550

Drugi nedostatak metode je što emisija PSP premaza pokazuje u isto vreme i uticaj lokalne temperature, jer ona utiče na energetska stanja luminiscentnih molekula i na permeabilnost substrata. Temperaturna zavisnost je veoma bitna pri ispitivanju sa kompresibilnim fluidima (kada su veće brzine u testu) i gde temperatura po površini modela nema uniformnu raspodelu. Ova metoda je osetljiva na kontaminaciju, na prašinu i druge agense u vazdu-

Osnovna uprošćena jednačina koja povezuje vrednosti intenziteta luminiscencije na slikama sa vrednostima pritiska u istim tačkama na modelu je Stern-Volmerova jednačina (1) [13]. Ona zahteva poznavanje referentnih vrednosti za  $P$  i  $T$ , koji su na modelu u uslovima mirovanja. Tehnologija ispitivanja zasniva se na komparativnoj analizi slike kada je model u atmosferi uniformnog, konstantnog, poznatog pritiska i kada se nalazi u struji vazduha i izložen je razlikama pritiska.

$$\frac{I_{ref}}{I} = A + B \frac{P}{P_{ref}} = \frac{T_{ref}}{T} \quad (1)$$

gde je:

$I_{ref}$  – intenzitet luminiscencije pri odsustvu strujanja (wind off),

$I$  – intenzitet luminiscencije pri strujanju kada aerotunel radi (wind on),

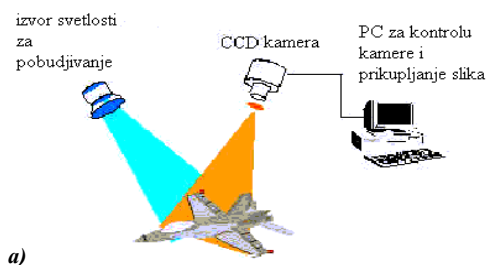
$P$  – pritisak za uslove mirovanja (wind off),

$P_{ref}$  – pritisak kada postoji strujanje (wind on),

$T$  – temperatura za uslove mirovanja (wind off),

$T_{ref}$  – temperatura za uslove strujanja (wind on),

A, B – temperaturno zavisni koeficijenti.



a)



b)

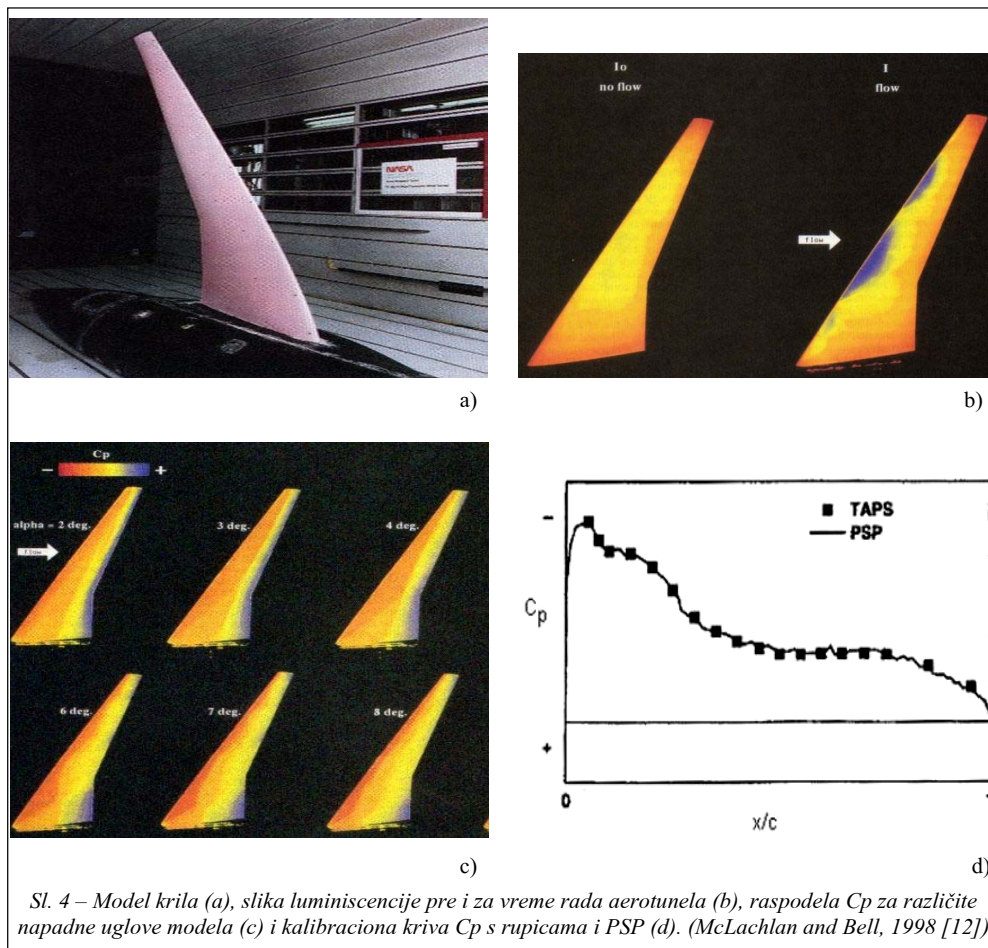
Sl. 3 – Osnovna postavka za primenu PSP premaza (a) i model sa PSP u aerotunelu (b)

Koeficijenti A i B određuju se eksperimentalno i zavise od temperature T. Oni moraju da se odrede pre konverzije intenziteta luminiscencije u raspodelu pritiska. Postoje dva pristupa kalibraciji PSP, pre testa, u kalibracionoj komori (a priori) i u radnom delu aerotunela (in situ) [12]. U prvom postupku koristi se test-ploča na koju se nanosi premaz PSP izabrane za predstojeći test. Ploča se stavlja u komoru sa mogućnošću regulacije pritiska i temperature, koji se očitavaju u trenutku kada se uzimaju podaci o intenzitetu luminiscencije. U komori se vrše odvojena merenja za promene pritiska i za promene temperature, pa se na taj način određuju konstante A i B i diferencira njihov uticaj na rezultate merenja.

Drugi metod kalibracije vrši se na ispitivanom modelu na kojem treba da postoje kontrolne tačke sa rupicama i davačima. Izmerene vrednosti pritiska u tim tačkama uzimaju se kao kalibracione vrednosti PSP premaza. Metod podrazumeva da je površina modela izotermna. Uticaj temperature u ovom postupku može se odrediti sa premazom koji je osetljiv samo na temperaturu. Obično se jedna strana modela premaže PSP osetljivim na pritisak, a druga sa PSP osetljivim na temperaturu.

Najnovije metode koriste PSP koji su dizajnirani tako da su luminiscencije uzrokovane promenom pritiska u jednom delu spektra, a one koje su posledica temperature ili debljine sloja u drugom delu spektra, pa se mogu lako diferencirati od uticaja promena pritiska [7, 12–15].

Odnos intenziteta ( $I_{ref}/I$ ) koreliran je sa izlazom iz CCD kamere, što omogućava generaciju prostorne, kontinuirane mape pritiska, omogućavajući simulta-



no skupljanje podataka po celoj površini od interesa za ispitivanje. Pošto CCD kamere danas imaju više miliona piksela, to znači da se istovremeno meri pritisak u isto toliko tačaka.

Izlaz iz CCD kamere može vizuelno da se prikaže kao dvodimenzionalna slika u kojoj se intenzitet luminiscencije prikazuje preko nijanse sivog ili sa raznim odgovarajućim bojama.

Na slici 4a prikazan je model krila sa PSP premazom a na slici 4b su snimci kalibracije (za uslove mirovanja i struja-

nja). Na slici 4c prikazane su slike istog modela za različite napadne uglove. Koefficient pritiska  $C_p$  prikazan je preko koreliranih boja [12].

Kada se prikupe podaci za analizu i obradu, sledeći problem predstavlja dvodimenzionalnost slike, dok je realni model trodimenzionalan. Povezivanje svake tačke slike sa odgovarajućom tačkom modela je kompleksna operacija ako se zna da je moglo doći do neželjenih distorzija u slici zbog sočiva kamere ili do deformacije modela tokom ispitivanja. Ovi proble-



mi rešavaju se sofisticiranim metodama razvijenim u fotogrametriji [3, 5, 7–15].

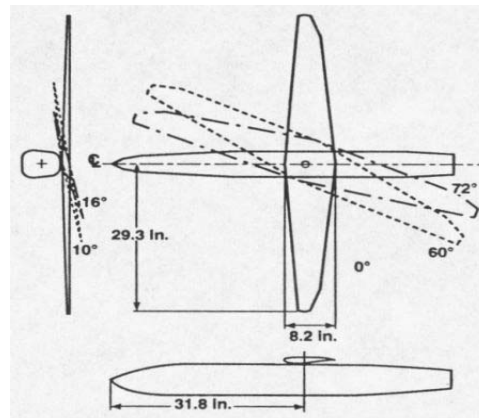
#### *Primeri ispitivanja PSP tehnologijom*

U literaturi i na Internetu može se naći veliki broj rezultata ispitivanja raspodele pritisaka PSP. Deo tih rezultata prikazan je kao ilustracija mogućnosti koje pruža ova nova tehnologija. Primeri su izabrani iz različitih centara za aerodinamička ispitivanja, za različite opsege brzine i različite modele [3, 5, 7–15].

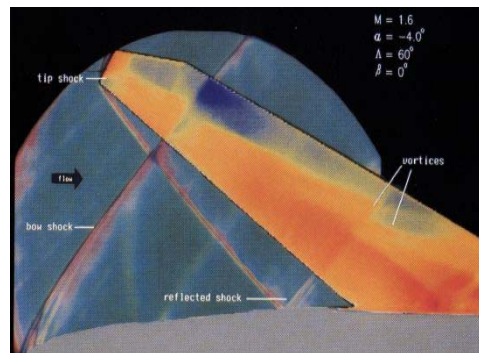
Na slici 4c prikazani su rezultati ispitivanja modela krila sa PSP. Za različite napadne uglove dobijena slika prati promene pritisaka, plave zone opisuju područja sa većim intenzitetom luminiscencije, što odgovara manjim pritiscima, a crvene obeležavaju zone sa manjim intenzitetom luminiscencije, odnosno sa većim pritiscima (originalne fotografije su u boji). Slika 4d daje kalibracionu krivu dobijenu merenjem sa davačima pritiska i PSP. Autori su pokazali da je srednja vrednost razlike u izmerenim pritiscima 344 Pa [12].

Rezultati dobijeni u NASA 9×7 ft supersoničnom aerotunelu, gde je ispitivan model sa posebno generisanim kosim krilom sa velikim rasponom [12], prikazani su na slici 5.

Krilo modela je sa supersoničnim aeroprofilom, a njegov ugao može da se menja od 0° do 72°. Rupice za merenje pritiska postavljene su na rastojanje od jedne četvrtine tetive, a druga strana krila je premazana sa PSP (4a). Za osvetljavanje se koristi komplet od sedam živinih lampi. Slikanje je izvršeno standardnom CCD kamerom sa 8-bitnom rezolucijom



a)

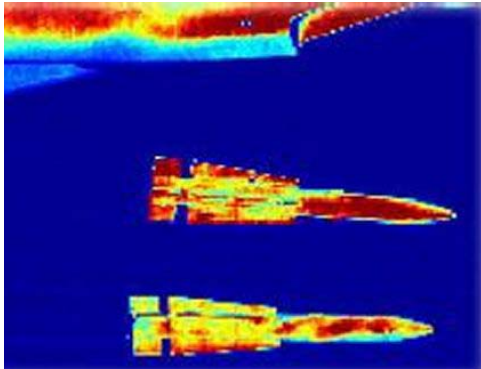


b)

Sl. 5 – Dijagram modela sa kosim krilima (a) i raspodela pritisaka po površini krila i snimak šliren efekata (b), (McLachlan, 1995)

intenziteta 512×480 piksela prostornom rezolucijom. Kalibracija u ovom eksperimentu radena je pomoću oba spomenuta metoda.

Rezultati eksperimenta prikazani su na slici 5b. Vizualizacija strujanja izvršena je oko supersoničnog krila postavljenog na  $M = 1,6$ , napadni ugao  $-4^\circ$ , ugao između krila i modela  $60^\circ$  i ugao skretanja  $0^\circ$ . Mapa pritisaka PSP data je istovremeno sa šliren slikom strujanja oko modela i krila. Plava boja pokazuje niski pritisak, a crvena visok. Očigledna je



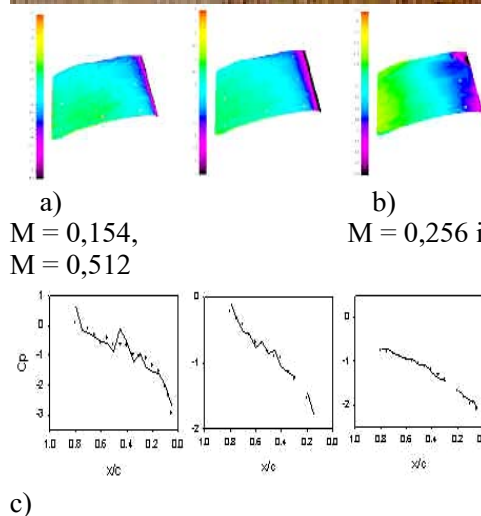
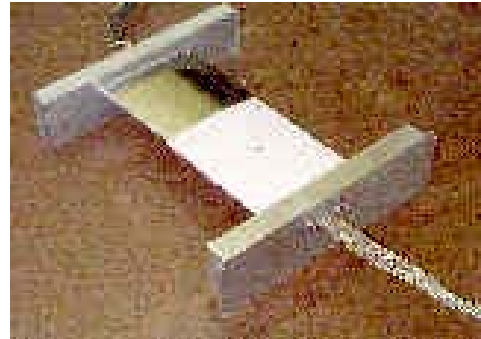
Sl. 6 – Slike raspodele pritisaka na raketama AIM-54 Phoenix, koji se odvajaju od lovca F-14

prednost korišćenja PSP za vizualizaciju strujanja. Pomoću ovih boja mogu se videti lokacije udarnih talasa na gornjoj površini krila. Šliren snimak pokazuje i lučni udarni talas na vrhu modela, kao i reflektovani talas koji potiče od kraja krila. Ova dva talasa takođe su detektovana i PSP premazom.

Jasno se vidi da postoji korespondencija između dobijenih rezultata: lučni udarni talas, koji se javlja na vrhu modela, ima uticaja na raspodelu pritisaka na krilu, ispred njega je manji pritisak, a iza njega veći, što dovodi do pojave intenzivnije plave boje na krilu. Takođe, može se videti i uticaj reflektovanog udarnog talasa na površini krila.

Na slici 6 vidi se kako PSP premazi oslikavaju raspodelu pritisaka pri složenom procesu odvajanja raketa od aviona nosača [12].

Ispitivanja raspodele pritisaka na modelu superkritičnog krila SC3 izvršeno je u NASA Langley trisoničnom, kriogenom aerotunelu, sa malim brzinama, pomoću PSP. Pritisak u devet tačaka meren je davačima, a model je premazan PSP emulzijom na bazi sol-gel, koja ima



Sl. 7 – Rezultati ispitivanja krila SC3

povećanu osetljivost u odnosu na polimerne emulzije.

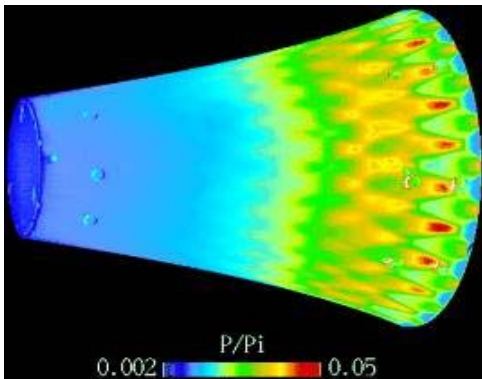
Rezultati ispitivanja dati su na slici 7; model (7a), mapa pritisaka (7b) za  $M = 0,154$ ,  $0,256$  i  $0,512$  i koeficijent  $C_p$  za navedene Mahove brojeve (7c). Kontinuirana kriva je dobijena na osnovu PSP, a tačkaste vrednosti pomoću davača [12].

Na slici 8 ilustrovana je primena PSP u okviru eksperimenta ESA's ARPT, u hipersoničnom tunelu prekidnog dejstva (R2Ch u Oneri) [12]. Model je centralni mlaznik Aerospike. Oko njega se nalaze 24 kružne mlaznice, a njihova

uloga je da vrše kontrolu ekspanzije mlaza tokom faze lansiranja budućeg nosača. PSP premazi su na bazi pyrena, koji je skoro neosetljiv na promene temperature i veoma brzo reaguje. Za eksitaciju je korišćena živina lampa ( $334 \pm 5$  nm), a svetlost se preko fibera uvodi u aerotunel, kako bi se eliminisala potreba za pyrex prozorima, transparentnim za tu talasnu dužinu svetlosti. Snimanja su vršena u razmaku od 1s, a dobijeni rezultati raspodele pritiska na bazi PSP su u odličnoj saglasnosti sa klasično merenim vrednostima u diskretnim tačkama.

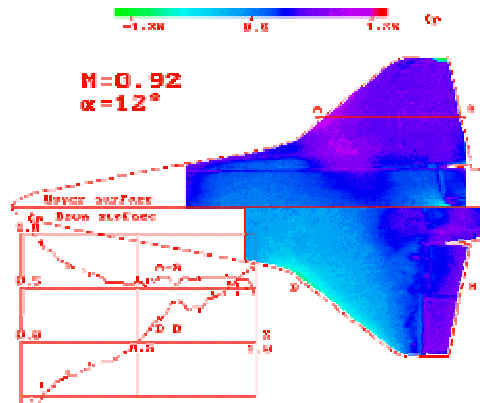


a)

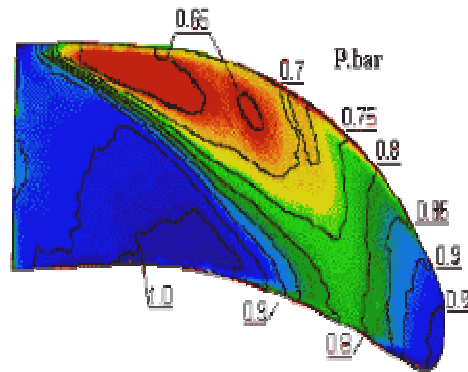


b)

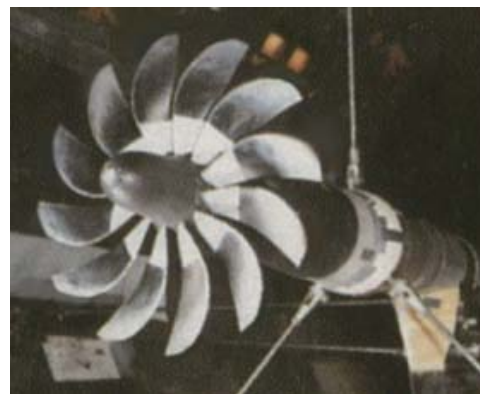
Sl. 8 – Laboratorijski model Aerospike centralnog mlaznika (a) i mapa pritiska dobijena PSP tehnologijom (b)



a)



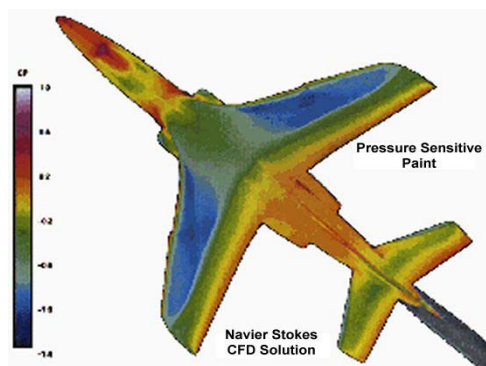
b)



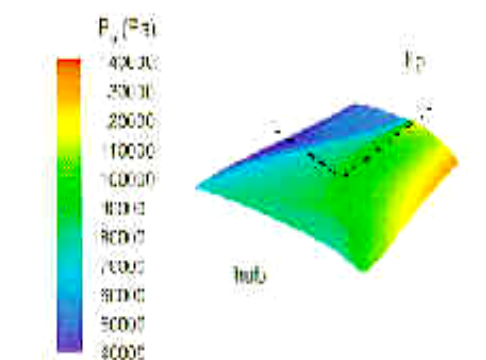
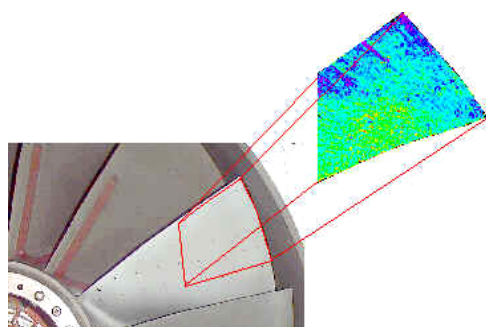
b)

Sl. 9 – Raspodela pritiska na svemirskom brodu Buran, a) i na lopatici turbine snimljene u aerotunelima u CAGI b)

U poznatom aeronautičkom centru CAGI [13] vršena su mnoga ispitivanja PSP tehnologijom, a na slici 9 dati su primeri ispitivanja nosača aviona (a) i turbine (b), realizovani u aerotunelu T-112.



a)



b)

Sl. 10 – Uporedna slika raspodela pritiska dobijena PSP i CFD metodama: model aviona a) [12] i na lopatici turbine b) [14]

Posebno je velika primena rezultata dobijenih PSP tehnologijom u komparativnoj analizi s rezultatima različitih metoda proračunske dinamike fluida (CFD). Prednosti PSP u ovom domenu pokazane su na slici 10a i 10b. Numeričke vrednosti za raspodelu pritiska date su na levoj strani modela aviona, a eksperimentalne vrednosti dobijene PSP tehnologijom na desnoj (10a) [12].

Primena PSP u određivanju pritiska na velikim rotacionim površinama veoma je značajna zbog toga što su druge metode veoma komplikovane.

#### *Nove tendencije u PSP tehnologiji*

Iako počeci PSP tehnologije datiraju od pre desetak godina, danas se već govori o klasičnim i novim premazima koji se razvijaju za specijalne primene. Tako, na primer, PSP koji su na bazi sol-gel osnove testirane u NASI i u Nacionalnoj aerodinamičkoj laboratoriji u Japanu namenjene su za veoma male promene pritiska, u temperaturnom opsegu od  $-150$  do  $500^{\circ}\text{C}$ . Ove PSP mogu da se koriste u svim opsezima brzina, a i u kriogenim aerotunelima [10, 14, 15].

Razvoj novih polimera, koji se koriste kao osnova za potapanje luminiscentnih molekula, veoma je intenzivan, što dovodi do nove specifične primene PSP tehnike. Danas se koriste optički senzori na bazi platine (platinum octaethylporphyrin (PtOEP)) u različitim organskim i neorganskim polimerima ili filmovi na bazi kompleksnih metala [15].

Posebna primena koja treba da se naglasi je upotreba PSP tehnike u procesu dizajna i proizvodnje modela za aerotunelska ispitivanja [8, 14, 15]. Njihova primena u ovom procesu je opravdana

zbog veoma niske cene, visoke efikasnosti i preciznosti u merenju koeficijenta pritisaka. Primer je ispitivanje SST modela transoničnog putničkog aviona u aerotunelu u Japanu [8]. PSP su dale veoma važne podatke za raspodelu pritiska na osnovu kojih su izračunate izobare na transoničnom krilu i na mestima gde dolazi do interferencije uticaja motora i uvodnika vazduha [8].

PSP se primenjuju za ispitivanje veoma brzih kratkotrajnih fenomena u hipersoničnim aerotunelima i u udarnim cevima [9, 15]. Specifičnost ovih boja je što se u podlozi od anodiziranog aluminijuma nalaze složene molekule rutenijuma ( $[Ru(ph_2phen)_3]^{2+}$ ) koje su luminescentne. Brzina odgovora ovih PSP je oko 10 kHz. Ispitivanja su vršena u hipersoničnom tunelu pri  $M = 10$ .

U literaturi se mogu naći podaci da se PSP koriste i u ispitivanjima nestacionarnih strujanja [3, 7, 9, 12–15]. Pokazano je da mogu da mere fluktuacije pritiska sa frekvencijom do reda KHz, a da su ograničavajući faktor karakteristike CCD kamera kojima se snimaju slike.

PSP tehnologija može se primenjivati i u veoma razređenim gasovima, gde je mala koncentracija kiseonika, tako što se umesto standardnih osnova za luminescentne molekule koriste druge sa većom permeabilnošću, kao što su tTFPP/poly(TMSP) [15]. Danas su razvijeni novi PSP koji se mogu koristiti i u kriogenim aerotunelima [10, 14, 15]. U ovim sredinama skoro da nema kiseonika neophodnog za aktiviranje standardnih PSP. Polimer gubi permeabilnost kiseonika na temperaturama blizu tačke tečnog azota. Zbog toga su razvijeni anodizirani aluminijumski PSP (AA-PSP), bazirani na

složenim polimerima kao vezivna podloga. AA-PSP i PSP na bazi Poly (TMSP) koriste se zbog visoke osetljivosti na kiseonik i u najnepovoljnijim uslovima [15].

### Zaključak

Danas u svetu ne postoji značajan centar za aerodinamička ispitivanja koji u svoje metode ne ubraja PSP tehnologiju. U ovom radu prikazan je samo mali deo rezultata koji se nalazi u dostupnoj literaturi.

Analiza postojećih i mogućnosti primene novih metoda vizualizacije strujanja, radi detekcije mesta pojave udarnog talasa, pokazuje da je najbolja metoda vizualizacije strujanja u graničnom sloju ona koja koristi premaze na osnovu PSP. Kao zaključak može se istaći da je istraživanje lokacije udarnih talasa na krilima aviona G4 problem koji se može rešiti primenom PSP.

Danas u svetu postoji više renomiranih centara koji proizvode PSP za tržište i koji mogu da ih prilagode za specifične potrebe svakog eksperimenta (Optrod iz Rusije, ili Onera-Dafe iz Francuske, Lewis Lab iz NASE, General Paints Ltd., Celbridge, Innovative Scientific Solutions, Inc. Indian, itd.). Za primenu ove metode neophodno je nabaviti komplet PSP (podloga, adhezivni premaz i boje), koji u proseku košta oko 3000 USD, za površinu od oko 2000 cm<sup>2</sup>.

Laboratorija za eksperimentalnu aerodinamiku VTI raspolaže neophodnom opremom i stručnim kadrom i uz minimalna ulaganja može primeniti ovu metodu kao standardnu za određivanje mape pritisaka na ispitivanim modelima.

*Literatura:*

- [1] Werzkirch, W. F.: Flow Visualization. 1st ed. Academic Press, New York, 1974.
- [2] Yang, W. J. [ed.]: Flow Visualization. III proc. 3rd International Symposium, Ann Arbor MI, 1983, Hemisphere, New York, 1985.
- [3] Bykov, A. P.; Fonov, S. D.; Mosharov, V. E.; Orlov, A. A.; Radchenko, V. N.: Investigation of the Airflow around Aircraft Model at High and Intermediate Angle of Attack with Pressure Sensitive Paint, 20th ICAS Congress, Sorrento, Italy, September 1996.
- [4] Ristić, S.: Flow Visualization Technics in wind tunnels, VTI, 1996.
- [5] Kuzmin, M. G.; Nemilova, M.Yu.; Sadovskii, N. A.; Mosharov, V. E.; Orlov, A. A.; Radchenko, V. N.: Luminescent Pressure Sensor for quantitative surface flow visualization, 8<sup>th</sup> International Symposium on Flow Visualisation (1998).
- [6] Ristić, S.: Pregled metoda vizualizacije strujanja u aerodinamičkim tunelima, kum NTI, VTI, 1999.
- [7] Mosharov, V.; Radchenko, V. N., Fonov, S.: Luminescent Pressure Sensors in Aerodynamic Experiment, Central Aerohydrodynamic Institute – CWA Intentional Corporation, 1999.
- [8] Yuichi Shimbo, Keisuke Asai, Hiroshi Kanda, Yoshimi Iijima, Nobuyoshi Komatsu, Shinya Kita, Mitsuo Ishiguro: Pressure Sensitive Paint Application to a Business Jet Model in Transonic Testing, 7th Annual Pressure Sensitive Paint Workshop, West Lafayette, Indiana, Oct 1999.
- [9] Kazuyuki Nakakita, Keisuke Asai, and Takashi Yamazaki: Improvement of PSP Measurement System in a Hypersonic Shock Tunnel, 8th Annual PSP/TSP Workshop, Hampton, Virginia, Oct. 2000.
- [10] Yasuhiro Egami, Yoshimi Iijima, and Keisuke Asai: Optimizations of Polymer-Based PSP for Cryogenic Wind Tunnels, 19th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF), Cleveland, Aug. 2001.
- [11] Ristić, S.: Metode vizualizacije graničnog sloja, Tehnička dijagnostika, god. 3, br. 1, 2004, str.14–20.
- [12] [www.aerospaceweb.org](http://www.aerospaceweb.org).
- [13] [www.optrod.com](http://www.optrod.com).
- [14] <http://www.yahoo.com/ISSI>, Innovative Scientific Solutions Inc., 2766 Indian Ripple Road.
- [15] Keisuke Asai: Status and Prospect of Pressure-Sensitive Paint Technology, Journal of the Visualization Society of Japan, Vol. 21, No. 83, October 2001.